

**SAVONIA**

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# PIENJÄNNITETAAJUUSMUUTTAJIEN VERTAILU MCC- JA LAITOSTOIMITUKSISSA

Opinnäytetyö

TEKIJÄ Marko Kivijärvi

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Tutkinto-ohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma			
Työn tekijä Marko Kivijärvi			
Työn nimi Pienjännitetaajuusmuuttajien vertailu MCC- ja laitostoimituksissa			
Päiväys	26.4.2023	Sivumäärä	32
Toimeksiantaja Metso Outotec Finland Oy			
Tiivistelmä Taajuusmuuttajia käytetään sähkömoottorin nopeuden muuttamisessa ja niiden tyypillisiä käyttökohteita ovat pumput, puhaltimet, ilmastointijärjestelmät sekä kuljettimet ja hissit. Tässä opinnäytetyössä keskityttiin vertailemaan neljän toimittajan taajuusmuuttajien integroitavuutta Metso Outotecin Plant solutions - liiketoimintayksikön toimittamiin moottorikeskus- ja prosessilaitostoimituksiin. Tavoitteena oli löytää tilaajalle ensisijaisen laitetoimittajan rinnalle yksi tai useampi soveltuva toimittaja.  Työssä vertailtavana aineistona käytettiin toimittajien kanssa käytyjen keskusteluiden aikana kerättyä materiaalia sekä teknisiä materiaaleja kuten datalehtiä, käyttöoppaita ja esitteitä. Vertailu jaettiin kolmeen kategoriaan: tekniseen vertailuun, kaupalliseen vertailuun sekä luotettavuus- ja ekologisuusvertailuun. Työssä selvitettiin toimittajien taajuusmuuttajiin saatavilla olevat vakio- ja lisäominaisuudet. Lisäksi vertailtiin laitteiston kokonaiskustannusta, laitteiden huolto-, tuki- ja takuumahdollisuuksia sekä laitteiden ympäristöystävällisyyttä.  Työn lopputuloksena tilaajayritykselle löytyi neljä teknisiltä ominaisuuksiltaan soveltuvaa laitetoimittajaa, joiden laitteita voidaan hyödyntää erilaisissa projekteissa. Toimittajilta on saatavilla listahintojen lisäksi projektikohtainen hinnoittelu.			
Avainsanat Taajuusmuuttaja, vertailu			

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Electrical and Automation Engineering	
Author Marko Kivijärvi	
Title of Thesis Comparing Low Voltage Frequency Converters in MCC and Plant Deliveries	
Date 26 April 2023	Pages 32
Client Organisation Metso Outotec Finland Oy	
<p><b>Abstract</b></p> <p>Frequency converters are used to change the speed of electric motors and their typical applications include pumps, fans, air conditioning systems, conveyors, and elevators. This thesis focused on comparing the integrability of frequency converters from four vendors into motor control centers and process plants delivered by Metso Outotec's Plant Solutions business line. The objective was to find one or more suitable vendors alongside the primary equipment vendor for the business line.</p> <p>The material used for this comparison consisted of data collected during discussions with the vendors and technical materials such as data sheets, user manuals, and brochures. The comparison was divided into three categories: technical comparison, commercial comparison, and reliability and eco-friendliness comparison. The available standard and additional features of the frequency converters were studied. Furthermore, the total cost of the equipment, maintenance, support, and warranty options, as well as the eco-friendliness of the equipment were compared.</p> <p>As a result of this comparison in the thesis, four suitable equipment vendors were identified for the client organization's various projects. Beyond the list prices, project-specific pricing is available from the vendors.</p>	
<p><b>Keywords</b></p> <p>Frequency Converter, Comparison</p>	

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	7
2	METSO OUTOTEC.....	8
3	TAAJUUSMUUTTAJA .....	9
3.1	Taajuusmuuttajien historia .....	9
3.2	Taajuusmuuttajan käyttötarve ja sähköinen toiminta .....	9
3.3	Taajuusmuuttajat Minerals Plant Solutions -liiketoimintayksikössä .....	12
4	VERTAILUN KRITTEERIT .....	13
4.1	Käytön toiminnallisuuden vaatimukset .....	13
4.1.1	Jännite- ja tehovaihtoehdot .....	13
4.1.2	Moottorin ja sähköverkon vaatimukset .....	14
4.2	Käyttökohtaiset tarpeet.....	14
4.2.1	Väyläkommunikaatio.....	15
4.2.2	IP-luokka.....	15
4.2.3	Jarrukatkoja.....	15
4.3	Sähkö- ja automaatio suunnittelun tarpeet.....	16
5	TEKNINEN VERTAILU.....	17
5.1	Jännitteet ja tehoalueet .....	17
5.2	Taajuusmuuttajien ominaisuudet.....	17
5.2.1	Safe Torque Off .....	18
5.2.2	Syötön jännitevalvonta.....	19
5.2.3	Jarrukatkoja.....	19
5.2.4	PTC-, PT100- ja PT1000-anturit .....	19
5.2.5	EMC-suodattimet.....	19
5.2.6	Kuristimet.....	20
5.2.7	Kondensaattorit.....	20
5.2.8	Väylät .....	20
5.2.9	Ohjaustavan vaihtaminen .....	20
5.2.10	Siniaalto- ja dU/dt-suodattimet .....	20
5.2.11	Kahden taajuusmuuttajan ohjaus .....	21
5.3	Taajuusmuuttajien moottorikaapelin maksimipituus.....	21
5.4	Ohjelmistot.....	21

5.5	Yhteenveto.....	21
6	KAUPALLINEN VERTAILU .....	23
6.1	Laitteiston kustannus 400 V jännitteellä .....	23
6.2	Laitteiston kustannus 500 V jännitteellä .....	24
6.3	Laitteiston kustannus 690 V jännitteellä .....	25
6.4	Yhteenveto.....	26
7	LUOTETTAVUUS JA EKOLOGISUUS .....	27
7.1	Takuu-, tuki- ja huolto .....	27
7.2	Hiilijalanjälki ja vihreä siirtymä .....	27
7.3	Yhteenveto.....	27
8	YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT .....	28
8.1	Aloitussvaihe.....	28
8.2	Haastatteluvaihe .....	28
8.3	Vertailuvaihe.....	28
8.4	Viimeistely.....	29
8.5	Päätelmät.....	29
	LÄHTEET .....	30

## KUVALUETTELO

KUVA 1.	Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan peruskytkentä (Hietalahti, Tehoelektronikan perusteet, 2011, s. 91).....	10
KUVA 2.	Kolmivaiheisen kuusipulssisen tasasuuntaajan muodostama tasajännite (Hietalahti, Tehoelektronikan perusteet, 2011, s. 44) .....	10
KUVA 3.	Vaihtosuuntaajan kytkinmalli (Hietalahti, Tehoelektronikan perusteet, 2011, s. 87) .....	11
KUVA 4.	Vaihtosuuntaajan muodostama jännite (Hietalahti, Tehoelektronikan perusteet, 2011, s. 87) .....	11
KUVA 5.	S1- ja S2-väyläkonfiguraatiot (Profinet University, ei pvm) .....	15
KUVA 6.	Laitteiden hinnat 400 V jännitteellä .....	23
KUVA 7.	Laitteiden hinnat 500 V jännitteellä .....	24
KUVA 8.	Laitteiden hinnat 690 V jännitteellä .....	25

## LYHENTEET JA TERMIT

MCC	Moottorihjauskeskus
VSI	Jännitevälipiirimuuttajan englanninkielinen lyhenne (Voltage Source Inverter)
CSI	Virtavälipiirimuuttajan englanninkielinen lyhenne (Current Source Inverter)
dU/dt-suodatin	Jännitepiikkejä ja jännitteen nousunopeutta rajoittava suodatin
EMC	Sähkömagneettisen yhteensopivuuden englanninkielinen lyhenne (electromagnetic compatibility)
Väylä	Tietotekniikan alijärjestelmä, jonka välityksellä siirretään dataa järjestelmien välillä
Diodi	Elektroniikan komponentti, jonka tehtävä on päästää virtaa haluttuun suuntaan, ja estää väärään suuntaan kulkevaa virtaa
Tyristori	Diodia muistuttava puolijohdekomponentti, jota voidaan ohjata johtavaan tilaan sen hilaan annetun virtapulssin avulla
Transistori	Puolijohdekomponentti, jota voidaan käyttää kytkimenä tai vahvistimena
STO	Taajuusmuuttajan suojaustoiminto, joka estää moottoria tuottamasta momenttia (Safe Torque Off)
TN-verkko	Sähköverkko, jonka yksi piste on maadoitettu, johon jännitteelle alltiit osat on yhdistetty suojamaadoitus- tai PEN-johtimella
IT-verkko	Sähköverkko, jossa mitään pistettä ei maadoiteta suoraan tai yksi piste maadoitetaan impedanssin kautta
Parametri	Funktiolle annettava arvo, kuten kiihdytysaika tai pyörimisnopeus
PWM	Pulssinleveysmodulaation englanninkielinen lyhenne (Pulse Width Modulation)

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tilaaja on Metso Outotecin Plant Solutions -liiketoimintayksikkö, ja työn aihe syntyi osana liiketoiminta-alueen kustannusten pienentämishanketta. Yrityksen yksi suurimmista kilpailueduista alallansa on kustannustehokkuus. Kustannustehokkuutta saadaan paremmaksi ensisijaisesti alentamalla tuotannon kustannuksia, jotka pääosin koostuvat työvoimakustannuksista sekä materiaalikustannuksista (Pellinen, 2019). Opinnäytetyön tarkoituksena on saada materiaalikustannuksia, eli tässä tapauksessa yksittäisen komponenttiryhmän kokonaiskustannuksia alas kilpailuttamalla useita komponenttitoimittajia keskenään.

Viime vuosina sähköisissä laitteissa käytettävistä komponenteista ja materiaaleista on ollut huomattavaa pulaa ja toimitusajat ovat pidentyneet. Syitä tähän ovat olleet mm. koronaviruspandemian aiheuttamat valmistus- ja toimitusongelmat sekä Suezin kanavan tukkeutumisen ja Ukrainan sodan aiheuttamat materiaali puutteet. Tästä syystä on entistäkin tärkeämpää, että yrityksellä on valinnanvaraa, mikäli ensisijaisen laitetoimittajan kanssa kohdataan toimitusvaikeuksia. (Hedwall, 2020; Kulikov, 2021; Egan, 2022; Electronics World, 2022)

Opinnäytetyön toinen tavoite toimittajien kilpailuttamisessa on selvittää eri valmistajien taajuusmuuttajien sisältämät ominaisuudet, ja miten hyvin laitteet ovat integroitavissa yrityksen olemassa oleviin suunnitteluprosesseihin ja laitteistoihin. Laitteen tulee integroitua suunnitteluprosesseihin automaatiojärjestelmän ja sähköisten ominaisuuksien osalta.

Työn tarkoituksena on löytää Plant Solutions -liiketoimintayksikölle mahdollisesti useampi kuin yksi laitetoimittaja vertailemalla neljän toimittajan pienjännitetaajuusmuuttajia ominaisuuksiltaan, integroitavuudeltaan ja kustannuksiltaan. Tavoitteena on löytää sopivimmat toimittajat komponenteille, jotta tilaajan omia toimitusaikoja saadaan varmemmiksi, mikäli yksittäisellä toimittajalla on toimitusvaikeuksia. Toinen haluttu lopputulos on löytää kustannushyötyä nykyiseen tasoon nähden, kun käytössä on ollut vain yksi laitetoimittaja.

### **Työn keskeiset käsitteet**

Työssä keskeisiä käsitteitä ovat käyttökohteen tarpeet ja laitteelta vaaditut ominaisuudet. Keskeisiä selvitettäviä ominaisuuksia ovat moottorin ja käyttölaitteen vaatimukset taajuusmuuttajakäytölle, laitteen vaikutukset sähköverkkoon ja mahdollisten lisätoimien tarpeellisuus, mekaaninen sopivuus keskuksiin runkokooltaan, automaatioliittynän helppous ja toimivuus sekä erikoissovellukset, kuten kahden moottorin ohjaus.

Toinen keskeinen käsite on integroituminen tilaajan sähkösuunnitteluun ja automaatioon.

