



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
VASA YRKESHÖGSKOLA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mira Niemi

TAAJUUSMUUTTAJA- APPLIKAATIOIDEN VERTAILU

Tekniikka ja liikenne
2014

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Mira Niemi
Opinnäytetyön nimi	Taajuusmuuttaja-aplikaatioiden vertailu
Vuosi	2014
Kieli	suomi
Sivumäärä	110 + 2 liitettä
Ohjaaja	Kari Jokinen

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on kartoittaa ABB Oy:n Industry Solution – yksikössä käytettävät taajuusmuuttajaratkaisut pien- ja keskijännitteellä. Opinnäytetyön tarve huomattiin yrityksen myyntiorganisaatiossa, jossa koettiin tarpeelliseksi koota yrityksen sisällä yleisimmin käytettävät taajuusmuuttajaratkaisut yhteen dokumenttiin. Tavoitteena oli selvittää esimerkkitapausten kautta hinnaltaan ja teknisiltä ominaisuuksiltaan paras taajuusmuuttajatoteutus eri käyttökoteisiin, ja helpottaa siten parhaan taajuusmuuttajasovelluksen valintaa. Erityisesti keskijänniteratkaisut oli tarpeellista kartoittaa. Tarkastelu suoritetaan teollisuuslähtöisesti ja saadut tulokset on tarkoitettu pääosin myynnin käyttöön. Tuloksissa huomioidaan myös ratkaisujen vaikutukset verkon yliaaltopitoisuuteen.

Työssä perehdyttiin tarkastelun kohteena oleviin ABB:n taajuusmuuttajiin ACS800-07, ACS1000 ja ACS2000 sekä selvitettiin taajuusmuuttajien häiriövaikutukset ympäröivään sähköverkkoon. Vertailu suoritettiin viiden teknisesti erilaisen taajuusmuuttajan pohjalta, jotka valittiin yrityksen toimesta. Lopputuloksena syntyivät selkeät hinta- ja vertailutaulukot, joista nähdään eri tekijöiden vaikutus ratkaisujen kokonaiskustannuksiin. Työn tulokset antavat viitteitä ratkaisujen soveltumisesta eri käyttökohteisiin ja niistä on nähtävillä ratkaisujen väliset taloudelliset rajapinnat. Taajuusmuuttajaratkaisun taloudellista kannattavuutta määritellään tässä yhteydessä pääosin tehon, kaapelipituuksien ja ympäristövaikutuksien muuttuessa. Tutkimusaineistona käytettiin enimmäkseen ABB:n laitemanuaaleja ja yrityksen sisäisiä hintatietoja.

Tuloksista ymmärretään hintaerojen olevan paikoittain hyvin pieniä toteutusten välillä, jolloin pienikin muutos voi osoittautua merkittäväksi valinnan kannalta. Pelkkä kustannustehokkuus ei ole vielä syy valita tuotetta, vaan tärkeää on huomioida myös tekninen näkökanta. Tämä on hyvä mieltää erityisesti projektin tarjous- ja suunnitteluvaiheissa.

ABSTRACT

Author	Mira Niemi
Title	Comparison of Frequency Converter Applications
Year	2014
Language	Finnish
Pages	110 + 2 Appendices
Name of Supervisor	Kari Jokinen

The purpose of this thesis was to survey frequency converter solutions used in ABB Industry Solutions Electrifications unit, with low and medium voltage. The need of the thesis appeared in the sales organization where the collecting of the most common frequency converter applications to a one document was found necessary. The aim was to investigate the best frequency converter solution to the different uses through example cases and thus make the selection of the best application easier. Especially the medium voltage applications were necessary to survey. The study was made from the technical aspect and the results obtained are intended mainly for the use of sales. In the findings the harmonic distortion effects of the solutions on the electrical grid were also observed.

ABB frequency converters ACS800-07, ACS1000 and ACS2000 were looked into in the thesis as well as the distortion effects of the frequency converters on the ambient electrical network. The comparison was based on five technically different frequency converters which were chosen by the company. As the result the distinct price and comparison tables were created where the effects of the different factors on the total costs of the frequency converter solutions can be seen. The results of the thesis give references of applicability of the different applications and from them the economical boundary surfaces are seen. In this context the profitability of frequency converter applications are specified mainly by the change of power, cable lengths and ambient electrical disturbance affects. The manuals and internal prices of ABB were mainly used as research material.

From the outcome it is understood that price differences are very tiny in places between the applications and even the smallest change might be proven crucial for selection. Mere cost-effectiveness is not the reason to choose the product and it is important to choose also the technical base for the performance. This is good to perceive especially in the quote and planning stages of the projects.

Keywords: frequency converter, costs, EMC, harmonic distortion, comparison

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVA JA TAULUKKOLUETTELO

LYHENTEET JA MERKINNÄT

LIITTEET

1	JOHDANTO.....	12
2	ABB OY	14
3	TAAJUUSMUUTTAJA.....	16
	3.1 Rakenne ja toimintaperiaate.....	16
	3.2 Verkkovaihtosuuntaus.....	19
	3.3 Edut.....	21
	3.4 Suora momenttisäätö (Direct Torque Control)	22
4	YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET	24
	4.1 Häiriötyypit	24
	4.1.1 Johtuvat EMC-häiriöt.....	24
	4.1.2 Säteilevät EMC-häiriöt.....	26
	4.1.3 Harmoniset yliaallot	27
	4.2 Määräykset ja direktiivit	28
	4.2.1 EMC-direktiivi taajuusmuuttajakäytölle	29
	4.2.2 Harmonisten yliaaltojen häiriöpäästöstandardit.....	32
	4.2.3 Functional Safety (Toiminnallinen turvallisuus)	32
	4.3 Verkkovaikutusten hallinta ja minimointi	37
	4.3.1 RFI/EMC-suotimet.....	37
	4.3.2 Yliaaltosuotimet	40
	4.3.3 Aktiivisuodattimet.....	41
	4.3.4 Pulssiluvun valinta	43
	4.3.5 Low harmonic –teknologia	44
	4.4 Moottoripään ongelmien hallinta.....	45
	4.4.1 Du/dt-suodin.....	45
	4.4.2 Sinisuodin.....	46
	4.4.3 Common mode –suodin	48

	5
5 TARKASTELTAVAT ABB:N TAAJUUSMUUTTAJAT	51
5.1 ACS800- ja ACS880-taajuusmuuttajat, single drives.....	51
5.1.1 Rakennerratkaisut	53
5.1.2 Toiminnalliset ominaisuudet.....	59
5.2 Keskijännitetaajuusmuuttajat.....	61
6 TAAJUUSMUUTTAJARATKAISUJEN VERTAILUT	
CASE-TAPAUKSIN	71
6.1 Taajuusmuuttajatoteutusten esittely Case-tapauksin	71
6.2 Case-tapausten hintavertailu ja saadut tulokset	90
7 POHDINTA.....	100
LÄHTEET.....	103

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Kokonaisprojektin toimituslaajuus.	s. 15
Kuva 2. Kolmivaiheisen PWM-taajuusmuuttajan rakenne.	s. 18
Kuva 3. Taajuusmuuttajan rakenteen lohkokaavio.	s. 19
Kuva 4. Verkkovaihtosuuntaaja jännitevälipiirillisessä taajuusmuuttajassa.	s. 20
Kuva 5. DTC-säädön lohkokaavio.	s. 23
Kuva 6. Sähkökäytön häiriöpäästöt.	s. 25
Kuva 7. Maadoitus EMC-sukalla.	s. 27
Kuva 8. Sähkömagneettisten häiriöiden päästötason ja sietotason yhteensopivuus.	s. 29
Kuva 9. EMC-direktiivissä esitetyt käyttöympäristöt ja häiriöiden eteneminen.	s. 31
Kuva 10. STO-toiminto aktivoinnin jälkeen.	s. 34
Kuva 11. STO-toiminnon vaikutus ohjauspiiriin.	s. 35
Kuva 12. SS1-toiminto ramppijarrutuksella.	s. 36
Kuva 13. Korkeataajuisten johtuvien häiriöiden johtuminen taajuusmuuttajakäytössä.	s. 38
Kuva 14. PDS-käytön asennuksien peruskokoonpano.	s. 39
Kuva 15. Imupiiirin rakenne ja sen impedanssikäyrä.	s. 40
Kuva 16. Aktiivisuodattimen periaatekuva.	s. 42
Kuva 17. Pulssiluvun valinta esiintyvien yliaaltovirtojen torjumiseen.	s. 44
Kuva 18. Yleisimmin käytetyn du/dt-suotimen rakenne.	s. 46
Kuva 19. Sinisuotimen rakenne ABB:n ACS800-taajuusmuuttajalla.	s. 47
Kuva 20. Sinisuotimen käyttöesimerkki blokkimuuntajan yhteydessä.	s. 48
Kuva 21. Common mode –suotimen rakenne ja toimintaperiaate.	s. 50
Kuva 22. Esimerkki ACS800- ja ACS880-taajuusmuuttajista.	s. 52
Kuva 23. ACS880-taajuusmuuttajan toiminnallinen turvallisuus ja SIL-luokitus.	s. 54
Kuva 24. ACS800-07-taajuusmuuttajan rakenne.	s. 58
Kuva 25. ACS1000- ja ACS2000-keskijännitetaajuusmuuttajat.	s. 62
Kuva 26. ACS1000:n toiminnalliset pääpiirteet.	s. 63
Kuva 27. ACS1000-taajuusmuuttajan tyypillinen rakennekuva.	s. 64

Kuva 28. ACS1000-käytön tarjoamat standarditurvatoiminnot.	s. 65
Kuva 29. ACS1000 integroidulla muuntajalla (ACS1000i).	s. 65
Kuva 30. ACS2000:n rakenne integroidulla muuntajalla.	s. 66
Kuva 31. ACS2000-käytön tarjoamat standarditurvatoiminnot.	s. 67
Kuva 32. ACS2000-taajuusmuuttajan kytkeminen suoraan sähkönsyöttöön.	s. 68
Kuva 33. ACS2000:n toiminnalliset pääpiirteet.	s. 69
Kuva 34. Taajuusmuuttajaratkaisun periaatekuva toteutettuna 6-pulssisella ACS800-07-taajuusmuuttajalla.	s. 75
Kuva 35. Taajuusmuuttajaratkaisun periaatekuva toteutettuna 12-pulssisella ACS800-07-taajuusmuuttajalla syötettäessä kuormaa kahdelta eri keskukselta.	s. 79
Kuva 36. Taajuusmuuttajaratkaisun periaatekuva käytettäessä ACS800-07 low harmonic –taajuusmuuttajaa.	s. 82
Kuva 37. ACS1000:lla toteutettu taajuusmuuttajasovellus.	s. 85
Kuva 38. ACS2000:lla toteutettu taajuusmuuttajasovellus.	s. 88
Taulukko 1. Sähkökäyttöjen luokitus.	s. 32
Taulukko 2. ACS1000:n tekniset pääpiirteet.	s. 63
Taulukko 3. ACS2000:n tekniset pääpiirteet.	s. 68
Taulukko 4. Taajuusmuuttajaratkaisujen variaatiot.	s. 73
Taulukko 5. Syöttömuuntajien koot ja tyypit 6-pulssisen ACS800-07:n yhteydessä.	s. 76
Taulukko 6. Moottoreiden, taajuusmuuttajien ja kaapeleiden tyypit tehoalueittain käytettäessä 6-pulssista ACS800-07-taajuusmuuttajaa.	s. 77
Taulukko 7. Syöttömuuntajien koot ja tyypit 12-pulssisen ACS800-07:n yhteydessä.	s. 80
Taulukko 8. Moottori- ja taajuusmuuttajatyypit 12-pulssisella ACS800-07:lla tehoalueittain.	s. 80
Taulukko 9. Moottori- ja syöttökaapelityypit 12-pulssisella ACS800-07:lla tehoalueittain syötön tullessa kahdelta eri keskukselta.	s. 81
Taulukko 10. Syöttömuuntajien koot ja tyypit ACS800-37:n yhteydessä.	s. 83
Taulukko 11. Moottoreiden, taajuusmuuttajien ja kaapeleiden tyypit tehoalueittain käytettäessä ACS800-37-taajuusmuuttajaa.	s. 84

Taulukko 12. Moottoreiden, taajuusmuuttajien ja kaapeleiden tyyppimerkinnot ACS1000:lla tehoalueittain.	s. 86
Taulukko 13. Moottori- ja syöttökaapelityypit ACS1000:lla tehoalueittain syötön tullessa kolmikäämimuuntajalta.	s. 87
Taulukko 14. Moottoreiden, taajuusmuuttajien ja kaapeleiden tyypit ACS2000:lla tehoalueittain.	s. 89
Taulukko 15. Mahdollisen syöttömuuntajan tiedot ACS2000:n yhteydessä.	s. 90
Taulukko 16. Taajuusmuuttajaratkaisujen kokonaiskustannukset suhdelukuina tehoalueittain eri moottorikaapelin pituuksilla, syöttöjännitteen ollessa 10 kV ja kalleimman vaihtoehdon saadessa arvon 10 000.	s. 92
Taulukko 17. Taajuusmuuttajaratkaisujen paremmuusjärjestys hintansa perusteella.	s. 94
Taulukko 18. Esimerkki kaapelipituuden vaikutuksesta kokonaishintaan pien- ja keskijännitetaajuusmuuttajaratkaisujen välillä.	s. 97

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ABB	Asea Brown Boveri
AFE	Active Front End, IGBT-kytkimistä koostuva taajuusmuuttajan verkkoon regeneroiva DC-syöttöyksikkö
DFE	Diode Front End, 24-pulssisella dioditasasuuntaajalla toteutettu taajuusmuuttajan tasasuuntaussilta
DOL	Direct On Line, suoraan sähkönsyöttöön kytkettävä
EMC	Electromagnetic Compatibility, elektromagneettinen yhteensopivuus
IEC	International Electrotechnical Commission, kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio
EN 13849-1	Järjestelmän PL-tasojen määrittämiseen käytetty standardi
EN 61000-3-12	Harmonisia virtayliaaltoja rajoittava eurooppalainen standardi
EN 61800-3	EMC-tuotestandardi
EN 62061	Järjestelmän SIL-tasojen määrittämiseen käytetty standardi
IEEE 519	Amerikkalainen harmonisia virtayliaaltoja rajoittava standardi
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IGCT	Insulated Gate Commutated Thyristor
LC	Liquid Cooled, vesijäähdytteinen
PDS	Power Drive Systems
PL	Performance Level, järjestelmän kyky suorittaa turvatoiminto ennakoitavissa olosuhteissa

PWM	Pulse Width Modulation, pulssinleveysmodulaatio
RFI	Radio Frequency Interference
SIL	Safety Integrity Level, turvallisuustaso
STO	Safety Torque Off
THD	Total Harmonic Distortion, verkon kokonaisharmoninen särö

LIITELUETTELO

LIITE 1. Liite poistettu tilaajan pyynnöstä.

LIITE 2. Taajuusmuuttajaratkaisujen kustannusdiagrammi.

1 JOHDANTO

Taajuusmuuttajat ovat yleistyneet osana teollisuuden sähkökäyttöjä ja niitä käytetäänkin jo lähes kaikissa vaihtosähköpohjaiseen voimansiirtoon perustuvissa järjestelmissä. Siten niiden kustannusteknisen vertailun merkitys on korostunut entisestään. Taajuusmuuttajien avulla saavutetaan koko sähkökäytöstä optimaalinen säädettävyys ja siten tehokas tuotantoprosessi. Lisäksi mahdollistetaan oikosulkumoottorien käyttö vaativissakin nopeussäädetyissä käytöissä. Taajuusmuuttajat aiheuttavat kuitenkin haasteita teollisuusverkon toteutukseen tuottamiensa häiriöiden vuoksi. Nämä haasteet tulee huomioida sähkökäytön suunnittelussa, mikä edellyttää eri taajuusmuuttajatoteutusten rakentamisen ymmärtämistä. Tämä puolestaan auttaa hahmottamaan ratkaisun kokonaishintaan vaikuttavat tekijät ja helpottaa sekä teknisesti että taloudellisesti oikean taajuusmuuttajasovelluksen valintaa sille tarkoitettuun käyttökohteeseen.

Tämä opinnäytetyö tehtiin ABB Oy:n Industry Solutions –yksikölle, joka halusi kartoittaa yksikössä yleisimmin käytettävät taajuusmuuttajaratkaisut pien- ja keskijännitteellä. Keskeisenä tavoitteena oli helpottaa esimerkkitapausten kautta hinnaltaan ja teknisiltä ominaisuuksiltaan parhaan taajuusmuuttajaratkaisun valintaa eri käyttökohteissa. Pienjännitepuolen taajuusmuuttajaratkaisut oli pääosin jo kartoitettu, mutta keskijänniteratkaisujen hyödynnettävyys sekä vaihtuminen taloudellisesti kannattavammaksi oli tarpeellista selvittää. Erityisesti nämä rajapinnat pien- ja keskijänniteratkaisujen välillä olivat tulosten kannalta merkittäviä. Tarkastelut suoritetaan viiden teknisesti erilaisen taajuusmuuttajan pohjalta, jotka kuuluvat ABB:n ACS800-07-, ACS1000- ja ACS2000-tuoteperheisiin. Tarkasteluissa huomioidaan vain pääpiiriin vaikuttavat tekijät, sillä ohjauspiirin vaikutus hintavertailun kannalta on olematon. Tutkimusaineistona käytettiin pääosin ABB:n laitemanuaaleja ja yrityksen sisäisiä hintatietoja.

Ennen teknistaloudellista vertailua työssä perehdytään yleisellä tasolla taajuusmuuttajien rakenteeseen, toimintaan ja ominaisuuksiin sekä niiden aiheuttamiin häiriöpäästöihin ja -päästöjen hallintaan. Lisäksi esitellään

tarkastelun kohteena olevat ABB:n taajuusmuuttajaperheet. Tämän jälkeen pureudutaan esimerkkitapauksin tarkasteltaviin taajuusmuuttajatoteutuksiin ja selvitetään ratkaisujen tekniset ominaisuudet sekä kokonaiskustannuksien muodostuminen. Vertailun tuloksina on tarkoitus saada helppolukuiset hinta- ja vertailutaulukot, joista nähdään eri tekijöiden vaikutus ratkaisujen kokonaiskustannuksiin. Eritoten taloudelliset rajapinnat ovat vertailun kannalta merkittäviä. Työssä saatavien tuloksien tarkoituksena ei ole esittää absoluuttista totuutta taajuusmuuttajasovelluksen valinnasta, vaan antaa viitteitä ratkaisujen soveltumisesta eri käyttökohteisiin.

2 ABB OY

ABB on johtava sähkövoima- ja automaatioteknologian yritys, joka toimittaa tuotteita, palveluita ja järjestelmiä teollisuus- ja energiayhtiöiden tarpeisiin. Tarjoamansa teknologiaosaamisen kautta ABB pyrkii parantamaan sähköverkon luotettavuutta ja teollisuuden tuottavuutta ympäristömyönteisesti. Yritys työllistää tällä hetkellä 145 000 henkeä noin sadassa eri maassa ja sen pääkonttori sijaitsee Zürichissä, Sveitsissä. Vuoden 2011 liikevaihto oli noin 38 MUSD. Suomessa ABB työllisti vuonna 2012 yhteensä 6600 henkilöä ja maan suurimmat tehdaskeskittymät sijaitsevat Helsingissä ja Vaasassa. /1/, /2/, /3/, /5/, /6/

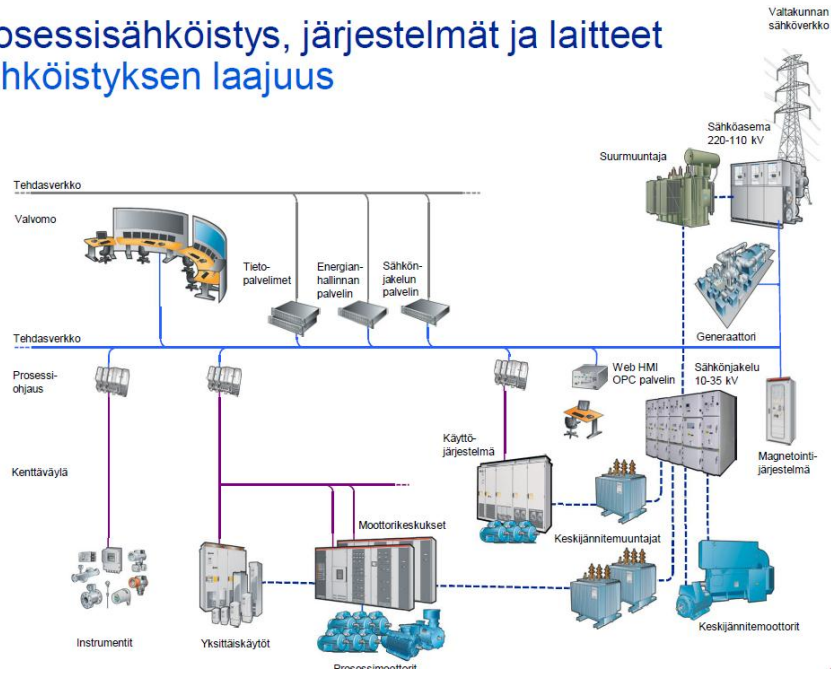
ABB muodostui vuonna 1988 ruotsalaisen ASEAn ja sveitsiläisen Brown Boverin yhdistyessä. Suomen ABB:n juuret ulottuvat kuitenkin aina vuoteen 1889, jolloin Gottfrid Strömberg perusti omaa nimeänsä kantaen sähköliikkeen Oy Strömberg Ab. Liikkeen nimi muuttui myöhemmin lyhyempään muotoon ja se myytiin ASEAlle vuonna 1987. /4/

ABB Industry Solutions

Tämä opinnäytetyö tehtiin ABB Oy:n Vaasassa sijaitsevalle Industry Solutions – yksikölle, joka kuuluu yhteen ABB Oy:n viidestä liiketoimintadivisioonasta. Yksikkö tarjoaa globaalisti energianhallinta-, linjakäyttö- ja sähköistysratkaisuja, sekä tehdastietojärjestelmiä ja kokonaisprojekteja teollisuusasiakkaille. Projektitoimitus voi laajuudeltaan kattaa kaikki edellä luetellut osa-alueet tai vain osan niistä. **(Kuva 1.)**. /17/, /18/

Metsäteollisuuden sähköistysratkaisuista vastaa maailmanlaajuisesti ABB:n Suomen yksikkö, joka on lisäksi vastuussa toimituksiin liittyvän osaamisen kehittämisestä yrityksen sisällä. Vaasan lisäksi Suomen yksiköt ovat sijoittuneet Helsinkiin, Ouluun ja Varkauteen ja yksikköjen palveluksessa työskentelee 230 henkilöä. /17/

Prosessisähköistys, järjestelmät ja laitteet Sähköistuksen laajuus



Kuva 1. Kokonaisprojektin toimituslaajuus. /14/

3 TAAJUUSMUUTTAJA

Taajuusmuuttajalla tarkoitetaan laitetta, jonka avulla kytetään ohjaamaan ja säätämään sähkömoottorin pyörimisnopeutta ja vääntömomenttia portaattomasti. Tämä on mahdollista muuttamalla moottorin syöttötaajuutta ja -jännitettä. Vaihtosähkömoottorin pyörimisnopeuden ollessa riippuvainen siihen syötettävän sähkönsäätäjän taajuudesta f ja moottorin napapari-luvusta p yhtälön $n_s = \frac{f}{p}$ mukaisesti, pyörii suoraan vakiotajuiseen kolmivaiheiseen sähköverkkoon kytketty oikosulkumoottori verkon määräämää nopeutta. Moottorin pyörimisnopeutta voidaan kuitenkin säätää mieleiseksi kytkettäessä taajuusmuuttaja syöttävän verkon ja ohjattavan sähkölaitteen väliin, jolloin taajuusmuuttajan tarkoituksena on vastata sähkökoneen ohjauksesta. Moottorikäytössä tämä mahdollistaa sähkökoneen ohjauksen prosessin vaatimalla nopeudella, jolloin koko prosessi tehostuu. Lisäksi osa taajuusmuuttajista mahdollistaa tehon ohjaamisen takaisin syöttävään sähköverkkoon. Taajuusmuuttajaa käytetäänkin yleisesti lähes kaikissa vaihtosähköpohjaiseen voimansiirtoon perustuvissa moottorikäytöissä sillä saavutettavien etujen vuoksi. /24/, /47/, /50/, /53/, /65/

Yleisimmin käytössä on niin sanottuun pulssinleveysmodulointiin perustuva välipiiritaajuusmuuttaja (PWM), jonka peruserä ja käytön edut tullaan selvittämään tässä luvussa. Lisäksi käsitellään verkkovaihtosuuntaajalla varustetun taajuusmuuttajakäytön toimintaperiaate.

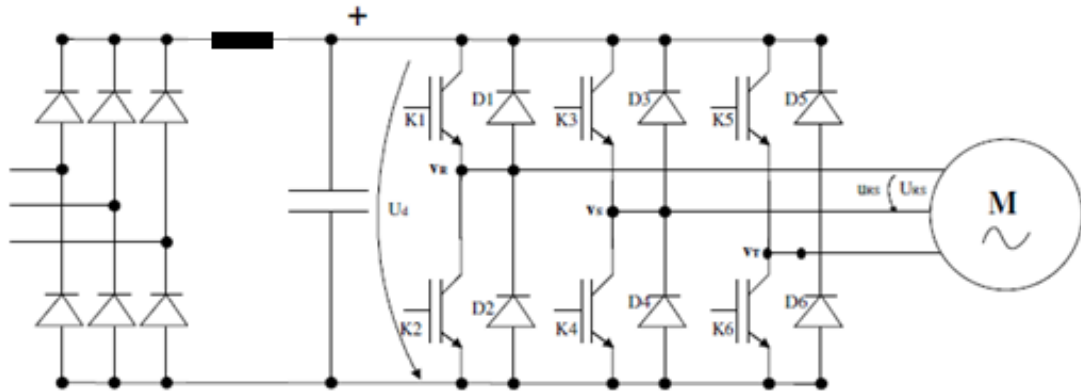
3.1 Rakenne ja toimintaperiaate

Taajuusmuuttajat voidaan jakaa välipiirillisiin taajuusmuuttajiin sekä syklokonverttereihin, joilla tarkoitetaan yhdestä suuntaaja-asteesta koostuvia suoria taajuusmuuttajia. Syklokonvertterin avulla voidaan sinimuotoisesta syöttöjännitteestä muokata suoraan eritaajuista vaihtojännitettä. Tavanomaisimpana taajuusmuuttajaratkaisuna teollisuudessa käytetään kuitenkin välipiiritaajuusmuuttajaa, joka jaetaan edelleen virtavälipiirillisiin ja jännitevälipiirillisiin taajuusmuuttajiin. Näistä jännitevälipiirillinen

taajuusmuuttaja on tyyppinä yleisin, sillä se soveltuu niin yksittäis- kuin monimoottorikäyttöihinkin rakenteensa vuoksi. Tätä vastoin virtavälipiirillinen taajuusmuuttaja on tarkoitettu pääosin vain yksittäismototorikäyttöihin johtuen sen vaihtosuuntaajan toimintaperiaatteesta. /47/, /50/, /53/

Tavanomaisimpana teknisenä ratkaisuna käytetyn jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan rakenne selviää kuvasta 2, jossa kolmivaiheisesta 50 Hz:n verkosta syötetään kuusipulssisen tasasuuntaajan ja tasajännitevälipiirin kautta kolmivaiheista invertteriä. Tämän tehopuolijohteista koostuvan vaihtosuuntaussillan tarkoituksena on muodostaa tasasuunnatusta välipiirin jännitteestä edelleen tarvittavan suuruista vaihtojännitettä. Ohjaukseen käytetään yleisimmin pulssinleveysmodulointiin perustuvaa PWM-invertteritekniikkaa, jolloin moottorille syötettävän vaihtojännitteen teholliasarvoa säädetään jännitepulssien leveyttä muuttamalla. Ohjattavana komponenttina on yleisimmin IGBT, joka yhdessä toisen IGBT:n ja niiden kanssa vastarinnan kytkettyjen nolladiodien kanssa muodostavat aina yhden vaihtokytkimen. Vaihtokytkimet voivat kytkeä kunkin vaiheen DC-välipiirin joko + tai - potentiaaliin ja näin syntyvistä pulsseista muodostuu moottorille syötettävää vaihtojännitettä. Oikosulkumoottori, jonka pyörimisnopeutta halutaan säätää, on tavallisesti kytkettynä tähän invertteriin. Ratkaisevaa on, mitkä kytkentäsykliä kestoajat ovat suhteessa näihin potentiaaleihin. /45/, /47/, /48/, /50/, /53/

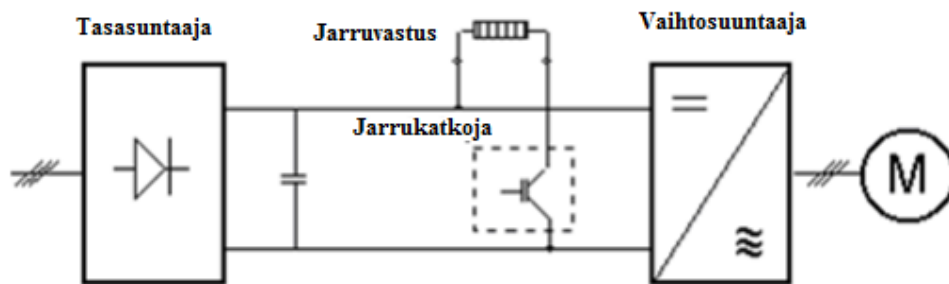
Huolimatta invertterin syöttämän virran vaihtelusta kytkentäilmiölle luonteenomaisella tavalla, saadaan virran käyrämuoto lähes sinimäiseksi. Kasvattamalla kytkentätaajuutta voidaan virran käyrämuotoa edelleen parantaa, jolloin moottorin häviöt ja käyntiääni pienenevät. /47/



Kuva 2. Kolmivaiheisen PWM-taajuusmuuttajan rakenne. /48/

Pääosin taajuusmuuttaja koostuu siis neljästä eri osasta: diodisillalla toteutetusta tasasuuntaajasta, välipiiristä, vaihtosuuntaajasta sekä näitä yksiköitä yhdistävästä ja ohjaavasta ohjauspiiristä (**Kuva 3.**). Ohjauspiirin tarkoituksena on antaa ohjearvo moottoria ohjaavalle taajuusmuuttajalle, esimerkiksi automaatiojärjestelmän kautta, jossa prosessin säätöpiirit yleensä toteutetaan. Välipiirissä olevan kondensaattorin tarkoituksena on puolestaan toimia jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan tasajännitteen energiavarastona sekä suodattaa tasasuuntaajalta tulevaa epätasaista ulostulojännitettä. Jännitevälipiirissä voi kondensaattorin ohella olla jarrukatkoja vastuksineen, joiden tarkoituksena on estää välipiirin jännitteen nousu liian suureksi ohjaamalla jarrutuksessa syntyvä sähköenergia ulkoiseen vastukseen. Muutoin taajuusmuuttajan suojatoiminnot pysäyttäisivät sähkökäytön. Näiden lisäksi taajuusmuuttajissa käytetään erilaisia virran käyrämuotoa tasoittavia suotimia, joista yksinkertaisin on diodisillan ja kondensaattorin väliin kytkettävä tasajännitteen muutoksia tasoittava kuristin. Yhdessä välipiirin kondensaattorin kanssa tämä kuristin muodostaa LC-suotimen, joka rajoittaa korkeataajuisia häiriöitä verkosta taajuusmuuttajalle ja toisinpäin.