Sähkösuunnitteluosio sisältää piirustukset, parametroidin, testauksen ja lisäominaisuuksien tarpeellisuuden sekä vakio-ominaisuudet toimittajien laitteissa. Automaatioon eli PLC-ohjelmointiympäristöön integroituminen sisältää kommunikoinnin, ohjausperiaatteen valinnan, logiikan sekä väylät, joilla kommunikoidaan logiikan ja taajuusmuuttajan välillä.

Työssä vertaillaan myös peruslaitteiden ja mahdollisten lisäominaisuuksien hintoja. Hintavertailu pyritään tekemään siten, että kaikissa laitteissa on samat tarpeelliset toiminnot ja lisävarusteet järkevän vertailun kannalta. Lisäksi vertaillaan laitteiden ekologisuutta.

## 2 METSO OUTOTEC

Metso Outotec Oyj on suomalainen pörssiyhtiö, jonka pääkonttori on Helsingissä. Yhtiön liiketoiminta keskittyy kaivos-, kivenmurskaus- ja metallialan laitteiden ja palveluiden tuottamiseen. Yhtiöllä on toimipisteitä ympäri maailman ja merkittävä osa myytävistä laitteista ja palveluista menevät Suomen ulkopuolelle (Pekkonen, 2021).

### **Metso Outotec Oyj:n muodostuminen**

Outotec Oyj:n juuret ulottuvat vuoteen 1940, jolloin valtion kupariyhtiö Outokumpu etsi sähköpulassa ratkaisua metallin jalostamiseen. Ratkaisu löytyi, kun keksittiin valmistaa kuparia liekkisulatusmenetelmällä käyttäen malmin omaa rikkiä. Tämän keksinnön tuoman menestyksen seurauksena Outokumpu perusti oman teknologiayksikkönsä, jonka nimeksi tuli Outokumpu Technology. (Outokumpu, 2022)

Vuonna 2006 Outokumpu Oyj muodosti teknologiatoimialastaan erillisen yhtiön Outokumpu Technology Oyj -nimellä. Saman vuoden aikana uusi yhtiö listautui Helsingin pörssiin muuttaen nimensä Outotec Oyj:ksi. (Hulkko, 2010)

Metso Oyj syntyi vuonna 1999 Paperi- ja kartonkikonevalmistaja Valmetin ja kuitu-, kivenmurskaus- ja virtauksensäätöteknologiaan erikoistuneen Rauman yhdistyessä. Metson toiminta oli jakautunut 2000-luvun alussa kolmelle sektorille: Metso Paper, Metso Minerals ja Metso Automation. (Rämö, 2021)

Vuonna 2013 Metso Oyj jakautui kahtia, jolloin massa-, paperi- ja voimantuotantoliiketoiminnat muodostivat yhtiön Valmet Oyj. Kaivos-, maanrakennus ja automaatioliiketoiminnat jatkoivat Metso Oyj -nimen alla. (Parikka, 2013; Valmet, ei pvm)

Vuonna 2020 Metso Oyj:n mineraaliliiketoimintayksikkö Metso Minerals yhdistyi Outotec Oyj:n kanssa muodostaen uuden yhtiön nimeltä Metso Outotec Oyj (Malinen;Sullström;Palomaa;& STT, 2019).

### 3 TAAJUUSMUUTTAJA

#### 3.1 Taajuusmuuttajien historia

Vaihtosähkön yleistyessä 1900-luvun vaihteessa nousi tarve säätää vaihtosähkömoottorien nopeutta. Aikaisimmat taajuusmuuttajat kehitettiin jo 1900-luvun alkupuolella säätämään moottorille syötetyn tehon taajuutta. Suuri läpimurto taajuusmuuttajateknologiassa saavutettiin 1950-luvulla, kun puolijohde-elektronikan kehitys mahdollisti transistoripohjaisten elektronisten taajuusmuuttajien valmistuksen, syrjäyttäen aiemmin käytössä olleet mekaanisilla komponenteilla toimivat taajuusmuuttajat. (Hughes, 1988; Blalock, 2007)

Taajuusmuuttajan suomalaiset juuret ulottuvat Martti Harmoisen Strömbergillä 1970-luvulla johtamaan tutkimusohjelmaan. Tutkimusohjelman tuloksena saatiin aikaan oikosulkumoottorin pyörimisnopeutta portaattomasti säätävä taajuusmuuttaja, jonka ensimmäisenä käyttökohteena toimi Helsingin metro. (Tekniikan Museo, 2021; ABB, ei pvm)

#### 3.2 Taajuusmuuttajan käyttötarve ja sähköinen toiminta

Taajuusmuuttajaa käytetään muuttamaan sähkömoottoreiden nopeutta. Tyypillisiä käyttökohteita ovat teollisuuden pumput, tuulettimet, sekoittimet, ilmastointijärjestelmät sekä kuljettimet, syöttimet ja hissit. Taajuusmuuttajan toimintaperiaate on muuntaa vaihtosähköä ensin tasasähköksi käyttäen diodisiltaa, jonka jälkeen tasasähkö muunnetaan vaihtosuuntaajapiirin avulla takaisin vaihtosähköksi eri taajuudella. Vaihtosuuntaajapiirissä käytetään erilaisia tyristoreita ja transistoreita halutun taajuuden saavuttamiseksi. (Blalock, 2007)

Yleisimmät välipiirilliset taajuusmuuttajapiirit ovat jännitevälipiirimuuttaja VSI sekä virtavälipiirimuuttaja CSI. Jännitevälipiirimuuttajassa käytetään vakiojännitettä muuttajan välipiirissä. Jännitevälipiirimuuttajan välipiirissä tasoitetaan vaihtojännite puhtaaksi tasajännitteeksi kondensaattorin avulla, joka toimii samalla energiavarastona. (Hietalahti, Tehoelektronikan perusteet, 2011, s. 90)

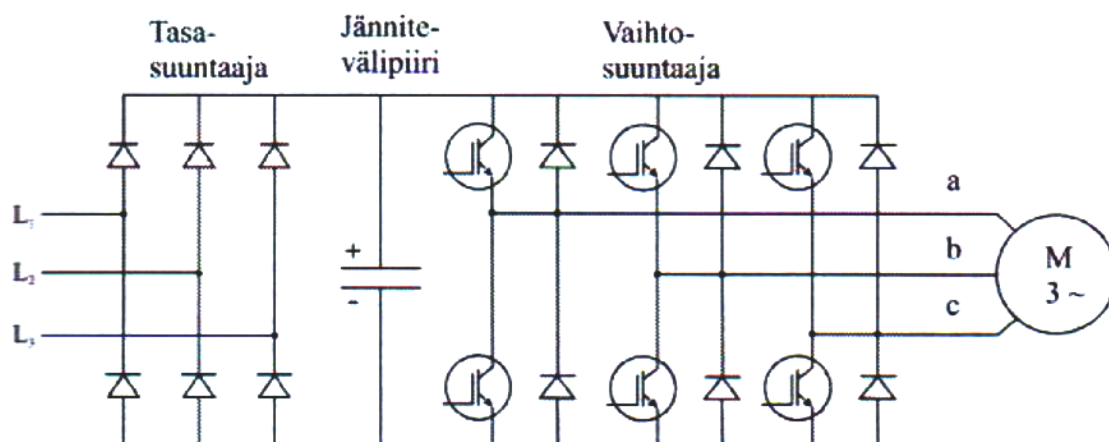
Virtavälipiirimuuttajan toiminta perustuu välipiirin virran tasoittamiseen. Virtavälipiirimuuttajan välipiiri sisältää kondensaattorin sijaan kuristimen, joka toimii energiavarastona ja tasoittaa virran aaltoisuutta. (Hietalahti, Tehoelektronikan perusteet, 2011, s. 95)

Virtavälipiirillisiä taajuusmuuttajia käytetään tyypillisesti suuritehoisissa järjestelmissä. Jännitevälipiirilliset taajuusmuuttajat soveltuvat paremmin dynaamisiin käyttöihin, joissa moottorin nopeus ja momentti muuttuvat nopeasti (Collins, 2016). Tässä työssä keskitytään jännitevälipiirillisiin taajuusmuuttajiin, sillä Plant solutions -liiketoimintayksikön taajuusmuuttajakäytöt ovat tyypillisesti dynaamisia käyttöjä.

Kuvan 1 tyypillinen jännitevälipiirillinen taajuusmuuttajakytkentä koostuu kuusipulssisesta dioditasasuuntaajasta, jännitevälipiirin suodatuksesta sekä tyristoreilla tai transistoreilla toteutetusta vaihtosuuntaajasta (Hietalahti, Tehoelektronikan perusteet, 2011, s. 91).

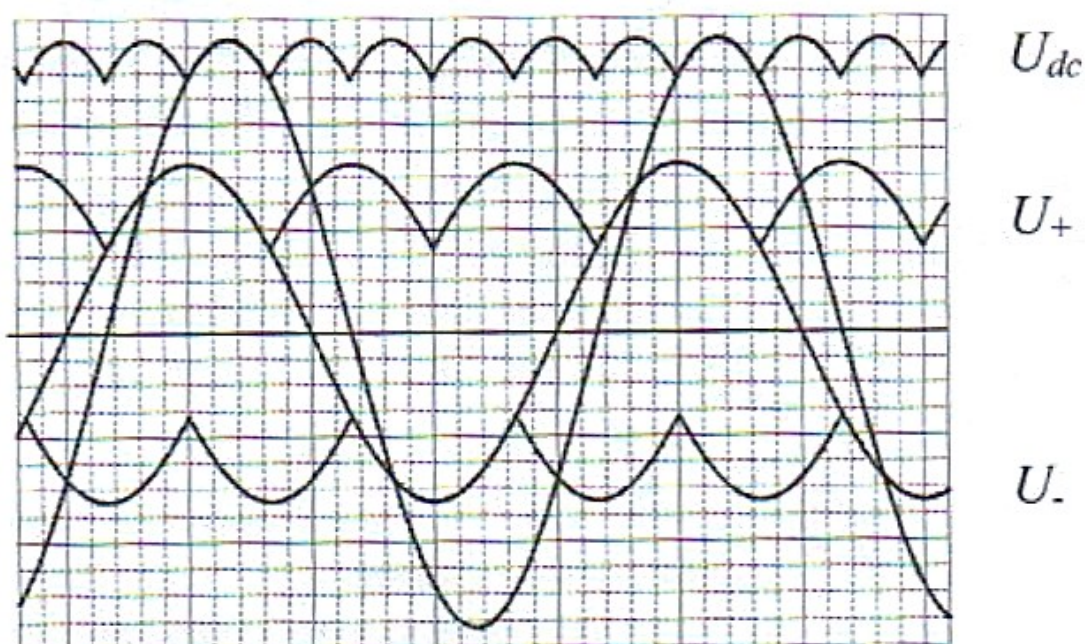
Tasasuuntaajapiiri voidaan toteuttaa myös lisäämällä piiriin useampi tasasuuntaajasilta, jolloin saadaan 12-, 18- tai 24-pulssinen tasasuuntaaja. Useamman sillan piireillä voidaan vähentää

tasasuuntaajasta johtuvia harmonisia yliaaltoja. Useampaan siltaan tarvitaan lisäksi erillinen muuntaja, jolloin järjestelmän koko sekä kokonaiskustannus kasvavat kuusipulssisiltaan verrattuna. (Collins, 2016)