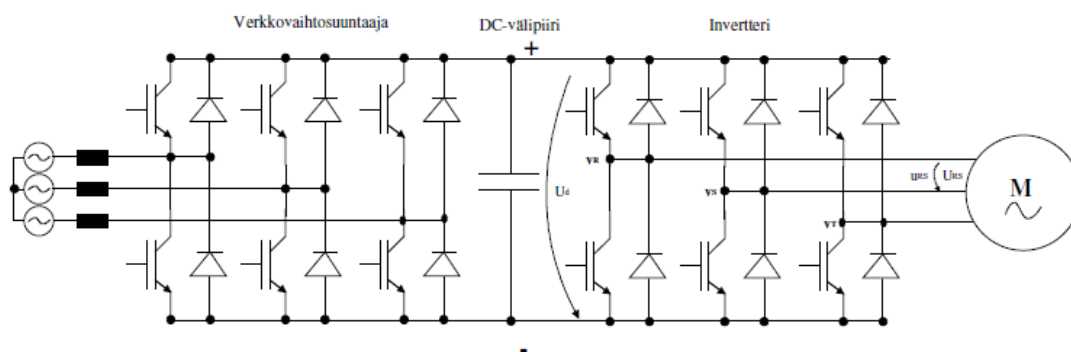
/24/, /44/, /60/, /70/



Kuva 3. Taajuusmuuttajan rakenteen lohkokkaavio. /24/

3.2 Verkkovaihtosuuntaus

Tavanomaisella kuusipulssisella diodisillalla varustetussa taajuusmuuttajassa moottorin jarrutusenergia joudutaan hukkaamaan välipiiriin kytketyssä tehovastuksessa, sillä diodisilta ei pysty vaihtosuuntaamaan energiaa takaisin syöttävään sähköverkkoon. Ratkaisuna voidaan perinteinen dioditasasuuntaaja kuitenkin korvata invertterin kaltaisella IGBT-kytkimistä koostuvalla vaihtosuuntaussillalla, joka mahdollistaa sähköenergian siirtämisen kuormasta verkkoon sekä toisinpäin. Tämä perustuu vaihtosuuntaustilanteessa verkkovaihtosuuntaajan napajännitteen nousuun pääjännitteen huippuarvoa korkeammaksi, jolloin pätötehonsuunta on välipiiristä AC-verkkoon päin. Vaihtosuuntaustilanteella tarkoitetaan esimerkiksi jarrutustilannetta, jolloin sähkökone toimii generaattorina. Dioditasasuuntaajan korvaava verkkovaihtosuuntaaja on fyysisesti täysin samanlainen kuin perinteinen taajuusmuuttajan moottoria syöttävä invertteri, vain sen ohjaustapa poikkeaa hieman käyttösovelluksesta riippuen (**Kuva 4**). /48/



Kuva 4. Verkkovaihtosuuntaaja jännitevälipiirillisessä taajuusmuuttajassa. /48/

Kaksisuuntaisen tehonsiirron ansiosta voidaan välipiirin jarrukatkoja jättää pois ja jarrutusilanteessa tuotettu sähköteho kyetään syöttämään takaisin sähköverkkoon. Tämä mahdollistaa vaihtosähkökoneen nelikvadranttikäytön. Perinteisestä taajuusmuuttajaratkaisusta poiketen, verkkovaihtosuuntaajalla varustettu taajuusmuuttaja sisältää aina verkkosuotimen, sillä vaihtosuuntaajan napajännitte AC-verkon puolella on sille ominaista kantijännitettä. Tämä estää sen kytkemisen suoraan syöttöverkkoon. Tämä virtaa rajoittava suodin on yksinkertasimmillaan pelkkä sarjakuristimen muodostama L-suodin tai LCL-suodin. L-suotimen heikkoutena heikoissa verkoissa on se, että kytkentätaajuiset virtakomponentit säröyttävät herkästi syöttöjännitettä. Tämän vuoksi yleisimmin käytetään syöttöverkon puolelle sijoitettua LCL-suodinta, jonka avulla voidaan suodattaa myös verkkoon johtuvia EMC-häiriöitä. /48/

Verkkovaihtosuuntaajan verkkovirtaan tuottamat yliaaltosäröt ovat vain pieni osa perinteiseen 6-pulssiseen suuntaajasillan tuottamiin säröihin verrattuna. Tämän mahdollistavat edellä esitetty LCL-suodin sekä IGBT-kytkimillä toteutetun suuntaajasillan ohjaus. Sillan ohjauksella voidaan pienentää sekä verkkovirran yliaaltoja että kompensoida perustaajuisia loistehoa. Oikealla suuntaajan mitoituksella voidaan kokonaisvirtasäröä pienentää jopa viidesosaan alkuperäisestä sekä kompensoida muuntajien ja tasasuuntaajien synnyttämä loisteho. Lisäksi vältetään passiivisten suotimien tuottamat vahingolliset kapasitiiviset virrat. /39/, /48/, /56/

3.3 Edut

Taajuusmuuttajat ovat yleistyneet teollisuuden sähkökäytöissä ja niitä käytetäänkin jo lähes kaikissa vaihtosähköpohjaiseen voimansiirtoon perustuvissa järjestelmissä. Suosio selittyy taajuusmuuttajan mahdollistamalla hyödyillä ja niiden laaja-alaisella käytettävyydellä.

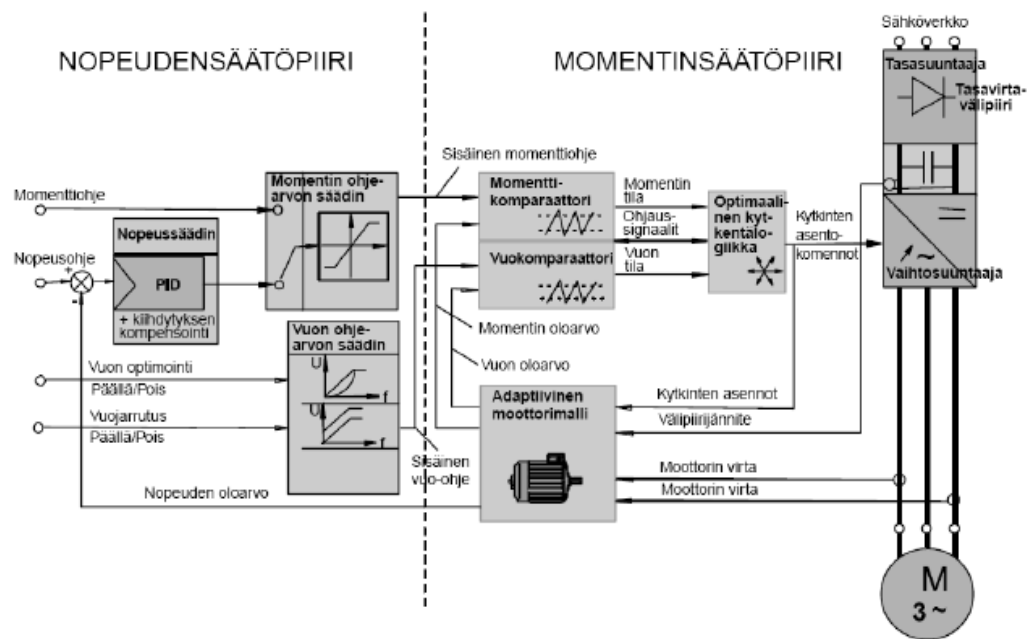
Taajuusmuuttajan käyttö osana prosessia mahdollistaa tehokkaan tuotantoprosessin, sillä sen avulla moottorista ja koko sähkökäytöstä voidaan saavuttaa optimaalinen säädettävyys. Energiansäästöä saavutetaan eritoten pumppu- ja puhallinkäytöissä, joissa tavanomaisesti nesteen tai kaasun virtauksen säätämiseen käytetään kuristimia, kuten venttiileitä tai siipisäätimiä. Näiden säätimien käyttö vähentää prosessin energiatehokkuutta kasvattamiensa energiahäviöiden vuoksi. Taajuusmuuttaja mahdollistaa lisäksi moottorin mitoutuksen normaalin käytön mukaan, luonnollisesti edellyttäen, että kuorma, moottori ja taajuusmuuttaja ovat keskenään yhteensopivia. Näiden kautta saavutetaan edelleen merkittäviä taloudellisia säästöjä muun muassa investointikustannuksissa. /28/

Taajuusmuuttaja sallii erilaisia käynnistys- ja pysäytystoimintoja prosessin tarpeesta riippuen. Esimerkiksi moottorin käynnistäminen pehmeästi mahdollistetaan asettamalla taajuusmuuttajan parametreissa moottorille riittävän pitkä kiihdytysaika, jolla taajuus nousee sen minimitaajuudesta maksimiin. Näin jättämä ei pääse kasvamaan liian suureksi, eikä raskaskaan käynnistys aiheuta liiallista moottori- ja verkkovirran kasvua käynnistyksen aikana. Siten moottorille ja sähkölaitteille aiheutuvia rasituksia saadaan vähennettyä, mikä edelleen pienentää huoltokustannuksia. Myös moottorille asetettavat erilaiset pysäytystoiminnot ovat valittavissa, jolloin moottori saadaan toimimaan esimerkiksi generaattorina raskaissa jarrutuksissa. Mikäli jarrutusenergiaa ei saada hukattua taajuusmuuttajan välipiirissä, voidaan jarrukatkoilla varustettu taajuusmuuttaja ohjata kytkemään jarruvastus välipiiriin estämään jännitteen liiallista nousua. Osa taajuusmuuttajista mahdollistaa lisäksi jarrutusenergian vaihtosuuntauksen takaisin syöttävään sähköverkkoon tai monimoottorikäytöissä suoraan muiden moottorien pyörittämiseen. /28/, /47/

3.4 Suora momenttisäätö (Direct Torque Control)

Suoralla momenttisäädöllä eli DTC-säädöllä tarkoitetaan moottorin momentin ja magneettivuon säätöön perustuvaa vaihtosuuntaajan ohjausmenetelmää. Toisin kuin perinteisessä PWM-tekniikassa, DTC-säädöllä momentti lasketaan suoraan ilman nopeustakaisinkytkentää tai sini-kolmio -vertailuun perustuvaa modulaattoria. Säätö perustuu pitkälle kehittyneisiin matemaattisiin malleihin, mikä mahdollistaa erittäin nopean moottorin vääntömomentin säädön. DTC-säädöllä momentin laskentaväli onkin kiistatta nopeampi muihin säätötapoihin nähden, sillä se ylittää jopa 25 μ s:iin. Näin moottorin akselille asennettavat takometrit tai asentoanturit eivät usein ole välttämättömiä, vaikka niiden käyttö parantaakin nopeussäädön tarkkuutta. DTC-tekniikka soveltuu myös vaihtosuuntauskäyttöön, jolloin mahdollistetaan energian siirto takaisin syöttöverkkoon, esimerkiksi tuulivoimalakäytöissä. Suoran momenttisäädön periaatteellinen lohkokkaavio on nähtävillä kuvasta 5. /26/

DTC-säätöpiiri koostuu nopeuden- ja momentinsäätöpiiristä (**Kuva 5.**). Säädön perustana on erittäin tarkka moottorimalli, joka käyttää moottorin kilpiarvoja lähtötietoinaan. Ensikäynnistyksen yhteydessä käytetään kuitenkin moottorin sähköisiä suureita, jolloin moottorimalli saadaan tarkemmaksi. Tällöin momentinsäätöpiirissä mitattujen välipiirin jännitteen, kahdelta vaiheelta mitatun moottorivirran ja taajuusmuuttajan kytkimien asennoista lasketaan moottorin tarkat tilatiedot. Tämä optimaalinen moottorimalli saadaan taajuusmuuttajan ID-ajon kautta, jolloin moottorikäytön suorituskyky paranee. /26/



Kuva 5. DTC-säädön lohko-kaavio. /26/

4 YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

”Suuntaajakäytöt poikkeavat monessa suhteessa tavanomaisesta verkon kuormituksesta. Verkon kannalta suuntaajakäyttöjen vaikutukset ovat pääosin haitallisia.” /50/

Puolijohdetekniikalla toteutetut suuntaajakäytöt ovat lisääntyneet sähkökäytöissä hyvien ominaisuuksiensa vuoksi, mutta ne aiheuttavat lisäämiensä häiriöiden vuoksi haasteita teollisuusverkon toteutukseen. Sähkökäytöt yleensä sietävät hyvin useimpia häiriöitä, sillä ne tuottavat niitä itse. Sähkökäyttöjen häiriöpäästöjä pyritään kuitenkin rajoittamaan erilaisin standardein ja direktiivein, joita tullaan esittelemään tässä luvussa. Lisäksi esitellään näiden häiriöiden aiheuttamia ongelmia sekä niiden olennaisimmat hallintakeinot teollisuusverkossa. Näiden ohella käydään läpi vielä ABB:n taajuusmuuttajien turvallisuutta ohjaava standardi EN 62061. /49/, /50/

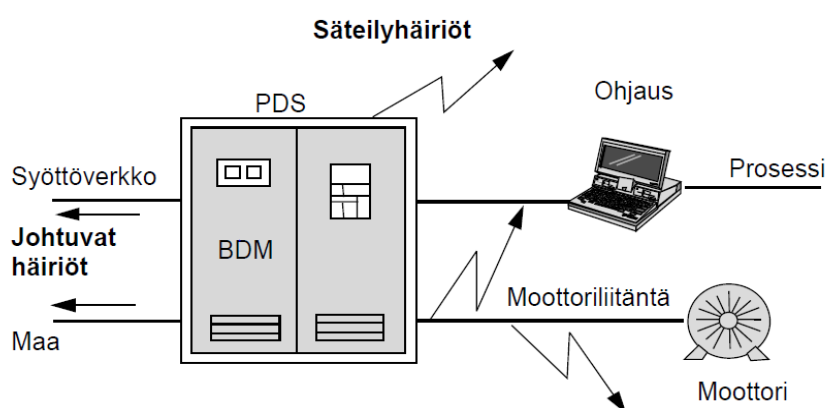
4.1 Häiriötyypit

Taajuusmuuttajan aiheuttamat sähkömagneettiset häiriöpäästöt voidaan karkeasti jakaa syöttöverkkoon johtuviin harmonisiin yliaaltoihin sekä johtumalla tai säteilemällä eteneviin elektromagneettisiin häiriöihin eli EMC-häiriöihin. Nämä syöttöverkkoon johtuvat harmoniset yliaallot sekä ympäristöön säteilevät elektromagneettiset häiriöt ovat muun verkon kannalta haitallisia ja voivat aiheuttaa vakavia ongelmia verkon muille kuluttajille. /50/

4.1.1 Johtuvat EMC-häiriöt

EMC-häiriöt voidaan jakaa etenemistapansa perusteella joko johtuviin tai säteileviin häiriöihin (**Kuva 6**). Johtuvien elektromagneettisten häiriöiden pääasiallinen lähde on inverttereiden nopeat IGBT-puolijohdekytkimet, joiden kytkentäilmiöt aiheuttavat verkkoon suuritaajuisia häiriöitä. Taajuusmuuttajakäytössä nämä häiriöt aiheutuvat moottoria syöttävän

vaihtosuuntaajan lähtöjännitteestä, joka muodostuu erittäin nopeasti nousevista jännitepulsseista. Pulssien jännite voi nousta jopa kaksinkertaiseksi moottorin liittimissä suuren impedanssieron vuoksi, liittimien ja moottorikaapeleiden vaimennus- ja heijastusominaisuuksista riippuen. Jännitteen kulkua joudutaankin käsittelemään kulkuaaltona. Syntyneet jännitepulssit sekä korkeat kytkentäaajuudet voivat aiheuttaa moottoripäähän ongelmia, joita ovat laakereiden kautta sulkeutuvat suuritaajuiset virrat sekä moottorin ja moottorikaapeleiden eristyksien rasittuminen. Syntyvät laakerivirrat vahingoittavat moottorin laakereita virtapulssien sulkeutuessa esimerkiksi moottorin käämien hajakapasitanssien kautta. Ongelmien välttämiseksi tulee käyttö maadoittaa huolellisesti, jolloin hajavirrat palaavat invertterin runkoon laakereiden sijaan muuta reittiä. Virtoja voidaan lisäksi vähentää symmetristen moottorikaapeleiden avulla, ferriittirenkain tai käyttäen vaihtosuuntaajan lähtökuristinta. Lisäksi moottorin laakereiden eristäminen estää laakerivirtojen kulkeutumisen. Erityyppiset suurtaajuiset laakerivirrat edellyttävät erilaisia toimenpiteitä ja tehokkain tapa on käyttää näistä kerrallaan useampaa keinoa. Laakerivirrat voidaan jakaa kiertäviin ja ei-kiertäviin laakerivirtoihin virran sulkeutumisreitit mukaan. /13/, /27/, /49/



Kuva 6. Sähkökäytön häiriöpäästöt. /27/

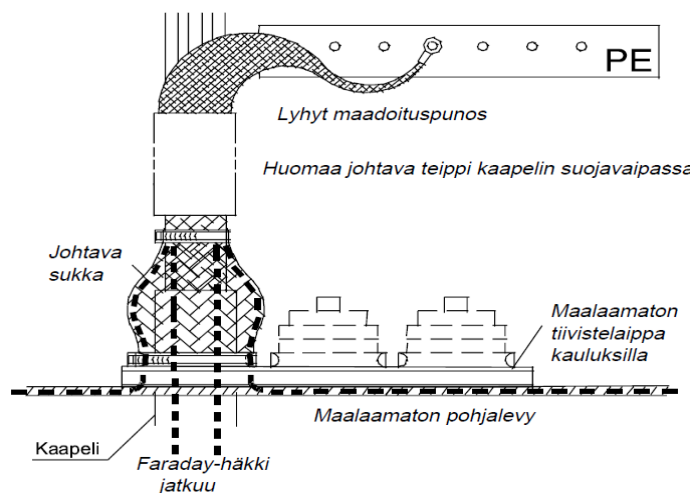
Muita johtuvia häiriöitä pyritään vaimentamaan maadoituksen lisäksi pääosin erilaisin suotimin, joita ovat esimerkiksi du/dt - ja common mode –suodin,

sinisuodin sekä RFI/EMC-suodin. Suotimien avulla voidaan moottoreiden uljännitesuojauksen ohella vähentää laakerivirtoja, moottorikaapeleiden latausvirtoja sekä sähkömagneettisia häiriöitä. Näiden neljän suotimen toimintaperiaate tullaan käsittelemään myöhemmin tässä luvussa. /49/

4.1.2 Säteilevät EMC-häiriöt

EMC-häiriöihin kuuluvat säteilevät häiriöt ovat ilman kautta siirtyviä häiriöitä, jotka syntyvät invertterin puolijohdekytkintekniikan lisäksi ohjauspiirin toiminnasta. Nämä häiriöt etenevät yleensä ympäristöönsä sähkökäyttöön liitettyjen ohjaus- ja syöttökaapeleiden kautta, niiden toimiessa antennina. Säteilevien häiriöiden ehkäisemiseksi tulee käytön kaikkien osien muodostaa niin sanottu Faradayn häkki, joka kattaa laitteiden kotelointien lisäksi kaapelit ja niiden asianmukaisen suojauksen. Kotelon tulisi olla valmistettu metallista tai vaihtoehtoisesti muovin ja metallin seoksesta. Vaihtoehtoisesti voidaan myös käyttää muovista koteloa, jonka sisäpinta on maalattu johtavalla maalilla. Faradayn häkki käsittää kojeistokaapin ohella myös kaapelit ja sen päässä olevan moottorin, mikäli käytöstä lähtevät kaapelit maadoitetaan. Maadoitus voidaan hoitaa esimerkiksi lattakaapelilla, jonka induktanssi on suurilla taajuuksilla pyöreää johdinta alhaisempi. Mikäli käytetään tavallista pyöreää kaapelia, tulee sen olla symmetrinen ja PE-johtimen tavoin pieni-impedanssinen suurilla taajuuksilla. Lisäksi kaapelissa tulee armerauksen lisäksi olla reiätön säteilysuoja, jotta radiotaajuisilta häiriöiltä suojauduttaisiin. Esimerkkinä pieni-induktiivisesta liitoksesta on 360°-liitos eli EMC-sukka (**Kuva 7.**). /49/

Säteileviä päästöjä pyritään siis estämään kaapeliensuojavaipoilla ja metallikoteloiden tiiveydellä. Tarkemmat asennuksia ja suojauksia koskevat vaatimukset selviävät EMC-ohjeista, joita noudattamalla varmistetaan käytön sähkömagneettinen yhteensopivuus ja sitä kautta sen toimivuus käyttöympäristössään. /27/, /49/



Kuva 7. Maadoitus EMC-sukalla. /27/

4.1.3 Harmoniset yliaallot

Harmonisella yliaalloilla tarkoitetaan sinimuotoisen jännitteen perusaallon kerrannaisia. Nämä verkkovirran yliaallot jakautuvat jännite- ja virtayliaaltoihin, joiden lähteenä ovat lähinnä suuntaajakäytöt. Jänniteyliaallot aiheutuvat yleensä virtayliaaltojen aiheuttamasta vastaavantaajuisesta jännitehäviöstä, joka synnyttää vääristymää jännitteeseen. Pääosin kolmivaiheisten epälineaaristen kuormien, kuten suuntaajakäyttöjen, yliaaltotaajuudet ovat parittomia eli 5., 7., 11., ja 13., yhtälön $n = p * i \pm 1$ mukaisesti, jossa n :llä tarkoitetaan yliaallon järjestyslukua, p :llä suuntaajan pulssilukua ja i :llä kokonaislukua 0,1,2,3 ... jne. Yliaaltopitoisuutta kuvataan verkon kokonaisvääristymällä eli THD-arvolla (Total Harmonic Distortion), joka kuvaa yliaaltojen suuruutta suhteessa perusaaltoon. /51/

$$THD = \frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1} = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} \quad (1)$$

Taajuusmuuttajan verkosta ottama virta on usein hyvin yliaaltopitoista, jolloin sen käyrämuoto poikkeaa siniaallosta. Nämä syöttöverkkoon johtuvat harmoniset yliaallot häiritsevät verkon normaalia käyttötilannetta esimerkiksi lisäämällä sähkökojeiden ja kaapeleiden virtalämpö-, pyörrevirta- ja hystereesihäviöitä.

Lisäksi yliaaltovirrat aiheuttavat esimerkiksi nollajohtimen ylikuormitusta 3. yliaaltovirrasta, lisäävät resonansseja kompensointikondensaattorien ja verkon välillä ja aiheuttavat erilaisia häiriöitä televerkkoon sekä suoja- ja mittalaitteiden toimintoihin. Myös erilaiset laitevauriot ovat mahdollisia. Erityisesti resonanssitilanteessa vahvistuneet yliaaltovirrat voivat johtaa kondensaattoreiden ylikuormittumiseen ja siten termisiin vaurioihin. Näin ollen yliaaltojen aiheuttamat lisähäviöt tulee huomioida verkon mitoituksessa. /51/, /55/

Verkossa esiintyviä yliaaltopitoisuuksia voidaan kuitenkin vähentää eri menetelmin, esimerkiksi suodattamalla verkkovirtaa aktiivisuodattimin tai imupiirein. Tarjolla on useita kompensointimenetelmiä, joista on tapauskohtaisesti valittava tilanteeseen paras ratkaisu tai yleensä niiden yhdistelmiä. Valinta riippuu verkon senhetkisestä tilanteesta, jonka perusteella päätetään, mitä kompensointimenetelmää verkossa voidaan käyttää. Jo edellä esitelty RFI/EMC-suodin estää esimerkiksi korkeataajuisien häiriöiden siirtymisen teollisuusverkkoon. Myös taajuusmuuttajan valinnalla sekä AC-käytön rakenteellisilla muutoksilla, kuten kasvattamalla suuntaajan pulssilukua, voidaan pienentää verkossa esiintyviä matalataajuisia yliaaltoja. Muita rakenteellisia tapoja ovat käytön sisäisen ja ulkoisen suodatuksen parantaminen sekä syötön vahvistaminen. Johtuvat harmoniset häiriöt etenevät muihin käytön laitteisiin pääasiassa maadoituksen ja syöttökaapeleiden kautta. /29/, /38/, /49/, /51/

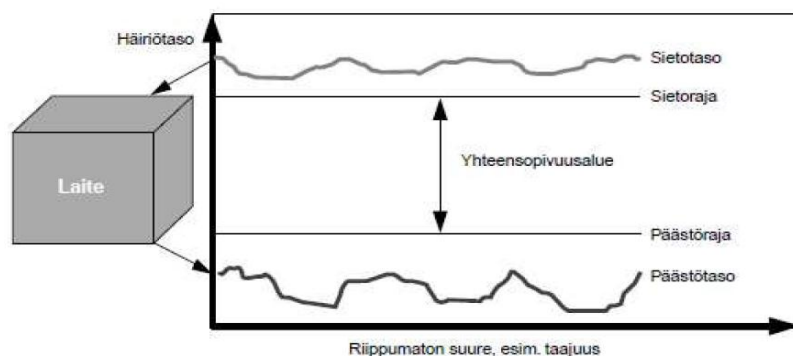
4.2 Määräykset ja direktiivit

EMC-häiriöpäästöjä ja harmonisia virtayliaaltoja on pyritty rajoittamaan erilaisin standardein ja direktiivein. Näihin lukeutuvat EMC-tuotestandardi EN 61800-3 sekä harmonisia virtayliaaltoja rajoittava eurooppalainen EN 61000-3-12 ja yleisesti Yhdysvalloissa käytetty IEEE519 - standardi. /49/

4.2.1 EMC-direktiivi taajuusmuuttajakäytölle

Sähkökäyttöjen EU-vaatimuksia säätelee lähinnä kolme direktiiviä: konedirektiivi, pienjännitedirektiivi sekä EMC-direktiivi (electromagnetic compability), joista viimeisin asettaa vaatimukset sähkökäytön häiriötasoille. Nämä direktiivit eivät sisällä yksityiskohtaisia teknisiä vaatimuksia, vaan määrittelevät keinot yleisten vaatimusten täyttämiseksi. /49/

EMC:llä eli sähkömagneettisella yhteensopivuudella tarkoitetaan elektroniikka- ja sähkölaitteiden kykyä toimia luotettavasti niille tarkoitettussa käyttöympäristössä, yhdessä muiden laitteiden tai järjestelmien kanssa häiritsemättä niiden toimintaa, ja vastaavasti häiriintymättä itse toisista saman käyttöympäristön laitteista. Ongelmien välttämiseksi tulee näiden kahden häiriötason väliin jäädä riittävän suuri yhteensopivuusmarginaali (**Kuva 8.**). EMC-direktiivin päävaatimuksena on säännellä laitteistojen sähkömagneettista yhteensopivuutta ns. yhdenmukaistetuilla standardeilla, joiden käyttö ei kuitenkaan kuitenkaan ole valmistajalle pakollista. Mikäli laite kuitenkin todetaan vaatimusten mukaiseksi, saa se CE-merkinnän. Tämä merkintä vahvistaa laitteen vastaavan eurooppalaista pienjännitedirektiiviä ja EMC-direktiivejä. Suomessa EMC-direktiivin markkinavalvontaviranomaisena toimii Tukes. /49/, /62/, /64/, /66/, /68/



Kuva 8. Sähkömagneettisten häiriöiden päästötason ja sietotason yhteensopivuus.