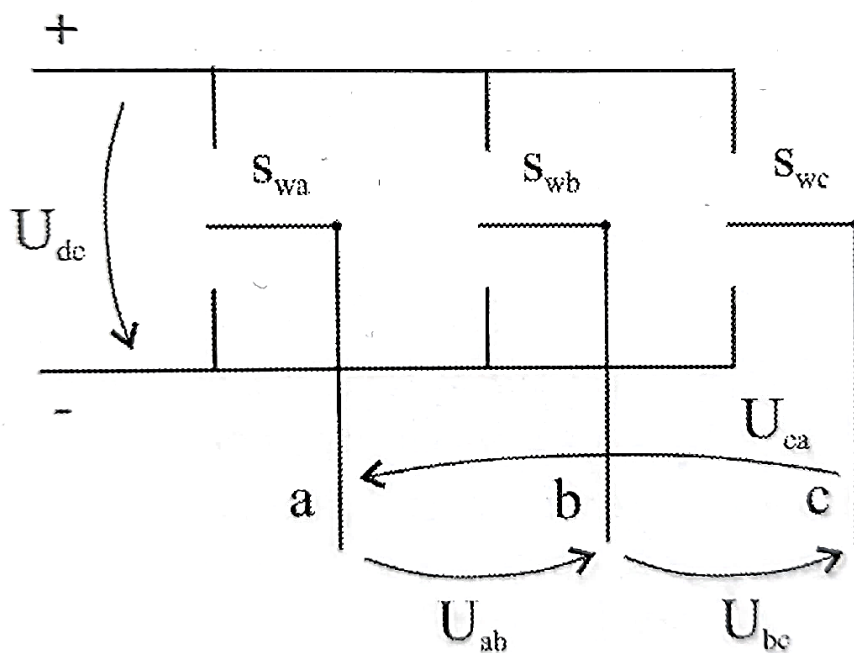


KUVA 1. Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan peruskytkentä (Hietalahti, Tehoelektronikan perusteet, 2011, s. 91)

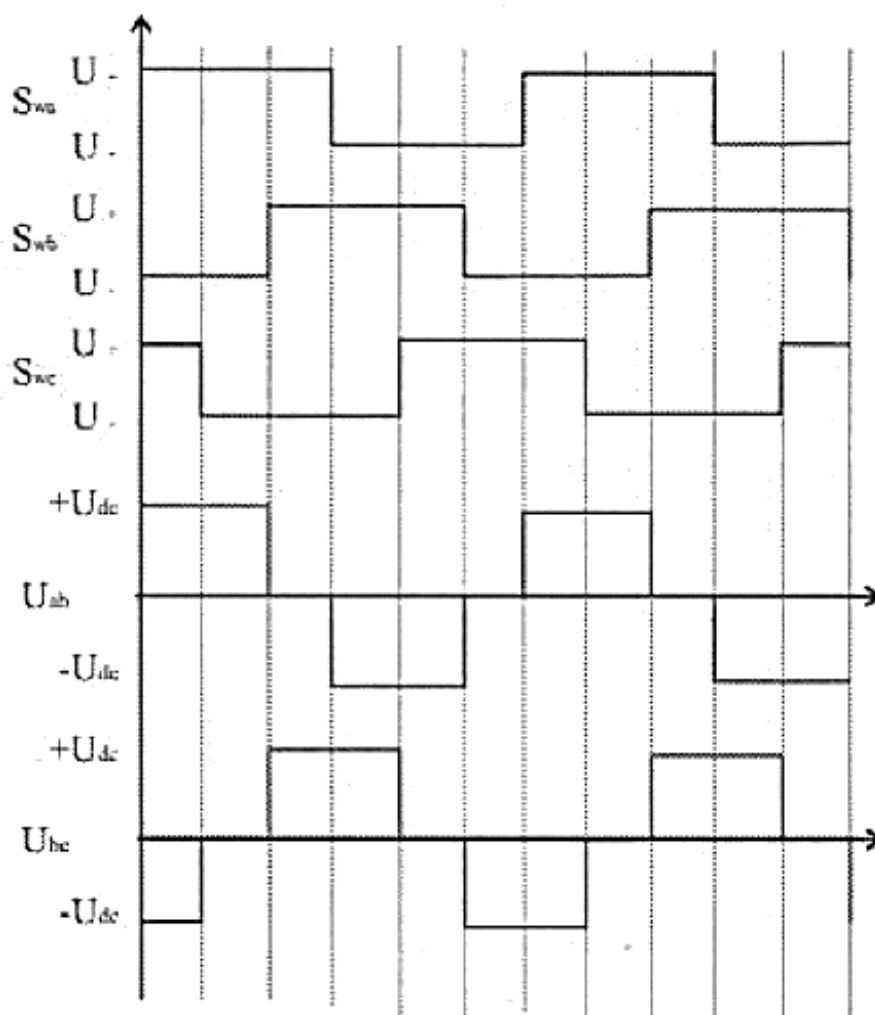
Kuvan 1 piirin alkupäässä kolmivaihesyöttö liitetään 6-pulssiseen dioditasasuuntaajaan, jonka kuusi diodia vuorotellen päästävät lävitseen jännitteen, muodostaen kuvan 2 mukaisen tasajännitteen  $U_{dc}$ . Tasajännitettä suodatetaan jännitevälipiirissä käyttäen kondensaattoria, kuristinta tai niiden yhdistelmää. Suodatuksessa käytetty kondensaattori varaa itseensä sähköenergiaa jännitteen noustessa ja purkaa sähköenergiaa jännitteen laskiessa tasoittaen kuvan 2 tasajännitteen  $U_{dc}$  aaltoisuutta (Haiko, 2014, s. 186).



KUVA 2. Kolmivaiheisen kuusipulssisen tasasuuntaajan muodostama tasajännite (Hietalahti, Tehoelektronikan perusteet, 2011, s. 44)



KUVA 3. Vaihtosuuntaajan kytkinmalli (Hietalahti, Tehoelektroniikan perusteet, 2011, s. 87)



KUVA 4. Vaihtosuuntaajan muodostama jännite (Hietalahti, Tehoelektroniikan perusteet, 2011, s. 87)

Jännitevälipiiristä tasajännite kulkeutuu tyristori- tai transistoriohjattuun vaihtosuuntaajaan, jossa kuvan 3 kytkinmalliksi mallinnetun vaihtosuuntaajan kytkimet vuorotellen ohjataan joko DC-piirin positiiviseen tai negatiiviseen napaan, muodostaen siniaaltoa jäljittelevää kanttiaaltoa. Kanttiaalto saadaan kytkentätaajuutta vaihtelemalla muodostamaan halutun taajuista vaihtojännitettä. Kuvassa 4 nähdään, miten kolmea kytkintä käyttämällä saadaan muodostettua vaiheiden a, b ja c välille siniaaltoa jäljittelevät kanttiaaltomuotoiset jännitteet  $U_{ab}$  ja  $U_{bc}$ . (Hietalahti, Tehoelektroniikan perusteet, 2011, s. 87)

### 3.3 Taajuusmuuttajat Minerals Plant Solutions -liiketoimintayksikössä

Plant Solutions -liiketoimintayksikkö keskittyy metallurgia-, rikastamo- ja prosessilaitosten teknologian suunnitteluun ja toimitukseen. Suurin osa Plant Solutions -liiketoimintayksikön toimittamista taajuusmuuttajakäytöstä ovat pienjännitteellä toimivia pumppuja ja puhaltimia. Tämän lisäksi projekteissa esiintyy sekoittimia sekä muutamia nostureita, kuljettimia ja syöttimiä. Laitteet on hyvä valita samasta laitesarjasta suunnitteluprosessin, laitteen elinkaaren hallinnan ja varaosavalikoiman saatavuuden helpottamiseksi.

## 4 VERTAILUN KRITEERIT

Vertailun kohteena olevat tekniset ominaisuudet voidaan karkeasti jakaa kolmeen alakategoriaan: käytön toiminnan kannalta välttämättömiin, käyttökohdekohtaisiin sekä sähkö- ja automaatio suunnittelun tarpeisiin.

### 4.1 Käytön toiminnallisuuden vaatimukset

Toiminnallisuuden kannalta tärkeimmät tekijät ovat sopivan jännitetason saatavuus, kaapeleiden pituuteen ja jännitteen nousunopeuteen vaikuttavat tekijät sekä sähköverkkoon liittyvät kysymykset, kuten moottorin ja toimintaympäristön kannalta haitallisten harmonisten yliaaltojen ja sähkömagneettisten häiriöiden määrä ja kompensointi.

Moottorille haitallisten jännitepiikkien ja jännitteen nousunopeuden pienentämiseen käytetään  $dU/dt$ -suodattimia. Siniaaltosuodattimia käytetään taajuusmuuttajalta moottorille syötetyn jännitteen suodattamisessa. Siniaaltosuodatin on käytännössä LC-alipäästösuoodin, joka päästää läpi määriteltyä rajataajuutta matalammat signaalit ja vaimentaa rajataajuutta korkeammat signaalit. Suodatin leikkaa taajuusmuuttajan syöttämästä kanttiaallosta moottorin syöttötaajuutta suuremmat yliaallot pois, jolloin aallosta muodostuu sinimuotoista. Siniaaltosuodattimet myös mahdollistavat pitkät moottorikaapeloinnit. Siniaalto- ja  $dU/dt$ -suodattimia käyttämällä ehkäistään moottorin eristyksen ja laakereihin kohdistuvaa rasitusta. (Schaffner, 2012; Danfoss, ei pvm; Danfoss; All About Circuits, ei pvm)

Kaapeleiden kuormitettavuuteen ja sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen vaikuttavat kuristimet, kondensaattorit sekä EMC-suodattimet. Kuristimia voidaan käyttää kolmessa pisteessä, jotka ovat syöttävän verkon puolelle asetettu AC-kuristin, DC-jännitevälipiiriin sijoitettu kuristin sekä taajuusmuuttajan ja moottorin väliin sijoitettu AC-kuristin. Mikäli taajuusmuuttajassa on DC-välipiirin kuristin, on syöttävän verkon puolelle sijoitettu kuristin usein tarpeeton.

IEC 61800-3 -standardissa EMC-suodattimet on luokiteltu kahteen pääympäristöön asennettavaksi. Ensimmäinen pääympäristö sisältää pienjännitteellisen jakeluverkon syöttämät asuinrakennukset ja toimistotilat. Toinen pääympäristö kattaa kaiken paitsi ensimmäisen pääympäristön käyttökohteet. Toisen pääympäristön kohteita ovat esimerkiksi teollisuusalueet ja erillisen muuntajan syöttämät rakennukset. Lisäksi pääympäristöt on jaettu neljään alakategoriaan, jotka ovat C1, C2, C3 ja C4. Alakategoria C1 on tarkoitettu ensimmäisen pääympäristön laitteille, eikä ole soveltuva vaihtoehto teollisuusalueille asennettaville taajuusmuuttajille. Kategorioiden C2, C3 ja C4 laitteita voidaan asentaa toiseen pääympäristöön, joten ne soveltuvat teollisuuslaitoksiin asennettaville taajuusmuuttajille. (VACON)

#### 4.1.1 Jännite- ja tehovaihtoehdot

Käytön kannalta merkittävimmät tekijät ovat saatavilla olevien laitteiden jännitetasot ja nimellistehot. Vertailussa keskitytään pienjännitetaajuusmuuttajiin. Moottoreita käytetään ympäri maailman erilaisilla jännitteillä, joista yleisimmät jännitealueet ovat 380-415 VAC, 660-690 VAC ja 500 VAC (ABB, 2019). Myös taajuusmuuttajan täytyy olla käytettävissä näillä kaikilla jännitealueilla.

Metso Outotecin suunnittelemat prosessit tarvitsevat sähkömoottoreita, joiden nimellistehot vaihtelevat alle yhdestä kilowatista jopa satoihin kilowatteihin, joten taajuusmuuttajakin on oltava saatavilla jokaiselle prosessin laitteelle riippumatta tehosta.

Tyypillisesti taajuusmuuttajat valitaan seinämällisinä tai modulaarisina, eli kolmannen osapuolen keskusvalmistajan keskuksiin tai seinälle asennettavina. Poikkeuksena tyypillisesti yli 250 kW:n taajuusmuuttajat tilataan valmiiksi kaappiin asennettuna toimittajalta.

#### 4.1.2 Moottorin ja sähköverkon vaatimukset

Taajuusmuuttajakäytöt aiheuttavat verkkoon yliaaltoja, jotka voivat aiheuttaa ylimääräisiä häviöitä ja lämpenemää komponenteissa sekä piikkimäisiä ylijännitteitä aiheuttavia resonanssitilanteita. Haittavaikutuksia voidaan vähentää erilaisilla suodattimilla. (Hietalahti, Tehoelektroniikan perusteet, 2011, s. 55; Sähköinfo Oy, 2018)

Taajuusmuuttajien aiheuttamien harmonisten yliaaltojen kokonaismäärää voidaan vähentää sijoittamalla kuristin taajuusmuuttajan syötön puolelle tai taajuusmuuttajan DC-välipiiriin diodisillan ja vaihtosuuntaajan väliin. Moottoripiirin häiriöitä saadaan suodatettua sijoittamalla suodatin taajuusmuuttajan ja moottorin väliselle kaapeliosuudelle. (ABB)

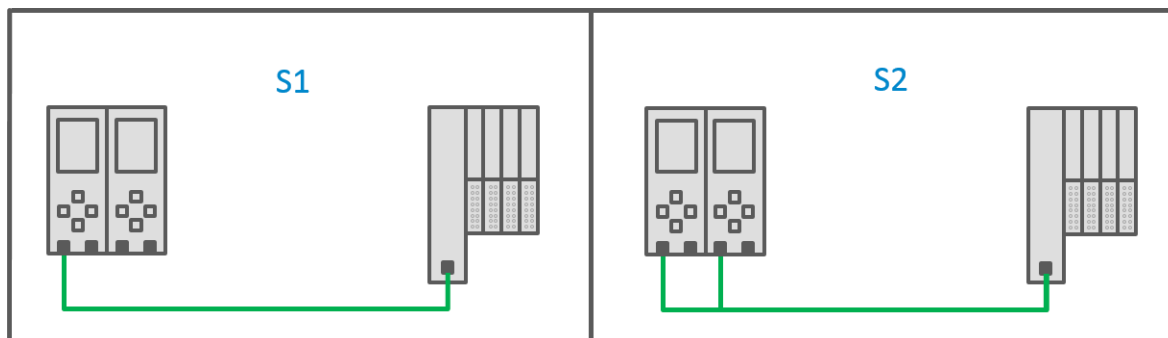
#### 4.2 Käyttökohtaiset tarpeet

Käyttökohtaisia tarpeita ovat mekaaninen sopivuus kolmannen osapuolen keskustoimittajan valmistamiin moottorilähtökeskuksiin, oikea väylätyyppi automaatiojärjestelmän kommunikointiin sekä mahdollisten erikoissovellusten toteutettavuus, kuten kahden moottorin ohjaus samalla taajuusmuuttajalla.

Mekaanisen sopivuuden kannalta tärkeä tieto on seinämällisten, myös keskusasennukseen sopivien taajuusmuuttajien saatavilla oleva tehoalue. Myös tuulettimien sijainnilla ja niiden puhallussuunnalla on merkitystä moottorihjauskeskuksen ilmanvaihdon toimivuuden kannalta.

#### 4.2.1 Väyläkommunikaatio

Automaatioliityntään käytetään Plant solutions -liiketoimintayksikössä useimmiten Profinet-väylätyyppejä, jonka lisäksi redundanttisissa järjestelmissä suositaan S2-konfiguraatiota väyläliitynnässä. Kuten kuvassa 5 nähdään, S1-konfiguraatio tarkoittaa peruskonfiguraatiota, jossa yksi laite on yhdistetty yhteen verkkoliityntään. S2-konfiguraatio mahdollistaa useamman laitteen yhdistämisen yhteen verkkoliityntään. Tällä voidaan varmistaa kommunikoinnin jatkuvuus mahdollisessa kytkentäpisteen vikatilanteessa, kytkemällä kommunikointi saumattomasti toiselle kytkentäpisteelle. (Siemens, 2018; Profinet University, ei pvm)



KUVA 5. S1- ja S2-väyläkonfiguraatiot (Profinet University, ei pvm)

#### 4.2.2 IP-luokka

IEC 60529 -standardin mukaan sähkölaitteiden tiiviys määritellään IP-luokkiin. IP-luokka koostuu kahdesta numerosta. Ensimmäinen kertoo kosketus- ja pölysuojauksen tason asteikolla 0-6, jossa nolla tarkoittaa suojaamatonta ja kuusi pölysuojaukselta. Toinen numero kertoo suojauksen vettä vastaan asteikolla 0-9, jossa nolla tarkoittaa suojaamatonta ja yhdeksän suojausta useasta eri kulmasta tulevalta kovapaineiselta kuumalta vedeltä. (International Electrotechnical Commission, ei pvm)

Seinä- tai keskusasennukseen soveltuvat laitteet ovat yleensä IP-luokaltaan joko IP00 tai IP21. IP-luokituksen IP00 saaneen laitteen sähköiset osat eivät ole suojattuja kosketukselta tai vedeltä. IP21-luokituksen saaneiden laitteiden sähköiset osat on suojattu halkaisijaltaan yli 12,5 millimetrisiltä esineiltä ja suoraan ylhäältä putoavilta vesipisaroilta.

#### 4.2.3 Jarrukatkoja

Jarruvastuksia tarvitaan taajuusmuuttajakäytöissä raskaiden taakkojen jarruttamisessa ja moottorin pysäyttämässä tarkkaan sijaintiin. Vastusjarrutuksessa käytetään jarrukatkoja. Jarrukatkoja rajoittaa DC-välipiirin liiallista nousua ohjaamalla jarrutusenergian jarruvastukseen, joka muuntaa jarrutusenergian lämmöksi. Jarruvastuksen avulla voidaan jarruttaa moottoria häviöitä suuremmalla teholla esimerkiksi hätäpysäytyksissä. Jarrukatkoja ohjaa jännitteen jarruvastuksen läpi DC-välipiirin jännitteen ylittäessä tietyn rajan. (Hietalahti, Teollisuuden sähkökäytöt, 2013, s. 75; ABB, ei pvm)

#### 4.3 Sähkö- ja automaatio suunnittelun tarpeet

Sähkösuunnittelun kannalta tärkeitä tarpeita ovat parametroidin ja piirustusten aiheuttamat muutokset suunnitteluprosessiin. Tämän lisäksi tärkeitä selvityskohteita ovat laitteiden mukana tulevat vakio-ominaisuudet ja saatavilla olevat lisäominaisuudet.

Prosessilaitteissa tulee olla mahdollisuus ohjata laitetta joko PLC:n tai paikallisohjaukskytkimien kautta. Ohjaustapa tulee voida vaihtaa I/O-pisteisiin liitettyjen kytkimien ja väylään liitetyn PLC:n välillä käyttäen ohjaussanaa.

## 5 TEKNINEN VERTAILU

Teknisessä vertailussa käydään läpi laitetoimittajien laitteiden vakio-ominaisuudet sekä saatavilla olevat lisäominaisuudet. Lisäksi vertaillaan laitteiden ohjelmoitavuutta ja parametrintia sekä integroitavuutta moottorihjauskeskuksiin. Eri toimittajiin viitataan tunnisteella A-D kaupallisten tietojen, yrityskohtaisten alennusten ja sopimusten salassapidon vuoksi. Tiedot ovat peräisin toimittajien kanssa käydyistä keskusteluista sekä teknisistä materiaaleista kuten datalehdistä, käyttöoppaista ja esitteistä.

### 5.1 Jännitteet ja tehoalueet

Kaikilta laitetoimittajilta on saatavilla nimellisjännitteeltään 400 VAC, 500 VAC ja 690 VAC olevia kaappiasennukseen soveltuvia seinämällin taajuusmuuttajia. Laitteiden jännitetasot vaihtelevat toimittajakohtaisesti, ja joissakin tapauksissa useampi jännitetaso on yhdistetty samaan laitteeseen.

Toimittaja A:lla on saatavilla 400 VAC jännitetasolle valitussa laitesarjassa laitteita nimellisteholtaan 0,75 kilowatista 250 kilowattiin, jota suuremmat taajuusmuuttajat on valittava valmiiksi kaappiin asennetusta laitesarjasta. Toimittajalla on eroteltu 500 VAC ja 690 VAC erillisiksi jännitetasoiksi. Näillä jännitetasoilla laitteita on saatavilla nimellisteholtaan 0,75 kilowatista 250 kilowattiin.

Toimittaja B on yhdistänyt samaan laitesarjaan jännitetasot 400 VAC ja 500 VAC. Laitesarjan laitteita on saatavilla 1,1 kilowatista 200 kilowattiin asti kaappiasennukseen soveltuvana. Nimellisteholtaan suuremmat laitteet on valittava valmiiksi kaappeihin asennettuina, joita on saatavilla 200 kilowatista 630 kilowattiin. Toimittajalta on saatavilla 690 VAC jännitetasolle laitteita 5,5 kilowatista 800 kilowattiin, joista 250 kilowattia suuremmat tehot on valittava valmiiksi kaappeihin asennettuina.

Toimittaja C:llä jännitetason 400 VAC laitteita on saatavilla kahdessa laitesarjassa. Ensimmäisen laitesarjan laitteita on saatavilla 0,55 kilowatista 132 kilowattiin, jota suurempitehoiset taajuusmuuttajat on otettava toisesta laitesarjasta, jota on saatavilla teho-osasta ja ohjausosasta koostuvana modulaarisena pakettina. Toisen sarjan laitteita on saatavilla 0,55 kilowatista 250 kilowattiin, mutta toisen laitesarjan taajuusmuuttajat ovat ensimmäisen sarjan laitteita hieman kalliimpia. Toisen laitesarjan taajuusmuuttajia voidaan eri tehomoduliin vaihtamalla käyttää myös 500 VAC tai 690 VAC jännitetasoilla nimellistehoiltaan 11 kilowatista 250 kilowattiin.

Toimittaja D:llä jännitetason 400 VAC laitteita on saatavilla 0,75 kilowatista 315 kilowattiin. Toimittajalta löytyy yhdistetty laitesarja 500 VAC ja 690 VAC jännitetasoille, jota on saatavilla 2,2 kilowatista 90 kilowattiin. Nimellisteholtaan suuremmat laitteet on tilattava valmiiksi kaappiin asennettuna versiona 1200 kilowattiin asti.

### 5.2 Taajuusmuuttajien ominaisuudet

Vertailun kohteeksi valittujen taajuusmuuttajalaitesarjojen vakio-ominaisuudet kirjattiin ylös taulukkoon 1. Taulukkoon 2 kirjattiin ylös taajuusmuuttajalta vaaditut tai käyttökohtaiset lisäominaisuudet. Taulukkojen ensimmäisessä sarakkeessa on listattuna ominaisuus, ja sarakkeissa 2-4 on listattuna laitetoimittajat järjestyksessä. Toimittajien alla on ominaisuuksien saatavuus vakiona merkittyinä joko X-kirjaimella tai tietyistä tehosta ylös- tai alaspäin.

TAULUKKO 1. Seinämallisten taajuusmuuttajien vakio-ominaisuudet

<b>Vakio-ominaisuudet</b>				
Ominaisuus	Toimittaja A	Toimittaja B	Toimittaja C	Toimittaja D
STO (Safe Torque Off)	X		X	X
Syötön jännitevalvonta	X	X	X	X
PTC-tulo	X	X	X	X
Jarrukatkoja		> 37 kW	X	< 90 kW
EMC-filtteri		X		X
DC-kuristin	X	X	> 22 kW	X
Elektrolyyttikondensaattorit	X		X	X
Kalvokondensaattorit		X		
PROFINET	X	X	X	
PROFINET S2				
Kahden moottorin ohjaus	X	X <sup>1</sup>	X <sup>2</sup>	X

<sup>1</sup>: saatavilla vain droop-toiminnolla, <sup>2</sup>: saatavilla vain modulaarisen sarjan laitteissa

TAULUKKO 2. Seinämallisten taajuusmuuttajien lisäominaisuudet

<b>Lisäominaisuudet</b>				
Ominaisuus	Toimittaja A	Toimittaja B	Toimittaja C	Toimittaja D
STO (Safe Torque Off)		X		
PTC/PT100-lisäkortti	X	X		
Jarrukatkoja	> 37 kW			> 90 kW
EMC-filtteri	X		X	
Syötön AC-kuristin			< 22 kW	
PROFINET				X
PROFINET S2	X	X	X	X
dU/dt-filtteri	X	X	X	X
Sinifiltteri	X	X	X	X
Yliaaltojen laskentatyökalu	X	X	X	X

### 5.2.1 Safe Torque Off

Toimittajien A, C ja D laitteissa on vakiona Safe Torque Off -toiminto, jolla estetään moottoria tuottamasta momenttia. Toimittajan B laitteissa ei ole toimintoa vakiona, mutta toimittajan laitteisiin on valittavissa lisäominaisuutena kortti, joka sisältää useamman turvatoiminnon.