/27/

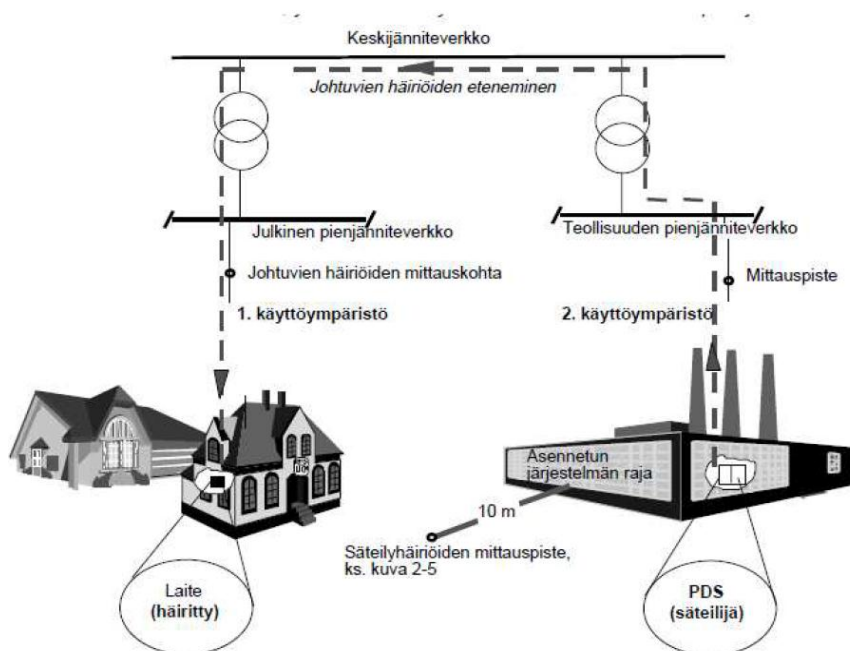
Ensisijainen standardi taajuusmuuttajakäytölle on EN 61800-3, joka on säädettyjen sähkökäyttöjen eli PDS-käyttöjen (Power Drive Systems) EMC-tuotestandardi. Standardi kattaa erityiset vaatimukset Euroopan unionin taajuusmuuttajille. EN 61800-3 –tuotestandardissa täsmennetään, että valmistajan on ilmoitettava ne keinot ja välineet, joita mahdollisesti tarvitaan taajuusmuuttajan EMC-vaatimusten täyttymiseksi sille tarkoitettussa ympäristössä. Tämä kattaa kaikki laitteet ja komponentit, joita tarvitaan sähkökäytössä EMC-vaatimusten saavuttamiseksi sisältäen suuntaajan lisäksi niin kaapelit kuin moottoritkin. Standardissa pääpaino on käyttäjien ja asentajien vastuussa noudattaa valmistajan asettamia EMC-ohjeita, johon kuuluu yleisesti seuraavat kohdat:

- suojattujen kaapeleiden käyttäminen
- kaapeleiden suojauksien kytkentä ja 360-asteinen maadoitus
- suurin sallittu moottorikaapelin pituus
- kaapeleiden keskinäinen sijainti ja moottorikaapelin erottaminen muista kaapeleista. /29/, /54/, /64/, /68/

Käyttöympäristöt häiriörajojen mukaan

EMC-tuotestandardi EN 61800-3 jakaa laitteen käyttöympäristönsä mukaan kahteen luokkaan, julkisiin ja teollisiin sähköverkkoihin (**Kuva 9.**). Ensimmäiseen käyttöympäristöön kuuluvalla julkisella sähköverkolla tarkoitetaan kotitalouksia ja laitoksia, jotka on liitetty suoraan ilman välimuuntajaa kotitalouksien pienjänniteverkkoon. Teollinen eli toiseen käyttöympäristöön kuuluva sähköverkko koskee tätä vastoin kaikkia muita, paitsi suoraan kotitalouksien pienjänniteverkkoon kytkeytyneitä laitoksia. Tästä esimerkkinä on suoraan keskijännitteeseen kytketty teollisuusverkko. Yleisimmin huomiota tuleekin kiinnittää juuri teollisuusympäristön PDS-käytöistä pienjänniteverkkoon kulkeutuviin häiriöihin. /49/

Tuotestandardissa EN 61800-3 käytöt luokitellaan edelleen häiriörajojensa perusteella luokkiin C1-C4 ja niille on määritelty sallitut häiriöpäästöjen rajat (**Taulukko 1.**). Hyvin suurille PDS-käyttöille eli luokan C4 käyttöille ei kuitenkaan ole annettu raja-arvoja. Tällaisille käyttöille tuotestandardi kehottaa laatimaan EMC-suunnitelman, jossa valmistaja antaa informaation asennettavan käytön tavanomaisista häiriötasoista käyttäjän selvittämien käyttöympäristön EMC-ominaisuuksien perusteella. Käyttäjän vastuulle jää, etteivät käytön synnyttämät häiriötasot ylitä sallittuja rajoja läheisen pienjänniteverkon puolella. /49/



Kuva 9. EMC-direktiivissä esitetyt käyttöympäristöt ja häiriöiden eteneminen.

Taulukko 1. Sähkökäyttöjen luokitus. /49/

Luokka	Käytön kuvaus
C1	Nimellisjännite alle 1000 V. Asennuskohteena ensimmäinen käyttöympäristö.
C2	Nimellisjännite alle 1000 V. Laite ei ole plug-in -tyyppinen eikä siirrettävä. Mikäli laite on tarkoitettu käytettäväksi ensimmäisessä käyttöympäristössä, asennus vaatii ammattilaisen.
C3	Nimellisjännite alle 1000 V. Asennuskohteena vain ja ainoastaan toinen käyttöympäristö.
C4	Nimellisjännite tai -virta vähintään 1000 V / 400 A tai tarkoitettu käytettäväksi toisessa käyttöympäristössä sijaitsevassa monimutkaisessa systeemissä.

4.2.2 Harmonisten yliaaltojen häiriöpäästöstandardit

Sallitut häiriöpäästöjen rajat on asetettu myös harmonisille virtayliaalloille yksi- ja kolmivaihesyötöillä, joita rajoittaa eurooppalainen standardi EN 61000-3-12 (**Taulukko 2.**). Standardi määrittää suurimman sallitun tason yleiseen sähköverkkoon syötettäville harmonisille virtayliaalloille. Se ei kuitenkaan aseta rajoja esimerkiksi osakuormille tai erityisolosuhteille, kuten suurille taajuusmuuttajakäytöille. Yliaaltojännitteille asetetut päästötasot on puolestaan määritelty standardissa SFS-EN 50160, sillä ne ovat osa jännitteen laatua. /67/ /71/

Lisäksi voidaan käyttää laajalti Yhdysvalloissa käytettyä standardia IEEE 519 (American National Standard), joka pyrkii rajoittamaan asiakkaiden yliaaltojen levittämistä. Toisin kuin eurooppalainen EN61000-3-12 –standardi, IEEE 519 ei keskity yksittäisten laitteiden rajoituksiin vaan yksittäisen asiakkaan päästöihin. /29/, /49/

4.2.3 Functional Safety (Toiminnallinen turvallisuus)

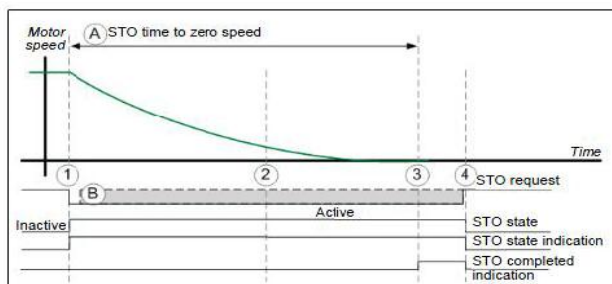
Konedirektiivissä 2006/46/EC määriteellään, että kaikkien uusien koneiden tulee täyttää tietyt laissa asetetut vaatimukset Euroopan unionin alueella. Direktiivin tarkoituksena on taata koneen turvallisuus läpi sen elinkaaren varmistamalla, että

sen suunniteltu rakenne mahdollistaa koneen käytön, ylläpidon ja konfiguroinnin minimoiden sen aiheuttamat riskit ihmisille ja ympäristölle. Turvallisuuden tarkoituksena on suojata ihmisiä vaaroilta, joita pyritään poistamaan toiminnallisen turvallisuuden (Functional Safety) avulla. Toiminnallisella turvallisuudella tarkoitetaan turvallista tilaa ylläpitäviä toimintoja, kuten laitteiston suojaustoimintoja ja automatisoituja turvaratkaisuja. Turvallisuuden edistämiseksi on luotu kaksi standardia, EN ISO 13849-1 ja EN 62061, joista konevalmistaja voi itse halutessaan valita noudatettavan standardin. Tärkeää on kuitenkin seurata samaa standardia tuotteen koko valmistuksen ajan. Näistä EN 62061 pohjautuu standardiin IEC 61508 ja se soveltuu vain sähköisille ohjausjärjestelmille. ISO 13849-1 määrittää puolestaan Performance Levelin (PL), jolla tarkoitetaan ohjausjärjestelmän osien kykyä suorittaa turvatoiminto suoritustasolla ennakoitavissa olosuhteissa. EN 62061 määrittää järjestelmälle SIL-tasot ja EN 13849-1 puolestaan PL-tasot. Koska PL-tasojen vaatimuksia on erittäin vaikea saavuttaa laajoissa, useita invertterimoduuleita sisältävässä turvaluokitelluissa järjestelmissä, käytetään turvallisuuden eheyden määrittelyssä yleisimmin SIL-tasoja. Molempien standardien noudattaminen johtaa pitkälti samaan lopputulokseen ja niiden tulokset ovat verrattavissa. Kaikki ABB:n taajuusmuuttajat noudattavat turvallisuutensa perusteella standardia EN 62061 ja siinä luokiteltuja SIL-tasoja. Tämän vuoksi tarkastelun pääpaino on asetettu juuri tälle standardille. /22/, /23/, /30/, /72/

Standardi EN 62061 on sähköisten järjestelmien turvallisuuteen suunnitteluun luotu standardi. Se sisältää suositukset sähköisten, elektronisten ja ohjelmoitavien elektroniikkajärjestelmien koneille niin suunnitteluun, integrointiin kuin niiden hyväksymiseenkin. Standardi määrittää Safety Integrity Levelin (SIL), joka kuvastaa turvallisuusfunktioiden luotettavuutta kattaen koko turvaketjun. SIL jaetaan neljään eri tasoon 1:stä 4:ään, jossa ”SIL 4” kuvastaa korkeinta turvallisuuden eheystasoa ja ”SIL 1” vastaavasti alhaisinta. Näistä tasoista vain luokat 1-3 ovat käytössä konealalla. /22/, /23/, /69/

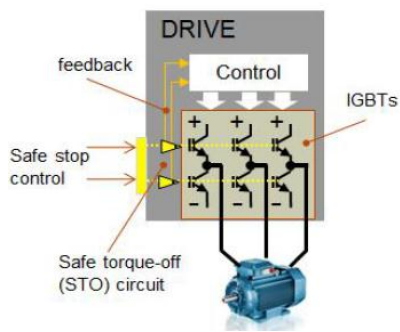
Turvatoiminnot taajuusmuuttajakäytössä

Sähkökäytölle haluttu SIL-luokitus voidaan saavuttaa taajuusmuuttajassa käytettyjen turvatoimintojen avulla, joista esimerkkinä ovat taajuusmuuttajakäytön pysäytystoiminnot. Nämä pysäytystoiminnot saavutetaan erilaisten turvatoimintojen kautta, joista esimerkkinä on ACS880-taajuusmuuttajaan sisäänrakennettu STO (Safe Torque Off) -toiminto (**Kuvat 10.-11.**). STO-toiminto estää käytön tahattoman käynnistyksen ja mahdollistaa yhdessä muiden pysäytystoimintojen kanssa moottorin turvallisen käytön ja huollon. Toiminto ei kuitenkaan katkaise virtaa kokonaan moottorilta. STO-toiminto on ACS880-taajuusmuuttajan tärkein ominaisuus ja sen avulla kyetään toteuttamaan valtaosa Industry Solutions –yksikön projekteista. Lisäksi saatavana on erillinen FSO-11 –lisämoduuli (Functional Safety Option), johon voidaan parametroida käyttöönottovaiheessa kaikki muutkin tarvittavat turvatoiminnot. Näistä neljä yleisintä tullaan käymään läpi. FSO-11 (+Q973) –moduuli mahdollistaa taajuusmuuttajan luokituksen SIL 3 –luokkaan. /8/, /10/



ID	Description
A	Time to zero speed: Time from the STO activation to the moment when the acknowledgement becomes allowed. Configured to the estimated time in which the motor coasts to a stop from the maximum speed.
B	STO request removal allowed (shaded area). The STO request must be active for at least 10 ms. The STO request must be removed before the acknowledgement is accepted.
1	STO activated after the STO request has been received (for example from the I/O)
2	Acknowledgement is no longer allowed before the motor is presumably stopped.
3	After the time to zero speed (A) has elapsed, the STO is completed and the acknowledgement is possible as soon as the STO request has been removed.
4	After the acknowledgement (manual or automatic), the STO is deactivated.

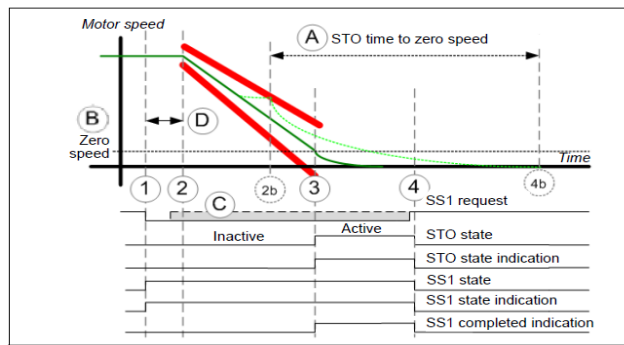
Kuva 10. STO-toiminto aktivoinnin jälkeen. /42/



Kuva 11. STO-toiminnon vaikutus ohjauspiiriin. /42/

Taajuusmuuttajakäytön pysäytystoiminnot jakautuvat pysäytystapojensa mukaan luokkiin 0 ja 1, jossa luokituksella 0 tarkoitetaan pysäytystä vapaasti pyörien ja luokalla 1 vastaavasti pysäytystä rampilla. Luokalla 0 tarkoitetaan pysäytystä, jossa moottorilta poistetaan vääntömomentti heti Stop-komennon jälkeen (STO-toiminto). Pysäytys aloitetaan välittömästi, kun ohjauselektronikan sähkönsyöttö katkaistaan. Vastaavasti rampijarrutuksessa eli luokan 1 pysäytyksessä käyttö jarrutetaan nolleen ennen moduloinnin lopettamista. Jarrutus rampilla tapahtuu ajamalla moottoria ylisynkronisella nopeudella, jolloin tehon suunta on taajuusmuuttajaan päin ja kone toimii generaattorina (SS1-toiminto). Haluttu pysäytysramppi voidaan asettaa halutuksi taajuusmuuttajan parametreissa. SS1 (Safe Stop 1) -toiminto mahdollistaa hallitun ja nopean pysäytystoiminnon, mikä on tarpeellista esimerkiksi murskain- ja nosturisovelluksissa (**Kuva 12.**). Esiteltyjen turvaoptioiden aktivoitumisen jälkeen siirrytään aina STO-tilaan. /8/, /22/, /41/

■ SS1 with ramp monitoring



ID	Description
A	Time to zero speed: Time from the STO activation to the moment when the acknowledgment becomes allowed. Configured to the estimated time in which the motor coasts to a stop from the maximum speed. Relevant only if 2b occurs.
B	Zero speed: Speed limit for activating the STO.
C	SS1 request removal allowed (shaded area). The SS1 request can be removed after a minimum down time. It must be removed before the acknowledgement is accepted.
D	Safety function response time
1	SS1 request received (for example from the I/O)
2	After the safety function response time, ramping down with SAR1 ramp and SAR1 ramp monitoring is started.
2b	If the drive has not followed the ramp, the STO is activated now and the time to zero speed (A) is started.

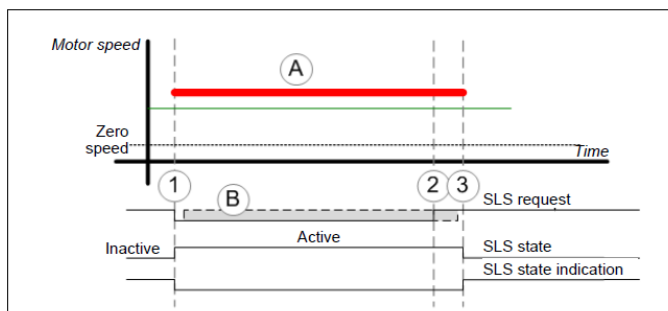
ID	Description
3	Speed goes below the defined zero limit, the SAR monitoring is stopped and the STO is activated. Note: You can define still an extra STO delay. See parameter <i>171 Zero speed delay for STO</i> .
4	After acknowledgement (manual or automatic), the STO and SS1 are deactivated, and the control is given back to the drive, which is allowed to modulate again.
4b	If the drive had not followed the ramp at 2b, acknowledgement would become allowed now.