### 5.2.2 Syötön jännitevalvonta

Syötön jännitevalvonta on vakiona kaikkien toimittajien laitteissa. Jännitevalvonta on toteutettu laitteissa yleisimmin DC-välipiirissä. Toimittajien A ja D laitteissa syöttöjännite saa vaihdella -15...+10 % välillä nimellisestä. Toimittajien B ja C laitteissa vastaava syöttöjännitteen toleranssi on  $\pm 10$  %. Kaikilla valmistajilla vaihekohtainen jännite-ero saa olla enintään  $\pm 3$  %.

### 5.2.3 Jarrukatkoja

Toimittaja C:n kaikissa vertailun kohteena olevissa laitteissa on vakiona jarrukatkoja. Toimittaja B:n nimellisteholtaan 37 kW ylittävät ja toimittaja D:n alle 90 kW laitteet sisältävät vakiovarusteena jarrukatkojan. Toimittaja A:n nimellisteholtaan 37 kW ylittäviin laitteisiin ja toimittaja D:n nimellisteholtaan 90 kW ylittäviin laitteisiin on lisäominaisuutena saatavilla jarrukatkoja.

### 5.2.4 PTC-, PT100- ja PT1000-anturit

Kaikkien toimittajien laitteissa on vakiona tulo PTC-anturille. Toimittajan C laitteisiin voi kytkeä myös PT1000-anturin. Toimittajan D laitteisiin voi kytkeä PTC-, PT100- tai PT1000-anturin.

Toimittajan A laitteissa PTC-anturin voi kytkeä digitaalituloon. Tuloa ei ole galvaanisesti erotettu, joten vikatilanteessa vaihejännite voi kytkeytyä termistorin kautta muille tuloille. Jos termistori kytketään digitaalituloon, ei muihin tuloihin voida kytkeä mitään. Myöskään toimittajien B, C ja D termistoritulot eivät ole galvaanisesti erotettuja. Toimittajien A ja B laitteisiin on saatavilla erillinen galvaanisesti erotettu termistorikortti. Toimittajien C ja D laitteisiin ei ole saatavilla erillistä galvaanisesti erotettua korttia, mutta toimittajien laitteissa voidaan tarvittaessa käyttää ulkoista termistorirelettä.

### 5.2.5 EMC-suodattimet

EMC-suodattimia on saatavilla vakiona yleensä kategorian C2 tai C3 laitteina. IT-verkkoon soveltuvat EMC-suodattimet ovat valittavissa lisäominaisuutena tai poistamalla maadoitusliitos toimittajasta riippuen. EMC-suodatin on vakio-ominaisuutena toimittajien B ja D laitteissa.

Toimittaja B:n seinälle tai keskukseen asennettavissa 380-500 VAC laitteissa toimitettava vakiosuodatin kuuluu asennuskategoriaan C2. Toimittaja B:n IP00-luokituksen sekä 690 VAC seinä- tai keskusasennukseen soveltuvissa laitteissa on kategorian C3 EMC-suodatin vakiona.

Toimittaja D:n seinä- tai keskusasennukseen soveltuvissa nimellisteholtaan alle 45 kW:n laitteissa on vakiona kategorian C2 EMC-suodatin. Toimittajan nimellisteholtaan yli 45 kW:n laitteissa on vakiona kategorian C3 EMC-suodatin. Toimittajan 500-690 VAC jännitealueen laitteissa on vakiona kategorian C3 EMC-suodatin.

Toimittajien A ja C laitteissa ei ole vakiona EMC-suodatinta. Toimittajien laitteisiin on valittavissa lisäominaisuutena EMC-suodatin. Toimittajien A ja C lisäominaisuutena tilattavat EMC-suodattimet kuuluvat kategoriaan C3.

### 5.2.6 Kuristimet

Kaikkien toimittajien laitteisiin on saatavilla syötön DC-kuristin. Toimittaja C:llä kuristin on vakiona nimellisteholtaan yli 22 kW:n laitteissa. Toimittaja C:n nimellisteholtaan alle 22 kW:n laitteisiin on saatavilla lisäominaisuutena syötön puolen kuristin.

### 5.2.7 Kondensaattorit

Toimittajien A, C ja D laitteet sisältämät kondensaattorit ovat tyypiltään elektrolyyttikondensaattoreita. Toimittajien A ja D mukaan kondensaattoreiden vaihtoväli on 12 vuotta. Toimittaja C:n mukaan laitteiden elektrolyyttikondensaattorit kestävät laitteen eliniän.

Toimittaja B:n laitteiden kondensaattorit ovat tyypiltään kalvokondensaattoreita. Kalvokondensaattorit ovat pitkäikäisempiä, eivätkä sisällä haitallista jätettä verrattuna elektrolyyttikondensaattoreihin. Kalvokondensaattoreilla on myös parempi hyötysuhde verrattuna elektrolyyttikondensaattoreihin. Kalvokondensaattorit ovat kuitenkin kalliimpia ja kooltaan suurempia vastaavaan elektrolyyttikondensaattoriin verrattuna. (Ramos, 2018; Albertsen, 2015)

### 5.2.8 Väylät

Toimittajien A, B ja C laitteissa on vakiona tuki Profinet-väylätyypille. Toimittaja D:n laitteisiin on mahdollisuus tilata lisäominaisuutena Profinet-väyläkortti. S2-konfiguraatio on mahdollinen toimittajien A ja B laitteissa erillisen väyläkortin tai kytkimen avulla. Toimittajien C ja D laitteita voidaan käyttää S2-järjestelmässä kytkimen avulla, mutta itse laitteet eivät tue S2-konfiguraatiota.

### 5.2.9 Ohjaustavan vaihtaminen

Toimittaja A:lla ohjaustavan vaihtaminen I/O-pisteiden ja väylän välillä tapahtuu määrittämällä I/O-pisteet ja väyläohjaus erillisiksi ohjauspisteiksi. Ohjauspisteen vaihtaminen tapahtuu ohjaamalla ohjaustavan parametriaarvoa käyttäjän määrittelemän ohjaussanan bitin tai digitaalitulon kautta.

Toimittaja B:llä ohjaustavan vaihtaminen tapahtuu ohjaamalla ohjaustavan parametriaarvoa. Ohjaustapa saadaan valittua käyttäjän määrittelemän bitin kautta.

Toimittaja C:llä väyläohjaus ja I/O-ohjaus rakennetaan erillisiksi ohjauspisteiksi ja ohjaustavan vaihto tapahtuu vakiona ohjaussanalla. Ohjaustavan vaihto voidaan myös määrittää tarvittaessa digitaalitulon kautta.

Toimittaja D:llä ohjaustavan valinta tapahtuu määrittämällä I/O-pisteet ja väyläohjaus erillisiksi ohjauspisteiksi. Ohjauspisteen vaihtaminen tapahtuu ohjaamalla ohjaustavan parametriaarvoa käyttäjän määrittelemän ohjaussanan bitin tai digitaalitulon kautta.

### 5.2.10 Siniaalto- ja dU/dt-suodattimet

Siniaalto- ja dU/dt-suodattimia ei ole vakiona toimittajien taajuusmuuttajissa, sillä ne eivät ole välttämättömiä kaikille teho- tai jännitetasoille. Siniaalto- ja dU/dt-suodattimia voi tilata lisäominaisuutena kaikkien toimittajien laitteisiin.

### 5.2.11 Kahden taajuusmuuttajan ohjaus

Master-follower-ohjaus, eli kahden tai useamman taajuusmuuttajan synkronoitu ohjaus mahdollistaa useamman moottorin ohjaamisen nopeuden tai position perusteella (Bullick, 2018). Master-follower-ohjaus on saatavilla vakiona toimittajien A ja D laitteissa. Toimittaja B:n laitteet eivät sisällä varsinaista master-follower-ohjausta, mutta laitteissa on droop-toiminto, jolla voidaan jakaa kuormaa useamman moottorin kesken. Toimittaja C:n laitteissa toiminto on saatavilla vain modulaarisen sarjan laitteissa droop-toiminnon avulla.

### 5.3 Taajuusmuuttajien moottorikaapelin maksimipituus

Toimittajat ovat määritelleet maksimipituudet taajuusmuuttajien moottorikaapeleille. Rajoitus perustuu kaapelin kapasitanssin latausvirran suhteeseen taajuusmuuttajan nimellisvirrasta. Pidemmällä etäisyyksillä kaapelin kapasitanssi kasvaa, jolloin myös kapasitanssin latausvirta kasvaa. Kun latausvirta kasvaa tarpeeksi suureksi suhteessa taajuusmuuttajan nimellisvirtaan, alkaa oikosulkusuojaus toimimaan virheellisesti ja moottorisäätöön aiheutuu häiriöitä. Pidemmät moottorikaapeloinnit voidaan saavuttaa lisäämällä moottoriin joko siniaaltosuodatin tai ylimitoittamalla taajuusmuuttaja.

Toimittaja A:lla kaapeleiden ilmoitettu maksimipituus on nimellistehoaltaan alle 18,5 kilowatin laitteille 150 metriä ja sitä suuremmilla tehoilla 300 metriä. Toimittaja B:n laitteissa ilmoitettu maksimipituus on 100 metriä alle 5,5 kW laitteissa, 150 metriä 5,6-30 kW:n laitteissa ja 200 metriä yli 30 kW:n laitteissa. Toimittaja C:n laitteissa ilmoitettu maksimipituus on alle 22 kilowatin laitteilla lisäkurstimen avulla 150 metriä ja sitä suuremmilla tehoilla 200-300 metriä. Toimittaja D:n ilmoitettu maksimipituus on kategorian C2 EMC-suodattimella 50 metriä ja kategorian C3 EMC-suodattimella 150 metriä. Kaikkien toimittajien moottorikaapeleiden maksimipituudet on ilmoitettu 400 V jännitteellä ja tehot nimelliskäytön mukaisina.

### 5.4 Ohjelmistot

Ohjelmointia ja parametointia varten jokaisella toimittajalla on oma ohjelmistonsa. Laitekohtaisilla ohjelmistoilla voidaan kommunikoida väylän kautta ohjelmoitavien laitteiden kanssa. Kaikkien toimittajien laitteissa on tuki Profinet-väylälle.

Harmonisten yliaaltojen laskennalla arvioidaan taajuusmuuttajien aiheuttamien yliaaltojen verkkovaikutuksia. Harmonisten yliaaltojen laskenta on mahdollista erillisellä ohjelmistolla. Jokaisella vertailtavalla toimittajalla on käytössä oma laskentaohjelmisto harmonisten yliaaltojen laskentaan.

### 5.5 Yhteenveto

Taajuusmuuttajilta vaaditut tekniset ominaisuudet ovat saatavilla kaikkien laitetoimittajien laitteisiin joko vakiona tai lisäominaisuutena. Poikkeuksena saatavuuteen on Profinet S2-konfiguraatio, johon toimittajat A ja B pystyvät erikseen tilattavan lisäkortin avulla. Toimittajien C ja D laitteet eivät tue S2-konfiguraatiota, mutta niitä voidaan käyttää S2-järjestelmässä kytkimen avulla.

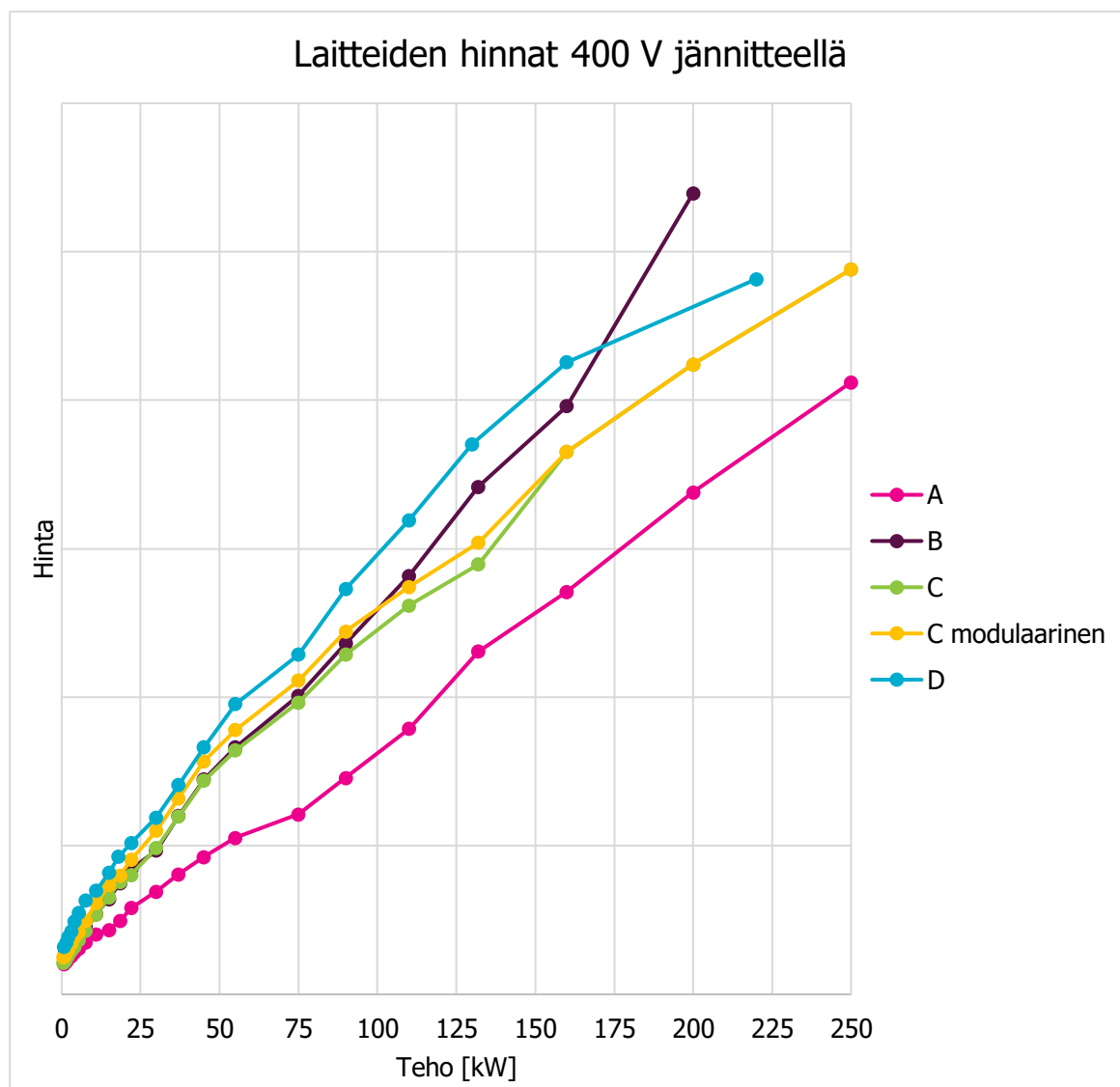
Laitteiden parametrintiin on jokaisella toimittajalla oma ohjelmistoratkaisunsa. Sähkösuunnitteluun integroimisessa on otettava huomioon uuteen järjestelmään tutustuminen käyttöönoton yhteydessä. Kaikkien toimittajien laitteissa on tuki Profinet-väylälle.

## 6 KAUPALLINEN VERTAILU

Kaupallisessa vertailussa käydään läpi laitetoimittajien laitteiden hinnat jännitetasoilla 400 V, 500 V ja 690 V. Vertailun kohteena olevien laitteiden ominaisuudet valitaan mahdollisimman samanlaisiksi. Yksittäisten toimittajien vakio-ominaisuuksia, joita tilaajan prosessilaitteissa harvoin käytetään ei lisätä vertailtaviin laitteisiin. Laitteiden hintavertailu koostuu peruslaitteesta, EMC-suodattimesta, ohjauspaneelista, DC-kuristimesta ja Profinet väyläliitännästä. Osalla toimittajista on laitteissaan vakiona jarrukatkoja, joka ei ole välttämätön toiminnan kannalta ja saattaa nostaa hintaa muihin toimittajiin nähden.

### 6.1 Laitteiston kustannus 400 V jännitteellä

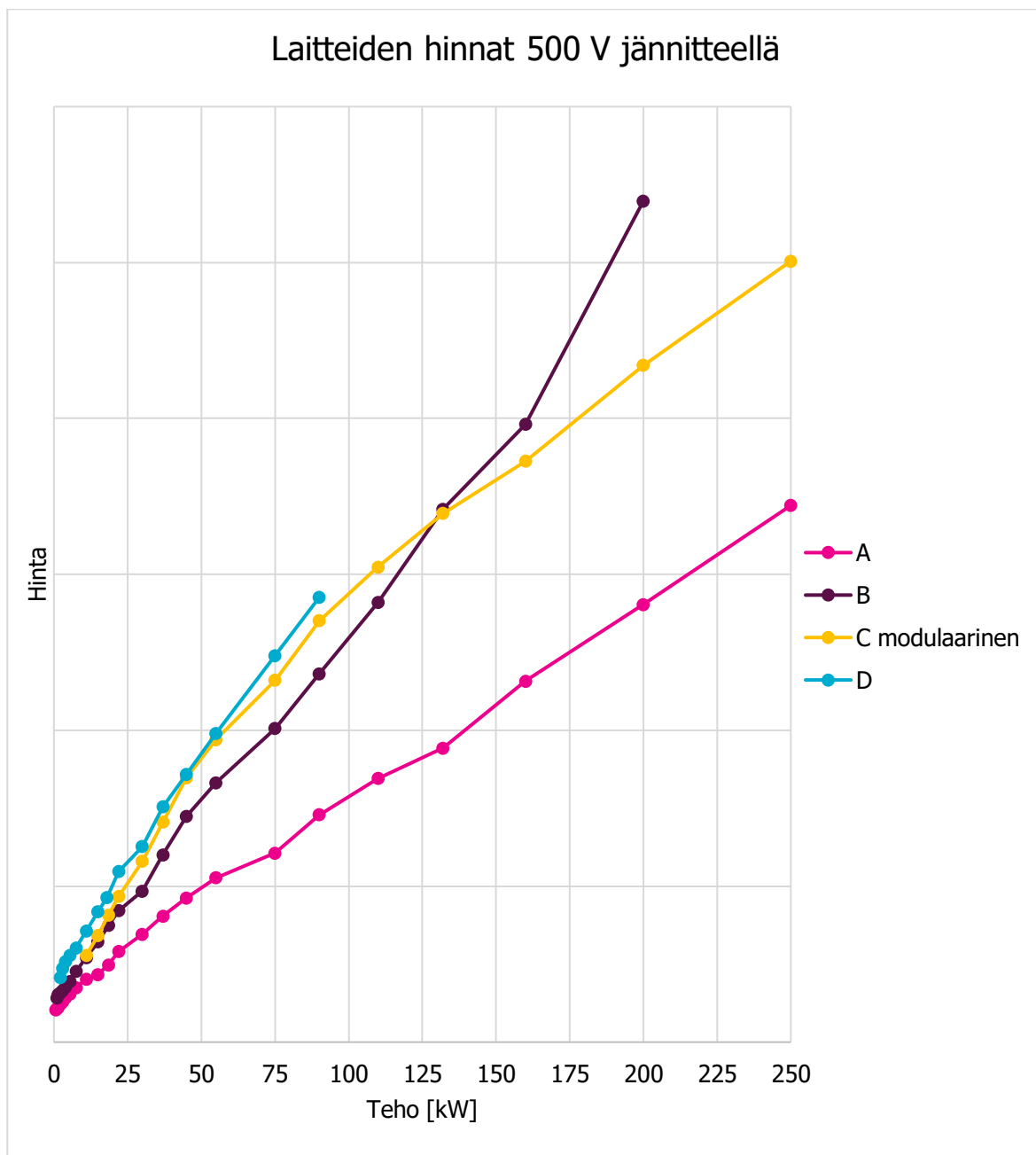
Kuvassa 6 nähdään laitteiden suhteellinen hinta eri nimellistehoilla 400 V jännitteellä. Toimittaja A:n laitteet ovat 400 V jännitetasolla halvimmat. Toimittajat B, C ja D ovat keskenään samaa hintaluokkaa, mutta suuremmille tehoille mentäessä toimittajien B ja D laitteiden hinnat ovat muiden toimittajien laitteita korkeampia. Toimittaja D:n laitteiden hinnat ovat kaikista toimittajista korkeimmat.



KUVA 6. Laitteiden hinnat 400 V jännitteellä

## 6.2 Laitteiston kustannus 500 V jännitteellä

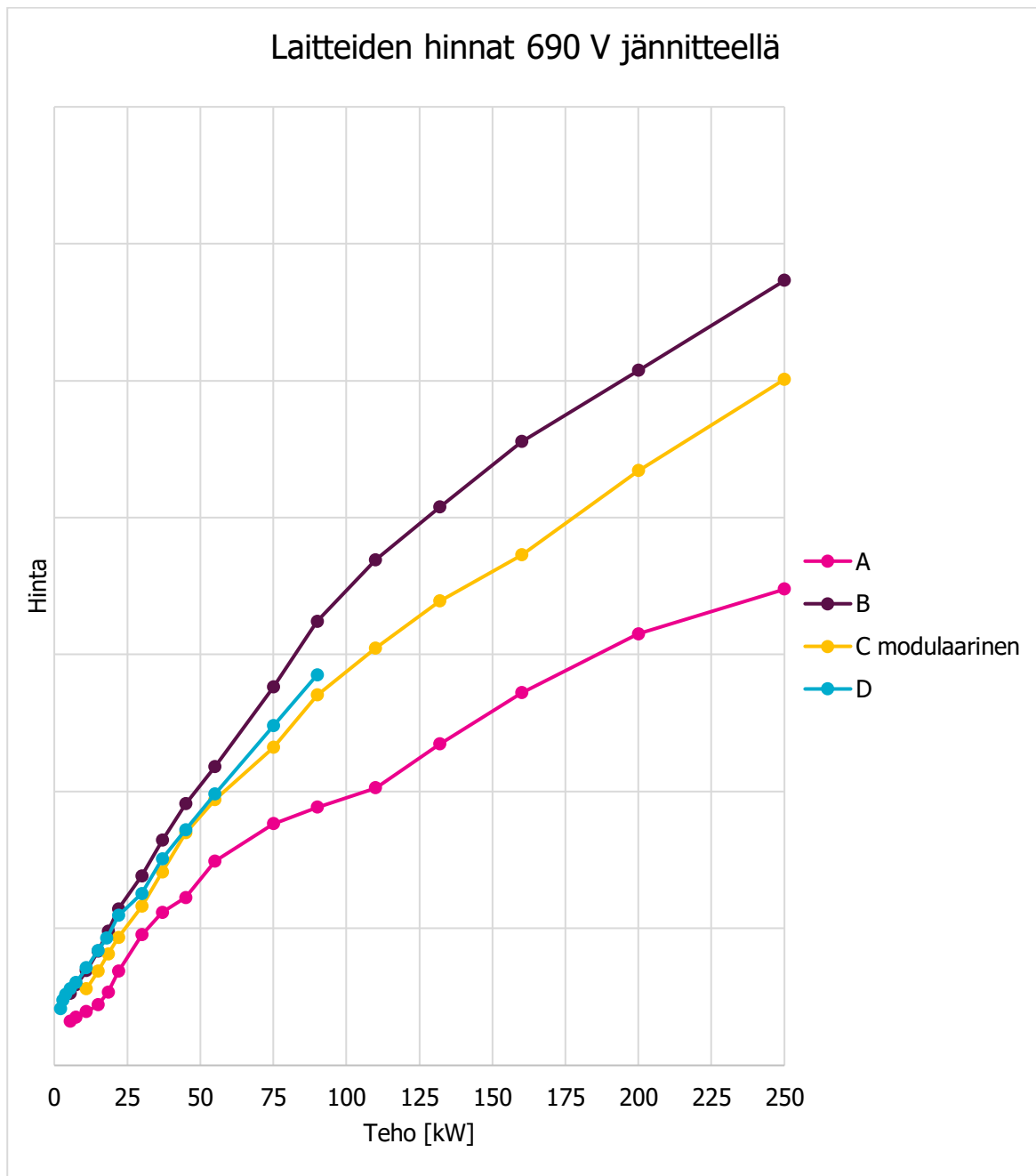
Kuvassa 7 nähdään laitteiden hinnat eri nimellistehoilla 500 V jännitteellä. Toimittaja A:n laitteet ovat myös 500 V jännitetasolla halvimmat. Toimittaja B:n laitteet ovat 130 kW asti halvempia kuin toimittajien C ja D laitteet. Nimellisteholtaan 130 kW:sta ylöspäin toimittaja C:n laitteet ovat halvempia kuin toimittaja B:n laitteet. Toimittaja D:n laitteita on saatavilla kolmannen osapuolen keskuksiin asennettaviksi vain 90 kilowattiin asti 500 V jännitetasolla. Nimellisteholtaan alle 90 kW:n laitteissa toimittaja D:n laitteiden hinnat ovat kaikista toimittajista korkeimmat.