Kuva 12. SS1-toiminto ramppijarrutuksella. /42/

Perinteisten pysäytystoimintojen lisäksi mahdollisuutena on moottorin pyörimisnopeuden pudottaminen turvanopeuteen (SLS, Safe Limited Speed – toiminto), mikä takaa turvallisuuden pysäyttämättä käyttöä (**Kuva 13.**). SLS-toiminto valvoo, ettei käytölle määriteltyä nopeusrajaa saavuteta. Käyttö voidaan asettaa turva- eli ryömintänopeudelle esimerkiksi linjakäytössä esiintyvien tukosten tai vikojen paikantamisen ajaksi. Lisäksi joihinkin saatavilla oleviin turvatoimintoihin voidaan lisätä ”jännitteet pois” –toiminto, jonka avulla varmistetaan käytön jännitteettömyys pysäytystoiminnon jälkeen. Edellä esitettyjen turvatoimintojen lisäksi saatavilla on vielä useita muita turvatoimintoja, mutta tässä yhteydessä ei niihin ole tarpeellista perehtyä. /8/, /22/, /41/

■ SLS with speed below monitored speed

This applies to both time and ramp monitoring.



ID	Description
A	SLS upper trip limit
B	SLS request removal allowed (shaded area). The SLS request can be removed after a minimum down time. It must be removed before the acknowledgement is accepted.
1	SLS is requested, the speed is below the SLS upper trip limit and so the monitoring is started.
2	SLS request is removed, but the monitoring is still on if manual acknowledgement is configured. If automatic acknowledgement is configured, the monitoring is also ended.
3	SLS is acknowledged (manually) and the monitoring is ended.

Kuva 13. SLS-toiminto. /42/

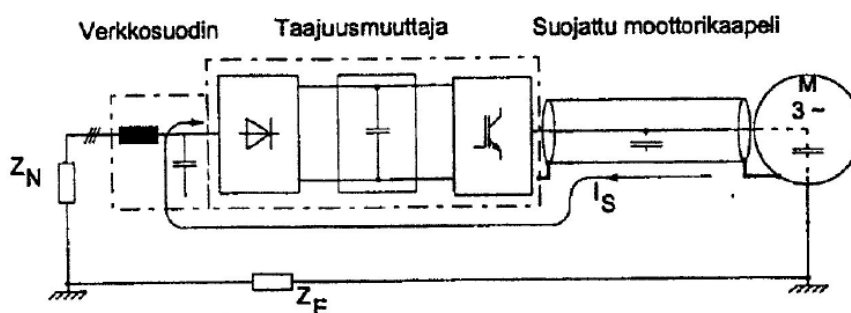
4.3 Verkkovaikutusten hallinta ja minimointi

Teollisuusverkossa esiintyviä harmonisia yliaaltoja pyritään rajoittamaan erilaisten fyysisten suotimien lisäksi taajuusmuuttajan rakenneratkaisuin. Näihin suotimiin ja rakenteellisiin ominaisuuksiin tullaan perehtymään seuraavissa alaluvuissa. Tarkkailun kohteena ovat olennaisimmat ratkaisut suuntaajakäytön aiheuttamien haitallisten yliaaltojen rajoittamiseksi.

4.3.1 RFI/EMC-suotimet

EMC- eli RFI-suodin on taajuusmuuttajan syötön puolelle asetettava passiivinen elektroninen laite, jota käytetään vaimentamaan sähkökäytön johtuvia häiriöitä. Kytkeäilmiöistä aiheutuvien nopeasti nousevien jännitepulssien aikana siirtyä häiriövirta pääosin moottorin hajakapasitanssien ja kaapelin kautta maahan aiheuttaen ongelmia sähkökäytölle. Näitä suuritaajuisia johtuvia häiriöitä voidaan kuitenkin pienentää EMC-suotimen avulla, jossa suotimen tarkoitus on johtaa häiriövirta takaisin taajuusmuuttajaan turvallista reittiä (**Kuva 13.**). Näin voidaan

estää häiriövirran kiertäminen laajalti syöttöverkossa ja sen maadoituksissa. EMC-suodinta tarvitaankin aina liitettäessä PDS-käyttö julkiseen pienjänniteverkkoon, mutta sen käyttöä suosistellaan myös teollisuuskohteissa, mikäli lähistöllä on häiriintyviä kohteita. EMC-suodinta ei kuitenkaan voi käyttää kelluvassa verkossa, jossa impedanssi on suuri tai vaiheiden ja maan välillä ei ole liitosta. /27/, /46/, /49/

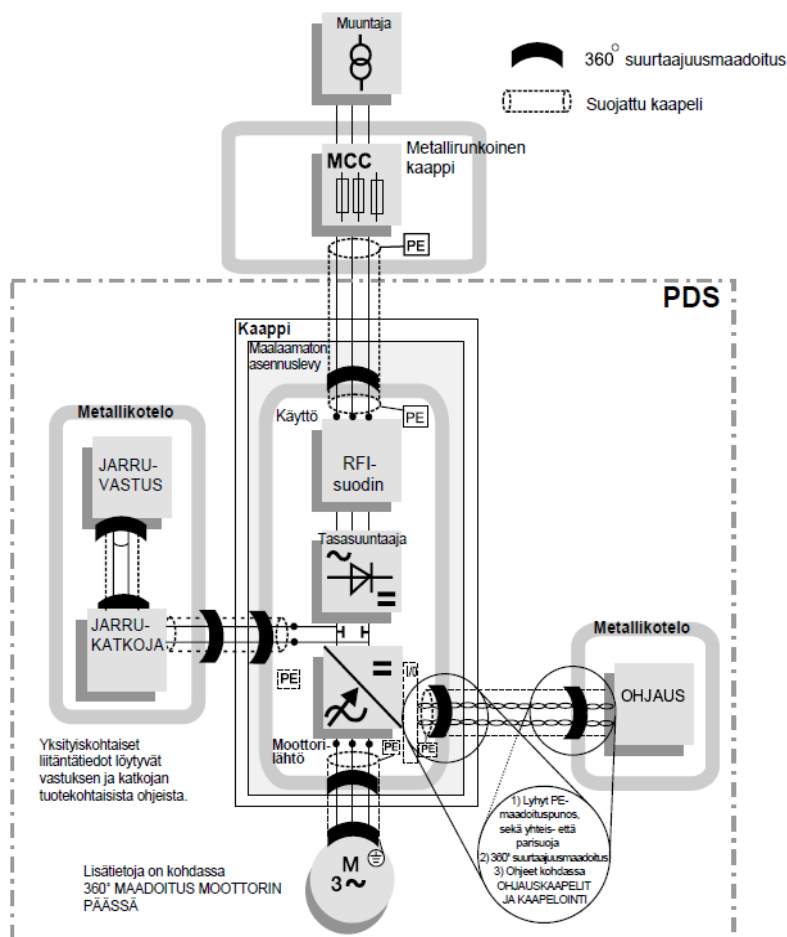


Kuva 13. Korkeataajuisen johtuvien häiriöiden johtuminen taajuusmuuttajakäytössä. /49/

Erityistä huomiota suotimen käytön yhteydessä tulee kiinnittää EMC-direktiivin mukaisiin asennustapoihin, jotta häiriövirran hallitsematonta kulkua kyettäisiin rajoittamaan. Tämä koskettaa koko sähkökäytön asennuksen kaapeleista maadoituksiin ja metallikoteloihin, sillä johtuvat häiriöt etenevät muihin laitteisiin kaikkien johtavien osien kautta. Esimerkiksi käyttämällä suojattua moottorikaapelia saadaan häiriövirta ohjatuksi hallitusti takaisin taajuusmuuttajaan, eivätkä haitalliset virrat kulkeudu hallitsemattomasti maadoituselektroneissa, kaapelikouruissa tai ohjauskaapin rungossa aiheuttaen näin vahinkoa. Moottorikaapelin suojavaippa tulee liittää taajuusmuuttajan sekä moottorin runkoon mahdollisimman suuren pinta-alan välityksellä, jotta tavoiteltu suojaustaso saavutettaisiin. Muita kaapeloinnissa huomioitavia tekijöitä ovat esimerkiksi suojavaipan huolellinen maadoittaminen sekä suuriteho- ja informaatiokaapeleiden asennus erillisiin kaapelikouruihin. Maadoitusjohtimien tulee tällöin olla mahdollisimman lyhyet asennuksen molemmissa päissä.

Esimerkkejä asianmukaisten maadoitusten toteuttamistavoista on puolestaan lueteltu jo edellä, johon kuuluvat muun muassa 360 °-maadoitus tai lattakaapeli. Lisäksi suuritaajuisten ja pieni-impedanssisien liitännöiden tulee olla tehty huolella, jotta EMC-suodin toimisi moitteettomasti. Aina tulee muistaa, että EMC-häiriöiden ehkäiseminen koskettaa koko sähkökäyttöä ja sen ratkaisuja (**Kuva 14.**). /27/, /46/, /49/

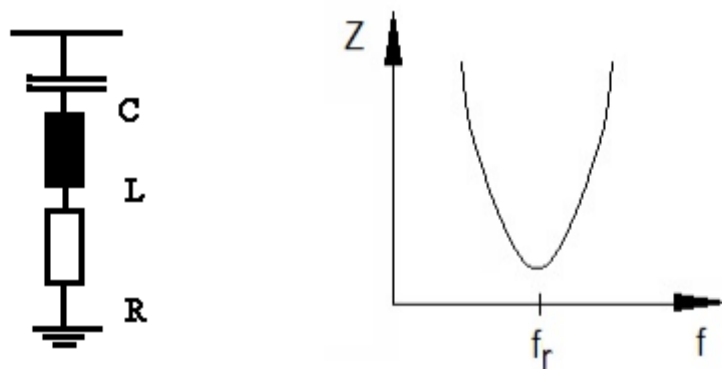
EMC-suodin voi olla erillinen komponentti, mutta yleisimmin se on integroitu osaksi taajuusmuuttajaa. Näin on menetelty esimerkiksi tarkastelun kohteina olevissa ABB:n taajuusmuuttajasarjoissa. /27/, /49/



Kuva 14. PDS-käytön asennuksen peruskokoonpano. /27/

4.3.2 Yliaaltosuotimet

Yliaaltojen teollisuusverkkoon aiheuttamiin haasteisiin voidaan vaikuttaa yliaaltosuodatuksen avulla. Passiivinen yliaaltosuodatin eli imupiiri on rakenteeltaan yksinkertaisesti sarjaresonanssiipiiri, joka on viritetty halutulle yliaaltotaajuudelle. Se koostuu sarjaan kytketystä resistanssista, käämistä ja kondensaattorista, jotka mitoitetaan tapauskohtaisesti teollisuusverkkoon sopivaksi (**Kuva 15**). Yleensä imupiiri sijoitetaan kuorman rinnalle maapotentiaalin ja sähkönsyötön välille. Imupiirin tarkoituksena on luoda tietyn taajuiselle yliaaltovirralle pieni-impedanssinen sulcutumishaara syöttävän sähköverkon rinnalle, jottei virtayliaalto pääsisi sulkeutumaan verkon kautta. Näin se suodattaa verkkoon johtuvat yliaaltovirrat ja alentaa jännitesärön vaaditulle tasolle. Imupiiri toimii kondensaattorien tavoin perustaajuisen loistehon tuottajana, mutta nyt rinnakkaisresonanssivaaraa ei ole. Parhaimmillaan sen avulla voidaan yliaalloista suodattaa jopa 90 %. Tämän vuoksi imupiirien käyttö onkin hyvä tapa suodattaa verkossa esiintyvät yliaallot. /43/, /51/, /55/, /63/



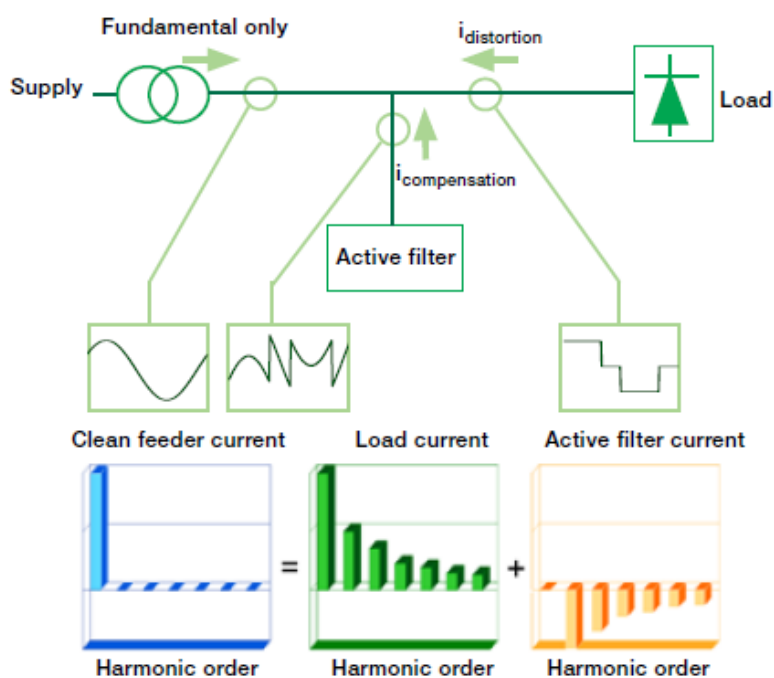
Kuva 15. Imupiirin rakenne ja sen impedanssikäyrä. /55/

Imupiiri on tehokas, mutta kallis ratkaisu yliaaltojen suodattamiseen. Kytkettäessä useampia suotimia rinnan, voidaan verkosta poistaa tehokkaasti siellä esiintyvät yliaallot. Tämä lisää verkon kustannuksia merkittävästi. Joissain tilanteissa se on kuitenkin ainoa vaihtoehto yliaaltojen vähentämiseksi, esimerkiksi aiemmin

esitellyn rinnakkaisresonanssin vuoksi tai yliaaltojen ollessa merkittävä ongelma verkossa. Käytettäessä verkkovaihtosuuntaajalla varustettua taajuusmuuttajaa, on imupiirien käyttö kuitenkin tarpeetonta. Fyysisiltä rakenteiltaan keskijännitteellä imupiiri vie lisäksi suuren tilan, sillä se on koottu isokokoisesta ilmasydämisestä käämistä ja eristystasoltaan keskijännitettä vastaavasta kondensaattoriparistosta. Pienjännitteellä imupiirit voidaan kuitenkin sijoittaa pienjännitekeskusten yhteyteen, jolloin käytetään koteloitua kojeistoa. /51/, /55/, /63/

4.3.3 Aktiivisuodattimet

Aktiivisuodatin on pienjänniteverkossa käytettävä yliaaltovirtalähde, joka on periaatteeltaan kuten invertteri (**Kuva 16.**). Sen toiminta perustuu sen itsensä tuottamiin virtayliaaltoihin, jotka ovat vastakkaisessa eli 180° :en vaihesiirrossa kuorman ottamiin virtayliaaltoihin nähden. Näin ollen yliaaltovirrat kumoavat toisensa ja kuorman verkosta ottamaan virtaan jää pelkkä perusaalto. Suodattimet voivat olla jännite- tai virtavälipiirillisiä ja ne kytketään yleensä kuorman rinnalle. /51/, /63/