KUVA 7. Laitteiden hinnat 500 V jännitteellä

## 6.3 Laitteiston kustannus 690 V jännitteellä

Kuvassa 8 nähdään laitteiden hinnat eri nimellistehoilla 690 V jännitteellä. Toimittaja A:n laitteet ovat myös 690 V jännitetasolla halvimmat. Toimittaja C:n laitteet ovat 690 V jännitteellä toiseksi halvimmat. Toimittaja D:n laitteita on 690 V jännitteellä saatavilla 90 kilowattiin asti 690 V jännitetasolla. Nimellisteholtaan alle 90 kW:n laitteissa toimittaja D:n laitteet ovat kolmanneksi halvimmat toimittajien A ja C jälkeen. Toimittaja D:n laitteiden hinnat ovat 25 kilowattiin asti samaa tasoa. Nimellisteholtaan yli 25 kW:n laitteissa toimittaja B:n laitteiden hinnat ovat kaikista toimittajista korkeimmat.



KUVA 8. Laitteiden hinnat 690 V jännitteellä

#### 6.4 Yhteenveto

Toimittaja A:n laitteet ovat hinnoiltaan paras vaihtoehto kaikkien jännitetasojen projekteihin vertailtavilla ominaisuuksilla. Toimittaja A:n laitteet eivät sisällä vakiona jarrukatkojaa, jonka seurauksena laitteet ovat muiden toimittajien laitteita halvempat. Jarrukatkojan puutteen hintavaikutus on noin 5-10 % toimittaja A:n hyväksi.

Toimittajien B ja C laitteet ovat hinnoiltaan tasaväkisiä, mutta toimittaja C:n laitteet ovat halvempia jännitetasoilla 400 V ja 690 V. Toimittaja B:n laitteet ovat 500 V jännitetasolla toiseksi halvimmat 130 kilowattiin asti, jota suuremmissa tehoissa toimittaja C:n laitteet ovat halvempia. Toimittaja B:n laitteet ovat 690 V jännitetasolla hinnaltaan muita toimittajia kalliimpia. Toimittaja D:n laitteet ovat keskimäärin kalleimpia jännitetasoilla 400 V ja 500 V.

Vertailun kohteena olevien laitteiden listahintojen lisäksi toimittajien kanssa voidaan sopia projektikohtaisesta hinnoittelusta ja takuuehdoista. Projektikohtaisella hinnoittelulla lopulliset hinnat saattavat olla vertailun hintoja pienemmät. Laitteiden lopulliset hinnat voivat muuttua olosuhteiden muutoksien myötä.

## 7 LUOTETTAVUUS JA EKOLOGISUUS

### 7.1 Takuu-, tuki- ja huolto

Kaikkien toimittajien laitteisiin suositellaan kulutusosien, kuten paristojen ja puhaltimien vaihtoa säännöllisin väliajoin. Kaikilla toimittajilla on saatavilla globaalia tukea myös vaativissa asioissa.

Toimittaja A suosittelee laitteiden jäähdytyspuhaltimien vaihtoa yhdeksän vuoden välein ja ohjauspaneelin sekä muistiyksikön paristojen vaihtoa kuuden vuoden välein. Toimittaja suosittelee elektrolyyttikondensaattoreiden vaihtoa 12 vuoden välein. Toimittajan laitteissa on vuoden takuu asennuksen jälkeen tai 1,5 vuoden takuu toimituksen jälkeen.

Toimittaja B suosittelee jäähdytyspuhaltimien vaihtoa 6-10 vuoden välein ja reaaliaikakellon pariston vaihtoa 10 vuoden välein. Toimittaja B:n laitteiden kondensaattorit ovat kalvokondensaattoreita, jotka kestävät laitteen eliniän. Toimittajan laitteissa on yhden vuoden takuu toimituksen jälkeen.

Toimittaja C suosittelee jäähdytyspuhaltimien vaihtoa viiden vuoden välein. Toimittajan laitteissa on elektrolyyttikondensaattorit, mutta toimittaja ilmoittaa kondensaattoreiden kestävän laitteen eliniän. Toimittajan laitteissa on 1-2 vuoden takuu ja varaosia on saatavilla kymmenen vuotta aktiivimyyntin loppumisen jälkeen.

Toimittaja D suosittelee jäähdytyspuhaltimien vaihtoa 3-5 vuoden välein seinälle asennettavissa laitteissa ja kuuden vuoden välein lattialle asennettavissa laitteissa. Toimittaja suosittelee elektrolyyttikondensaattoreiden vaihtoa 12 vuoden välein. Toimittajan laitteissa on 1,5 vuoden takuu toimituksen jälkeen.

### 7.2 Hiilijalanjälki ja vihreä siirtymä

Toimittajien A, C ja D laitteet sisältävät elektrolyyttikondensaattoreita. Elektrolyyttikondensaattorit sisältävät haitallista jätettä, ja kondensaattorit joudutaan toimittajien suosituksen mukaan mahdollisesti vaihtamaan laitteiden eliniän aikana. Toimittaja B:n laitteet sisältävät kalvokondensaattoreita, jotka eivät sisällä ongelmajätettä ja kestävät laitteen eliniän ajan.

### 7.3 Yhteenveto

Kaikkien toimittajien laitteisiin suositellaan jäähdytyspuhaltimien vaihtoa säännöllisin väliajoin. Toimittajat A ja D suosittelevat kondensaattoreiden vaihtoa 12 vuoden välein. Toimittaja B on ainoa toimittaja, jonka laitteet sisältävät kalvokondensaattoreita ongelmajätettä sisältävien elektrolyyttikondensaattoreiden sijaan. Kaikkien toimittajien laitteisiin on saatavilla globaalia tukea.

## 8 YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT

Työ jaettiin neljään vaiheeseen. Aloitusvaiheessa perehdyttiin taajuusmuuttajan toimintaan, rakenteeseen ja ominaisuuksiin, ja kartoitettiin liiketoimintayksikön tarpeet. Lisäksi määriteltiin työssä haastateltavien toimittajien määrä. Haastatteluvaiheessa haastateltiin laitetoimittajia ja kerättiin tarvittavat tiedot vertailuvaihetta varten. Vertailuvaiheessa vertailtiin laitetoimittajien laitteiden teknisiä, kaupallisia ja ekologisia ominaisuuksia. Lopuksi työ viimeisteltiin viimeistelyvaiheessa.

### 8.1 Aloitusvaihe

Haastateltaviksi laitetoimittajiksi valikoitui neljä hyvää vaihtoehtoa. Kun haastateltavat laitetoimittajat saatiin valittua, siirryttiin keräämään liiketoimintayksikön suunnittelemien prosessien kuluttajalaitteiden sähköiset tarpeet ja niitä syöttäviltä taajuusmuuttajilta vaaditut ominaisuudet. Kerätyn tiedon pohjalta luotiin kysymyslista, jota seurattiin ja täydennettiin haastattelujen aikana.

### 8.2 Haastatteluvaihe

Laitteiston tarpeiden selvittyä otettiin laitetoimittajien edustajiin yhteyttä ja sovittiin aika haastatteluille. Ennen haastatteluja selvitettiin valmiiksi, millaisia laitesarjoja toimittajilla on tarjottavana ja rajattiin selvityksen perusteella vain sopivimmat laitesarjat mukaan vertailuun. Haastattelut käytiin ensimmäisen kuukauden aikana.

Laitetoimittajien kanssa käydyissä keskusteluissa kerättiin laitteiden tekniset tiedot, kaupalliset tiedot sekä toimittajien luotettavuuteen ja ekologisuuteen liittyvät toimenpiteet. Teknisiin tietoihin kuuluvat laitteen toiminnan kannalta olennaiset sähköiset tiedot, vakiona saatavilla olevat ominaisuudet sekä lisäominaisuudet. Kaupallisiin tietoihin kuuluvat peruslaitteen ja lisäominaisuuksien hinnat. Luotettavuuteen ja ekologisuuteen kuuluvat toimitusajat, huoltovälit ja laitteiden käyttöikä sekä vihreän siirtymän ja ympäristöystävällisyyden eteen tehdyt toimenpiteet toimittajayrityksissä.

### 8.3 Vertailuvaihe

Vertailuvaiheessa kerättiin valmistajien teknisten dokumenttien ja haastattelumateriaalien perusteella kahteen taulukkoon taajuusmuuttajatarpeiden kartoitusvaiheessa määritellyt ominaisuudet. Taulukot jaettiin vakio- ja lisäominaisuuksiksi. Tämän jälkeen vertailu aloitettiin teknisellä vertailulla. Teknisen vertailu toteutettiin käymällä läpi laitetoimittajien laitteiden vakio- ja lisäominaisuudet vuorotellen.

Kaupallinen vertailu jaettiin kolmeen osaan jännitetasojen perusteella. Taajuusmuuttajien hintoja vertailtiin valitsemalla kaikkiin mahdollisimman samanlaiset tarpeelliset ominaisuudet. Hintoja vertailtiin erikseen 400 V, 500 V ja 690 V jännitetasoilla.

Ekologisuus- ja luotettavuusvertailussa vertailtiin laitteiden teknisen tuen saatavuutta, huoltovälejä ja käyttöikäkysymyksiä. Lisäksi vertailtiin laitteiden ympäristöystävällisyyttä.

#### 8.4 Viimeistely

Viimeistelyvaiheessa käytiin läpi vertailun tuloksia. Tulokset kerättiin yhdeksi kokonaisuudeksi, jonka perusteella arvioitiin toimittajien laitteiden sopivuutta Plant solutions -liiketoimintayksikön toimittamiin prosesseihin. Lopuksi työn sisältö käytiin kieliasun ja sisällön osalta läpi ja sisältöä täydennettiin tarvittaessa.

#### 8.5 Päätelmät

Kaikkien toimittajien laitteisiin on saatavilla laitteilta vaaditut tekniset ominaisuudet. Osalla toimittajista on laitteissaan ominaisuuksia, jotka eivät ole välttämättömiä liiketoimintayksikön suunnittelemien prosessilaitosten toiminnan kannalta. Näistä ylimääräisistä ominaisuuksista koituu lisäkustannuksia niiden toimittajien laitteisiin nähden, joista ei löydy ylimääräisiä ominaisuuksia.

Hinnoiltaan ja teknisiltä ominaisuuksiltaan paras vaihtoehto kaikilla jännitetasoilla ovat toimittaja A:n valmistamat laitteet. Toimittajan laitteet ovat perusominaisuuksilla halvempia kuin kilpailijoiden laitteet, ja sisältävät kaikki vaaditut tekniset ominaisuudet joko vakiona tai erikseen valittavina lisäominaisuuksina. Toimittaja A:n laitteet eivät sisällä vakiona jarrukatkojaa, jonka kustannusvaikutus on noin 5-10 % laitteen kokonaishinnasta.