Kuva 16. Aktiivisuodattimen periaatekuva. /61/

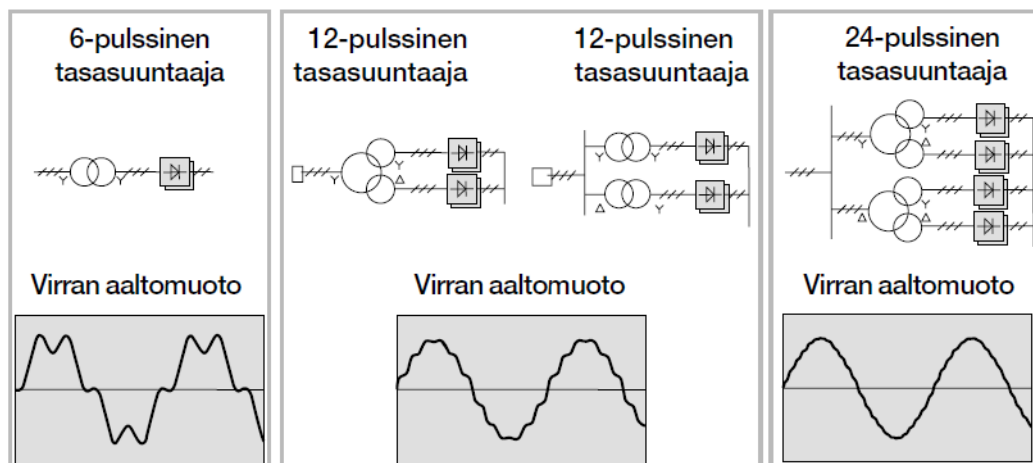
Säädettävyytensä ansiosta aktiivisuodatin kykenee mukautumaan sähköverkon muuttuviin yliaaltopitoisuuksiin, mihin imupiiri ei pysty. Näin ollen sähköverkosta ei tarvita tarkkaa yliaaltoanalyysia tai erilaisten kytkentätilanteiden tarkastelua. Tästä on erityistä hyötyä keskijännitelatteistoissa ja laajoissa sähköjärjestelmissä, joissa kuormitus ei ole tasaista prosessien vaihdellessa. Aktiivisuodatin mahdollistaa lisäksi portaattoman loistehon kompensoinnin niin induktiivisilla kuin kapasitiivisillakin kuormilla, vaikka suodatinta voidaan käyttää ilman loistehon säätöäkin. Sen avulla myös tehokerroin on säädettävissä. Aktiivisuodattimella koko verkon harmonisista yliaalloista voidaan suodattaa jopa 97 % 50. yliaaltoon saakka vain yhdellä laitteella. Suodatinta ei myöskään voida ylikuormittaa, sillä kuorman yliaaltovirtojen kasvaessa laitteen sallimaa rajaa korkeammaksi, jättää suodatin automaattisesti kapasiteetin ylittävän osan suodattamatta. /35/, /51/, /63/

4.3.4 Pulssiluvun valinta

Fyysisten suotimien lisäksi voidaan yliaaltopäästöihin vaikuttaa taajuusmuuttajan pulssiluvun valinnalla. Yleisimmin kolmivaiheisissa vaihtovirtakäytöissä käytetään edullista 6-pulssista dioditasasuuntaajaa verkkovirran tasasuuntaukseen, mikä aiheuttaa syöttöverkkoon suuren määrän yliaaltoja. Näitä yliaaltoja vähentämään joudutaan usein käyttämään suuntaajakäyttöjen yhteydessä erilaisia suotimia. Yliaaltojen esiintymiseen voidaan kuitenkin vaikuttaa myös rakenteellisin ratkaisuin.

Yliaaltoja voidaan vähentää lisäämällä normaalin 6-pulssisen dioditasasuuntaajan tilalle esimerkiksi 12-pulssinen tasasuuntaaja syöttämään yhteistä tasajännitevälipiiriä. Rakenne toteutetaan kytkemällä kaksi 6-pulssista tasasuuntaajaa rinnan, jolloin kytkentätaajuus kasvaa ja harmoniset yliaallot pienenevät. Tätä varten tarvitaan kuitenkin aina kolmikääminen muuntaja tai kaksi kappaletta kaksikäimitysmuuntajaa syöttämään tasasuuntaajia. Toiminta perustuu muuntajan toisioiden 30°:en vaihesiirtoon, jolloin osa syöttöpuolen yliaalloista kumoutuu niiden ollessa vastakkaisvaiheisia esiintyviin yliaaltoihin nähden. Siten suurimmat eli 5. ja 7. yliaalto jäävät pois. Teoriassa siis pienin esiintyvä yliaaltokomponentti muuntajan ensiossa olisi 11. yliaalto. /29/

Vastaavalla periaatteella voidaan verkossa esiintyviä yliaaltoja pienentää entisestään käyttämällä 24-pulssista tasasuuntaajaa, jossa kaksi 12-pulssista suuntaajaa on kytkettynä rinnan (**Kuva 17.**). Tällöin kolmikäämimuuntajia tarvitaan kaksi. Käytettäessä 24-pulssista tasasuuntaajaa saadaan pääosin kaikki esiintyvät pienitaajuiset yliaallot eliminoitua, mutta luonnollisesti käytön kustannukset lisääntyvät. Lisäksi pulssilukua lisättäessä 12:ta suuremmaksi tarvitaan aina käytön yhteyteen myös erikoismuuntaja, jolloin kustannukset kasvavat edelleen ja kytkennät vaikeutuvat. Joissain tapauksissa pulssiluvun lisääminen osoittautuu kuitenkin tehokkaimaksi ja jopa taloudellisimmaksi ratkaisuksi, kuten esimerkiksi suuritehoisen yksittäiskäytön tai suuren ryhmäkäytön yhteydessä. /29/



Kuva 17. Pulssiluvun valinta esiintyvien yliaaltovirtojen torjumiseen. /29/

4.3.5 Low harmonic –teknologia

Toinen rakenteellinen ratkaisu verkossa esiintyvien virtayliaaltojen vähentämiseksi on ns. low harmonic –teknologia, jolla tarkoitetaan yliaaltojen pienentämiseen käytettyä teknologiaa. Tällöin taajuusmuuttajan tasasuuntaaja korvataan IGBT-kytkimistä koostuvalla vaihtosuuntaussillalla, mikä mahdollistaa sähköenergian siirtämisen kuormasta verkkoon sekä toisinpäin. Käytännössä low harmonic –teknologialla tarkoitetaan siis verkkovaihtosuuntaajaa, jossa normaalin pätötehon syöttämisen lisäksi voidaan kompensoida verkon loistehoa ja suodattaa aktiivisesti neljää suurinta harmonista virtayliaaltoa. Vaihtosuuntaussillan käyttö onkin erittäin tehokas tapa vähentää teollisuusverkossa esiintyviä virtayliaaltoja, mutta se lisää luonnollisesti myös käytön kustannuksia. ABB:n Industry Solutions –yksikön toteuttamia ratkaisuja ajatellen verkkovaihtosuuntaajarakennetta käytetäänkin pääasiassa tehokkaaseen yliaaltojen suodatukseen, eikä varsinaisesti energian syöttämiseen takaisin syöttöverkkoon. /39/

4.4 Moottoripään ongelmien hallinta

Taajuusmuuttajakäytön aiheuttamat ongelmat moottoripuolelle ovat pääosin nopeiden jännitepulssien synnyttämät vauriot moottorin laakereille sekä moottorikaapelin ja moottorin eristyksille. Näitä ongelmia voidaan kuitenkin hallita aiemmin kappaleen 4 alla esitettyjen keinojen lisäksi erilaisten suotimien avulla.

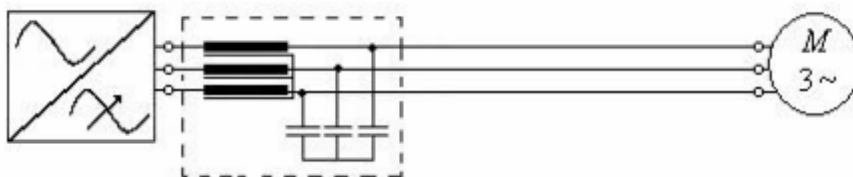
4.4.1 Du/dt-suodin

Taajuusmuuttajan moottoripään puolella käytettävän du/dt-suotimen tarkoituksena on hidastaa taajuusmuuttajakäytössä syntyvien nopeiden jännitepulssien nousunopeutta taajuusmuuttajan lähdessä. Näin jännitepulssi moottorin navoilla ei ehdi nousta kovin suureksi, ennen kuin vaihtosuuntaajalta takaisin heijastuva negatiivinen pulssi ehtii kumoamaan moottorin jännitettä. Jännitteen nousunopeus määräytyy pääosin IGBT-kytkinten toimintanopeudesta sekä kaapelin vaimentavasta ominaisuuksista. Du/dt-arvo ei ole kuitenkaan sama taajuusmuuttajan lähdessä ja moottorin liittimillä, sillä kaapelin sisältämä impedanssi vaimentaa hieman pulssin nousunopeutta. Pulssien jännite voikin nousta jopa kaksinkertaiseksi moottorin liittimissä suuren impedanssieron vuoksi, liittimien ja moottorikaapeleiden vaimennus- ja heijastusominaisuuksista riippuen. /44/, /49/, /58/

Du/dt-suodin on alipäästösuodatin, jonka avulla voidaan vähentää nopeita jännitemuutoksia ja moottorin eristyksiä rasittavia lähtöjännitteen piikkejä. Samalla pienenevät kapasitiiviset vuotovirrat, moottorikaapelin suuritaajuiset päästöt sekä suurtaajuushäviöt. Suotimen käyttö säästää lisäksi moottorin käämitystä, laakerointia ja alentaa moottorin lämpötilaa, jolloin moottorin käyttöikä pitenee. Du/dt-suotimen tarve riippuu moottorin eristyksestä, mutta sitä on syytä käyttää erityisesti yli 500 V:n jännitteillä tai mikäli moottorityypiksi ei ole valittu ylijännitteitä kestävää tyyppiä. Valitettavasti du/dt-suodin on kuitenkin

merkittävä häviölaite, joka yhdessä taajuusmuuttajan häviöiden kanssa voi aiheuttaa jopa 10 %:n jännitteenaleneman moottorille. /32/, /49/, /59/

Yleisimmin käytetty du/dt-suodin koostuu kolmivaiheisesta kuristimesta, kondensaattoreista ja mahdollisesta vastuksesta (**Kuva 18.**). Suotimen rakenne voi kuitenkin vaihdella tapauskohtaisesti. Mitoitus perustuu käytön resonanssitaajuuteen, jonka tulee olla mitoitettu taajuusmuuttajan kytkentätaajuutta suuremmaksi. Du/dt-suodin on edullinen ratkaisu, mikäli kaapeleiden maksimipituus on 30 metriä ja kytkentätaajuus on ≤ 16 kHz. /44/, /59/



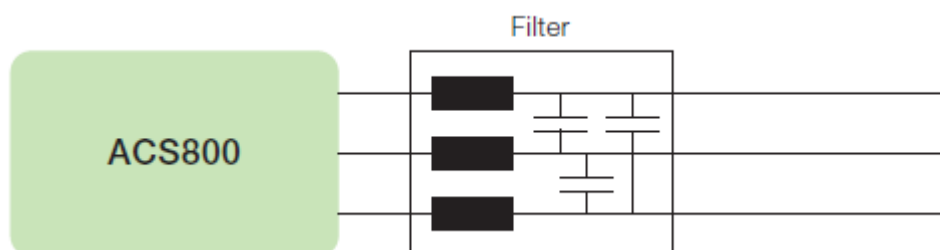
Kuva 18. Yleisimmin käytetyn du/dt-suotimen rakenne. /44/

4.4.2 Sinisuodin

Sinisuotimet ovat tehokkaimpia teollisuudessa käytettyjä suodintyyppejä moottorin ylijännitesuojauksessa. Taajuusmuuttajan lähtöön asennetun sinisuotimen tarkoituksena on muokata taajuusmuuttajan lähtöjännitteestä sinimuotoista, jolloin jännitteen tehollisarvo voi jäädä nimellistaajuudellakin alle nimellisen. Tämä tapahtuu päästämällä läpi vain jännitteen perustaajuus ja suodattamalla muut jännitteessä esiintyvät taajuuskomponentit. Tämän seurauksena moottorille syötettävä jännite ei sisällä suurjännitepiikkejä ja siten moottorin ylijänniterasitukset pienenevät. Edut ovat siis pitkälti samat kuin du/dt-suotimellakin. Sinisuotimen käyttö siis suojaa moottorin käämitystä, laakereita ja alentaa moottorin lämpötilaa sekä parantaa hyötysuhdetta ja vähentää meluhaittoja. Näin ollen moottorin elinikä pitenee. Lisäksi sinisuotimen käyttö

mahdollistaa vakiomoottoreiden käytön pitkillä kaapelisyötöillä ilman, että pitkien kaapeleiden aiheuttamia ylijänniteongelmia ilmenisi. /44/, /49/, /59/

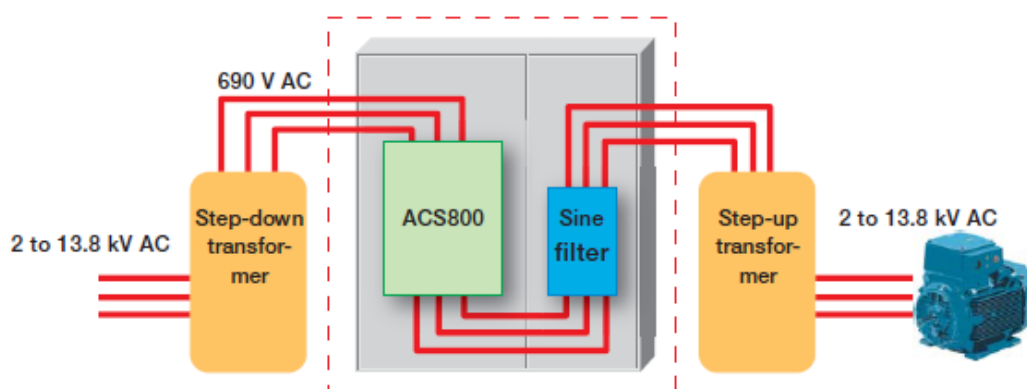
Sinisuodin on kuristimista ja kondensaattoreista koostuva alipäästösuodin, jonka rakenne ottaa huomioon käytön kytkentätaajuuden, jännitteen aleneman ja suodatusominaisuudet (**Kuva 19.**). Tämä LC-suodin suodattaa tehokkaasti lähtöjännitteen korkeataajuiset komponentit. Sinisuotimien resonanssitaajuus mitoitetaan moottorin syöttöjännitteen perustaajuuden ja taajuusmuuttajan kytkentätaajuuden välille. Resonanssitaajuuden tulee olla merkittävästi pienempi kuin taajuusmuuttajan kytkentätaajuuden, jotta suuritaajuiset kytkentäkomponentit saataisiin vaimennettua tehokkaasti. Resonanssitaajuuden tulee kuitenkin olla huomattavasti perustaajuutta suurempi, jotta suodin ei joudu resonanssiin perustaajuuden ympäristössä. Näistä syistä sinisuotimen käyttö rajoittuu usein normaalia korkeammille kytkentätaajuuksille. Periaatteeltaan sinisuodin onkin samanlainen kuin du/dt-suodin, mutta se on mitoitettu pienemmälle resonanssitaajuudelle. /44/, /49/, /59/



Kuva 19. Sinisuotimen rakenne ABB:n ACS800 taajuusmuuttajalla. /32/

Mikäli taajuusmuuttajan ja moottorin väliin joudutaan kytkemään muuntaja, on sinisuodin lähes aina tarpeellinen. Näin voi olla esimerkiksi pienjännitetaajuusmuuttajalla ohjatun keskijännitemoottorin tapauksessa (**Kuva 20.**). Tällöin sinisuotimen ansiosta voidaan blokki- eli jännitteennostomuuttajan sijasta käyttää normaalia jakelumuuttajaa jännitteennostosovelluksissa. /49/