Toimittaja B:n yli 37 kW:n laitteissa ja toimittaja C:n kaikissa laitteissa on vakiona jarrukatkoja. Laitteet ovat toimittaja A:n laitteita kalliimpia, mutta hyviä vaihtoehtoja, mikäli laitteissa tarvitaan jarrukatkoja. Toimittaja C:n laitteet ovat hinnoiltaan vertailun toiseksi paras vaihtoehto ja ominaisuuksiensa puolesta hyvä vaihtoehto toimittaja A:n rinnalle. Toimittaja B:n laitteet ovat 400 V:n jännitetasolla myös hyvä vaihtoehto, vaikka laitteiden hinta on hieman korkeampi yli 100 kW:n tehoilla. Toimittaja D:n laitteet sisältävät myös jarrukatkojan alle 90 kW:n laitteissa, mutta ovat kaikilla jännitetasoilla joko kalleimmat tai toiseksi kalleimmat kaikista vertailtavista toimittajista. Toimittajien kanssa voidaan sopia projektikohtaisesta hinnoittelusta ja takuuehdoista, joten kaikilta valmistajilta on järkevää pyytää projektikohtainen tarjous.

Toimittaja B on ainoa, jonka laitteiden sisältämät kondensaattorit ovat kalvokondensaattoreita, jotka eivät sisällä haitallista jätettä ja kestävät laitteen koko eliniän ajan. Toimittajan laitteet ovat parempi, mutta hieman kalliimpi vaihtoehto ympäristön ja laitteen komponenttien eliniän kannalta. Kaikkien toimittajien laitteisiin on saatavilla globaalia tukea tarvittaessa.

## LÄHTEET

- ABB. (7. 2019). *ABB*. Noudettu osoitteesta Low voltage motors Motor guide:  
<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK105285&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
- ABB. (ei pvm). *Brake choppers and brake units*. Haettu 7. 3. 2023 osoitteesta ACS880-604:  
<https://new.abb.com/drives/low-voltage-ac/industrial-drives/acs880-drive-modules/acs880-604>.
- ABB. (ei pvm). *Reducing AFD-caused Harmonics at Partial Load Conditions*. Haettu 23. 2. 2023 osoitteesta ABB:  
<https://library.e.abb.com/public/56a1ca38920d46ddc125746b0027f201/SwingingChoke-US-10.pdf>.
- ABB. (ei pvm). *Suomalaiset juuret*. Haettu 17. 2. 2023 osoitteesta ABB: <https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/historia/suomalaiset-juuret>.
- Albertsen, A. (2015). DC Link Capacitor Technology Comparison Aluminum Electrolytic vs Film Capacitors. *EE Power*. Haettu 8. 3. 2023 osoitteesta <https://eepower.com/technical-articles/dc-link-capacitor-technology-comparison-aluminum-electrolytic-vs-film-capacitors/#>.
- All About Circuits. (ei pvm). *Low-pass Filters*. Haettu 1. 3. 2023 osoitteesta All About Circuits:  
<https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-8/low-pass-filters/>.
- Blalock, T. J. (2007). The Frequency Changer Era: Interconnecting Systems of Varying Cycles. *Wayback Machine*.  
 Haettu 16. 12. 2022 osoitteesta  
<https://web.archive.org/web/20070607042254/http://www.ieee.org/organizations/pes/public/2003/sep/peshistory.html>.
- Bullick, J. (16. 6. 2018). *Master-slave drive applications*. Haettu 14. 3. 2023 osoitteesta KEB:  
<https://www.kebamerica.com/blog/master-slave-drive-applications/>.
- Collins, D. (16. 9. 2016). *FAQ: What are current source inverters and voltage source inverters*. Haettu 16. 3. 2023 osoitteesta Motion Control Tips: <https://www.motioncontroltips.com/faq-what-are-current-source-inverters-and-voltage-source-inverters/>.
- Collins, D. (28. 12. 2016). *FAQ: What is a pulse rectifier and what kinds are there?* Haettu 16. 3. 2023 osoitteesta Motion Control Tips: <https://www.motioncontroltips.com/faq-what-is-a-pulse-rectifier-and-what-kinds-are-there/>.
- Danfoss. (ei pvm). *VLT® du/dt Filter MCC 102*. Haettu 23. 2. 2023 osoitteesta Danfoss:  
[https://files.danfoss.com/download/Drives/LoRes\\_DKDDPFO615A202\\_dUdt\\_Filter\\_MCC102.pdf](https://files.danfoss.com/download/Drives/LoRes_DKDDPFO615A202_dUdt_Filter_MCC102.pdf).
- Danfoss. (ei pvm). *VLT® Sine-Wave Filter MCC 101*. Haettu 23. 2. 2023 osoitteesta Danfoss:  
<https://www.danfoss.com/en-us/products/dds/harmonic-mitigation/vlt-sine-wave-filter-mcc-101/#tab-overview>.
- Egan, M. (4. 3. 2022). Russia-Ukraine crisis replaces Covid as top risk to global supply chains. *CNN Business*.  
 Haettu 16. 12. 2022 osoitteesta <https://edition.cnn.com/2022/03/04/business/russia-ukraine-supply-chain-oil/index.html>.

- Electronics World. (21. 2. 2022). Global shortage of electronic components to continue in 2022, says research. Haettu 16. 12. 2022 osoitteesta <https://www.electronicsworld.co.uk/global-shortage-to-continue-in-2022-says-research/33553/>.
- Haiko, T. (2014). *Analoginen elektroniikka* (Osa/vuosik. 4). Helsinki: Sanoma Pro Oy. Haettu 17. 2. 2023
- Hedwall, M. (22. 6. 2020). The ongoing impact of COVID-19 on global supply chains. *World Economic Forum*. Haettu 16. 12. 2022 osoitteesta <https://www.weforum.org/agenda/2020/06/ongoing-impact-covid-19-global-supply-chains/>.
- Hietalahti, L. (2011). *Tehoelektroniikan perusteet* (Osa/vuosik. 1). Vantaa: Hansaprint Oy Direct. Haettu 16. 2. 2023
- Hietalahti, L. (2013). *Teollisuuden sähkökäytöt* (Osa/vuosik. 1.). Tampere: Tammertekniikka. Haettu 7. 3. 2023
- Hughes, T. P. (1988). *Networks of Power: Electrification in Western Society, 1880-1930* (Osa/vuosik. 2. painos). Haettu 16. 12. 2022 osoitteesta [https://books.google.fi/books?id=g07Q9M4agp4C&q=Networks+of+Power:+Electrification.+in+Western+Society,+1880-1930+ganz&pg=PA96&redir\\_esc=y#v=snippet&q=Networks%20of%20Power%3A%20Electrification%20in%20Western%20Society%2C%201880-1930%20ganz&f=false](https://books.google.fi/books?id=g07Q9M4agp4C&q=Networks+of+Power:+Electrification.+in+Western+Society,+1880-1930+ganz&pg=PA96&redir_esc=y#v=snippet&q=Networks%20of%20Power%3A%20Electrification%20in%20Western%20Society%2C%201880-1930%20ganz&f=false).
- Hulkko, K. (1. 4. 2010). Metallinsinöörin maailmanvalloitus: Outotec on Suomen paras kasvuyritys. *Suomen Kuvalehti*. Haettu 17. 2. 2023 osoitteesta <https://suomenkuvalehti.fi/politiikka-ja-talous/metalli-insinöörin-maailmanvalloitus-outotec-on-suomen-paras-kasvuyritys/>.
- International Electrotechnical Commission. (ei pvm). *IP ratings*. Haettu 3. 3. 2023 osoitteesta International Electrotechnical Commission: <https://www.iec.ch/ip-ratings>.
- Kulikov, V. (5. 4. 2021). What are the Consequences of the Suez Crisis. *New Eastern Outlook*. Haettu 9. 2. 2023 osoitteesta <https://journal-neo.org/2021/04/05/what-are-the-consequences-of-the-suez-crisis/>.
- Malinen, J.;Sullström, H.;Palomaa, A.;& STT. (4. 7. 2019). Metso jakautuu kahtia, Metso Minerals ja Outotec yhdistyvät – Toimitusjohtaja Vauramo: Aivan varmasti henkilöstövaikutuksia tulee. *Yle*. Haettu 17. 2. 2023 osoitteesta <https://yle.fi/a/3-10861434>.
- Outokumpu. (13. 12. 2022). *History of Outokumpu*. Haettu 16. 3. 2023 osoitteesta <https://www.outokumpu.com/en/about-outokumpu/history-of-outokumpu>.
- Parikka, O. (1. 10. 2013). Metso jakautui - Valmet tekee paluun. *Yle*. Haettu 17. 2. 2023 osoitteesta <https://yle.fi/a/3-6858355>.
- Pekkonen, S. (15. 10. 2021). Tuntuva osuus maailman energiankulutuksesta käytetään kivien pienentämiseen – Metso Outotecille tämän ongelman ratkaisu tuo lisää bisnestä. *Talouselämä*. Haettu 17. 2. 2023 osoitteesta <https://www.talouselama.fi/uutiset/tuntuva-osuus-maailman-energiankulutuksesta-kaytetaan-kivien-pienentamiseen-metso-outotecille-taman-ongelman-ratkaisu-tuo-lisaa-bisnesta/2c1aa862-8e0d-48cb-902a-0a76c33d4e67>.

- Pellinen, J. (2019). *Kustannuslaskenta ja kannattavuusajattelu* (Osa/vuosik. 3. uudistettu painos). Alma Talent. Haettu 16. 12. 2022
- Profinet University. (ei pvm). *Profinet University*. Haettu 23. 2. 2023 osoitteesta <https://profinetuniversity.com/system-redundancy/redundancy-terms-s1-s2-r1-r2/>.
- Ramos, R. (1. 8. 2018). Selecting Film or Electrolytic Capacitors for Power Conversion Circuits. *Electronic Design*. Haettu 8. 3. 2023 osoitteesta <https://www.electronicdesign.com/power-management/article/21806817/selecting-film-or-electrolytic-capacitors-for-powerconversion-circuits>.
- Rämö, K. (3. 7. 2021). Valmet ja Neles ovat yhdistyneet ennenkin - Tarina huipentui Suomi-Ruotsi-maaotteluun. *Talouselämä*. Haettu 16. 3. 2023 osoitteesta <https://www.talouselama.fi/uutiset/valmet-ja-neles-ovat-yhdistyneet-ennenkin-tarina-huipentui-suomi-ruotsi-maaotteluun/2034aeea-0756-4f04-a568-5250e2750b9b>.
- Schaffner. (2012). *Sine wave filter solutions for motor drive applications*. Haettu 1. 3. 2023 osoitteesta Direct industry: [https://pdf.directindustry.com/pdf/schaffner-group/sine-wave-filter-solutions-motor-drive-applications/15134-661760-\\_10.html](https://pdf.directindustry.com/pdf/schaffner-group/sine-wave-filter-solutions-motor-drive-applications/15134-661760-_10.html)
- Siemens. (10. 2018). *PROFINET Redundancy Functions*. Haettu 23. 2. 2023 osoitteesta Siemens: [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/450/109756450/att\\_965415/v2/109756450\\_PN\\_Systemredundanz\\_V1\\_0\\_en.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/450/109756450/att_965415/v2/109756450_PN_Systemredundanz_V1_0_en.pdf).
- Sähköinfo Oy. (2018). *Yliaallot ja kompensointi* (Osa/vuosik. 2). Espoo: Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. Haettu 17. 2. 2023
- Tekniikan Museo. (15. 7. 2021). *Esinekummi tekee näkyväksi tekniikan ja teollisuuden tarinaa*. Haettu 17. 2. 2023 osoitteesta Tekniikan Museo: <https://www.tekniikanmuseo.fi/esinekummi-tekee-nakyvaksi-tekniikan-ja-teollisuuden-tarinaa/>.
- VACON. (ei pvm). *EMC and variable speed drives*. Haettu 3. 3. 2023 osoitteesta VACON: [https://bradywaters.com/wp-content/uploads/2014/10/Vacon\\_White\\_Paper\\_EMC\\_and\\_variable\\_speed\\_drives.pdf](https://bradywaters.com/wp-content/uploads/2014/10/Vacon_White_Paper_EMC_and_variable_speed_drives.pdf).
- Valmet. (ei pvm). *Jakautuminen Metsosta 2013*. Haettu 17. 2. 2023 osoitteesta <https://www.valmet.com/fi/sijoittajat/valmet-sijoituskohteena/jakautuminen/>.