Nopeaa dynamiikkaa vaativissa säädöissä sinisuotimen käyttö saattaa kuitenkin tuoda hankaluuksia. Heikkouksia ovat lisäksi sen tuottama häviöteho ja korkeat hankintakustannukset. Tarkasteltaessa kuitenkin sähkökäyttöä sinisuotimen kanssa ja ilman, suotimen lisäämät häviöt koko käytön kannalta ovat pienehköt sen mahdollistamiin hyötyihin nähden. Tästä esimerkikkinä sinisuotimen ansiosta pienentyneet moottorin rautahäviöt taajuusmuuttajakäytössä. Sinisuodin onkin yksinkertaisuudessaan kustannustehokas ja toimiva ratkaisu. Sinisuotimen yhteydessä on kuitenkin käytettävä taajuusmuuttajan ohjaukseen skalaarisäätöä. /44/, /49/, /59/



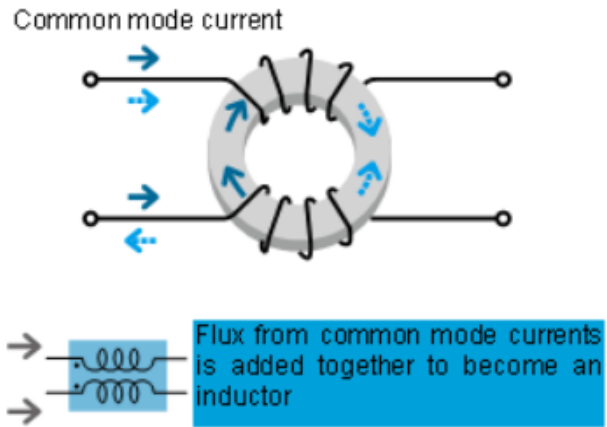
Kuva 20. Sinisuotimen käyttöesimerkki blokkimuuntajan yhteydessä. /32/

4.4.3 Common mode –suodin

Common mode –suodin on pääasiassa moottorin laakerivirtojen ehkäisemiseen tarkoitettu suodin, joka alentaa nopeussäädetyissä käytöissä esiintyvää yhteismuotoista jännitettä (Common mode voltage). Tämän jännitteen pienentämisellä alennetaan edelleen moottorissa esiintyviä laakerivirtoja, sillä yhteismuotoinen suuritaajuinen jännitepulssi toimii taajuusmuuttajakäytössä laakerivirtojen pääasiallisena lähteenä. Common mode –suotimilla ei kuitenkaan ole merkittävää vaikutusta moottorin liittimien vaihe- ja verkkojännitteisiin. /52/, /57/

Common mode –suodin koostuu rengasmaisesta, ferriitistä tai nanokiteisestä raudasta valmistetusta kuristinrenkaasta. Näistä ferriittirengas on käytössä suuritaajuisissa kohteissa. Toiminta perustuu tekniikkaan, jossa kaksi eri johdinta on kiedottu aina yhden kuristinrenkaan ympärille vastakkaisiin suuntiin (**Kuva 21**). Lopputuloksena yhteismuotoisen virrankulkiessa käämien läpi, luo se toisiaan vahvistavat samansuuruiset ja -vaiheiset magneettikentät, synnyttäen suuren impedanssin yhteismuotoiselle virralle. Näin olen common mode –suotimet toimivat kuristimina vain yhteismuotoisilla jännitteillä, estäen yhteismuotoisen virran kulun ja päästäen läpi vain eromuotoiset virrat. Suotimen ferromagneettisen sydämen induktanssin tarkoituksena on siis lisätä yhteismuotoisia jännitteitä sisältävään virtapiiriin impedanssia, joka vähentää yhteismuotoisen jännitepulssin jyrkkyyttä. Näin jännitteen du/dt -arvo pienenee ja siten yhteismuotoinen haitallinen virta vaimenee. Suodin voidaan asentaa esimerkiksi taajuusmuuttajan sisääntulokaapeleihin, välipiiriin tai moottorikaapeleihin. Yhteismuotokuristimia käytetään usein EMC-suojaukseen. /40/, /52/, /57/

Common mode –suotimen hyödyt ovat edullisuutensa lisäksi pitkälti du/dt - ja sinisuotimen kaltaiset. Se suojaa moottorin käämitystä, alentaa moottorin lämpötilaa ja pidentää moottorin käyttöikää. Lisäksi kapasitiiviset vuotovirrat, moottorikaapelin suuritaajuiset päästöt sekä suurtaajuushäviöt pienenevät.



Kuva 21. Common mode –suotimen rakenne ja toimintaperiaate. /57/

5 TARKASTELTAVAT ABB:N TAAJUUSMUUTTAJAT

ABB on maailman johtava nopeussäädettyjen käyttöjen toimittaja, jonka tarjonta kattaa ratkaisut erilaisiin teollisuuden aloihin ja sovellutuksiin. ABB:n tarjoama tuotealue sisältää ratkaisut aina pienjännitteisistä AC- ja DC-taajuusmuuttajista keskijännitekäyttöihin saakka. Pienjännitetaajuusmuuttajat ja keskijännitekäytöt jaetaan edelleen omiin osa-alueisiinsa niiden käyttökohteidensa ja tehoalueidensa perusteella, joista tässä työssä keskitytään vain pienjännitteisiin teollisuustaajuusmuuttajiin sekä keskijännitteen standardimoottoriratkaisuihin. Näitä ovat teollisuustaajuusmuuttajiin kuuluvat ACS800- ja ACS880-tuotesarjat sekä keskijännitekäyttöjen ACS1000- ja ACS2000-sarjat. ABB:n Industry Solutions –yksikön ratkaisujen kannalta nämä taajuusmuuttajaperheet ovat kaikkein merkittävimpiä ja siitä syystä tässä työssä on syvennytty juuri niiden tarkasteluun osana sähkökäyttöä. /36/

Seuraavissa alaluvuissa tullaan esittelemään edellä mainitut taajuusmuuttajien toiminnalliset ja rakenteelliset ominaisuudet sekä syyt juuri näiden tuoteperheiden käytölle. Tarkasteluissa keskitytään ainoastaan taajuusmuuttajien single drive – toteutuksiin.

5.1 ACS800- ja ACS880-taajuusmuuttajat, single drives

ACS800 ja ACS880 ovat ABB:n lanseeraamia pienjännitetaajuusmuuttajaperheitä, jotka on räätälöity erityisesti prosessiteollisuuden tarpeisiin (**Kuva 22.**). Nämä taajuusmuuttajat käyttävät ohjaustoiminnoissaan jo aiemmin esiteltyä DTC-säätöä, mikä tekee niiden suorituskyvystä erinomaisen verrattaessa muilla säätötavoilla toteutettuihin taajuusmuuttajiin. Näistä tuotesarjoista ACS880 on vuonna 2012 markkinoille tuotu päivitetty versio ACS800-sarjasta, jonka käyttöön on siirrytty luonnollisesti teknologian kehityksen seurauksena. Yksi merkittävimmistä eroista näiden välillä on ACS880-sarjaan lisätyt turvallisuustoiminnot, jotka mahdollistavat ACS880-taajuusmuuttajien luokituksen SIL 3 –luokkaan. /8/, /11/, /12/, /25/, /37/

ABB on lanseerannut teollisuusprosessien tarpeisiin myös vakiotaajuusmuuttajiin lukeutuvan ACS550-mallin. ACS550 on teknisiltä ominaisuuksiltaan hieman rajoittuneempi kuin ACS800 ja myös sen hinta on alhaisempi. Huolimatta tästä, ei Industry Solutions –yksikkö kuitenkaan yleensä käytä sarjaa toteutuksissaan. Syynä tähän ei ole ACS550-taajuusmuuttajan teknisten ominaisuuksien riittämättömyys, vaan ACS800-sarjan käyttö standardiratkaisuna yksikön sisällä. Standardiratkaisujen käyttö helpottaa projektien suunnittelua, käyttöönottoa, varaosahallintaa, asennusta sekä huoltoa, mitkä johtavat edelleen säästöihin. Tämän vuoksi ACS800/ACS880-tuotesarjan käyttö vakioratkaisuna projekteissa on kannattavampaa, vaikkei yksittäisen taajuusmuuttajan kannalta suoranaista säästöä syntyisikään. /33/



Kuva 22. Esimerkki ACS800- ja ACS880-taajuusmuuttajista. /42/

5.1.1 Rakenneratkaisut

ABB:n teollisuustaajuusmuuttajat räätälöidään aina projektin tarpeiden mukaisesti, jolloin taajuusmuuttajat vastaavat asiakkaan vaatimuksia. Tämän mahdollistaa ACS880-sarjan taajuusmuuttajien kattava varustelu erilaisilla optioilla, mikä tekee niistä erittäin joustavia sovellusten eri tarpeisiin. Näiden sisäänrakennettujen optioiden eli lisävarusteiden valinta tapahtuu projektikohtaisesti kulloisenkin projektistandardin mukaan, pääsääntöisesti ABB:n omia suunnittelukäytäntöjä noudattaen. Mikäli asiakkaalla ei ole omia vaatimuksia, valitaan lisäosat ABB:n omien vakioratkaisujen mukaan. Optioita ovat muun muassa erilaiset jarrukatkojat ja -vastukset, du/dt-, sini-, common mode - ja RFI/EMC-suotimet, I/O-laajennusmoduulit sekä parametointi- ja monitorointityökalut kuten NETA-21 –kaukomonitorointityökalu ja Drivecomposer-tool. Näistä esimerkiksi suotimet valitaan pienempiin taajuusmuuttajiin aina erikseen, kun taas suuremman tehoalueen taajuusmuuttajissa ne ovat oletusarvoisesti jo osana rakennetta. /8/, /12/

ABB käytöt tarjoavat lisäksi erilaisia turvallisuusoptioita kuten Safe Torque Off (STO) –toiminnon, jonka avulla voidaan ehkäistä käytön tahaton käynnistys. STO-toiminto on sisäänrakennettuna standardiratkaisuna kaikissa ACS880-sarjan malleissa, mahdollistaen laitteen SIL 3 –luokituksen kahdennettuja johdotuksia käytettäessä. Muita turvallisuusfunktioita kaappiasenteisiin käyttöihin ovat muun muassa Safe Stop 1 (SS1), Safely Limited Speed (SLS) ja Safe Stop Emergency (SSE), joita voidaan käyttää SIL 3 –luokituksen saavuuttamiseksi (**Kuva 23**). Muita lisävarusteina saatavia turvallisuustoimintoja on nähtävillä kuvasta 23. Pelkällä SS1:llä ja STO-toiminnolla saavutetaan ACS800-taajuusmuuttajien luokitus SIL 2 –luokkaan. /8/, /12/, /25/

Functional safety Standard	Safe torque-off (STO according EN 61800-5-2) IEC 61508 ed2: SIL 3, IEC 61511: SIL 3, IEC 62061: SIL CL 3, EN ISO 13849-1: PL e
With internal safety option	Safe stop 1 (SS1), safely-limited speed (SLS), safe stop emergency (SSE), safe brake control, (SBC) and safe maximum speed (SMS) IEC 61508 ed2: SIL 3, IEC 61511: SIL 3, IEC 62061: SIL CL 3, EN ISO 13849-1: PL e TUV Nord certified ***

C = chemically active substances
S = mechanically active substances
* For higher output frequencies please contact your local ABB office
** The operational frequency of the FSO-11 is up to 300 Hz of the drives output
*** Please check availability for -07

Kuva 23. ACS880-taajuusmuuttajan toiminnallinen turvallisuus ja SIL-luokitus.

/9/

Optioiden lisäksi jännite- ja tehoaluevalikoima on laaja, mikä mahdollistaa taajuusmuuttajien käytön 690 V:lla tehoalueen yltäessä jopa 5,6 MW:iin saakka. Toistaiseksi 690 V:n toteutuksissa käytetään vanhempaa ACS800-sarjan taajuusmuuttajaa, sillä ACS880-sarjaa ei ole vielä julkaistu kaikille teho- ja jännitealueille. Laajojen optioiden ja tehoalueensa vuoksi ACS800-tuotesarja onkin käytössä standardiratkaisuna yksikön sisällä. Muita tuotesarjan tärkeitä etuja ovat laaja tuotevalikoima sekä laitteiden yhdenmukaisuus. /8/, /12/

Single drives –taajuusmuuttajia on saatavilla seinä-, lattia- ja kaappiasennuksina sekä kojeiston sisälle asennettavina moduuleina. Moduuleita lukuunottamatta taajuusmuuttajien suojausluokkana käytetään standardiratkaisuna IP21:ä ja tarvittaessa korkeampi suojausluokka on mahdollista saavuttaa optioiden avulla. Moottorikaapeleiden enimmäispituutena ACS800-taajuusmuuttajassa suositellaan käytettäväksi ≤ 100 m ja ACS880:ssa ≤ 150 m. Pidempiäkin kaapelipituuksia on mahdollista käyttää, mutta tällöin EMC-vaatimukset eivät välttämättä täyty. /8/, /12/

Seinämallit

Seinälle asennettavia taajuusmuuttajia ovat perinteisen ACS800-01:n lisäksi vastaava taajuusmuuttaja laivakäyttösovellutuksiin, verkkoonjarruttava ACS800-11 sekä low harmonic –teknologialla toteutettu ACS800-31. Standardiratkaisuna

ACS800-tuotesarjassa käytetään IP21-suojaluokitusta, mutta optiot mahdollistavat ACS800-01-taajuusmuuttajan luokituksen jopa IP55:een saakka. Jännitealue on välillä 400-690 V, jossa 400 V:lla pienin nimellinen teho on 1,5 kW ja 690 V:lla vastaavasti 11,0 kW. ACS800-01:n lisävarusteita ovat vakioratkaisujen, kuten yliaaltokuristimen lisäksi muun muassa EMC-suodin, STO-toiminto, laajennettava I/O-yksikkö sekä jarrukatkoja. Tehoalueeltaan ACS800-01 sallii käytön 0,55 kW:sta 220 kW:iin asti. Prosessiteollisuuden ratkaisuisa seinäasennuksia käytetään kuitenkin melko harvoin. /8/, /12/, /25/

Olenneisimmat ACS800-01-taajuusmuuttajan rakenteelliset standardiominaisuudet ovat:

- IP21-suojaluokitus
- tehoalue 0,55-220 kW
- jännitealue 230-690 V
- SIL 3 –luokitus
- yliaaltokuristin
- seinäasennus.

Moduulit

MCC:n sisälle asennettavat ACS800-04/ACS800-04M single drive –moduulit soveltuvat rakenteensa ja kokonsa puolesta sähkötilaan asennettavaksi. Moduulien pieni koko ja useat sisäänrakennetut lisävarusteet vähentävät asennustyön tarvetta ja lisäävät asennuksen joustavuutta. Esimerkiksi erillinen ohjausyksikkö mahdollistaa helpon pääsyn I/O –liittimiin ilman, että taajuusmuuttajaa tarvitsee avata. Standardiratkaisuna ACS800-04-taajuusmuuttajamoduuleissa käytetään suojausluokituksena IP00:aa, sillä keskukseen asennettavan rakenteensa vuoksi ei korkea IP-luokitusta ole tarpeellista käyttää. Moduulien tehoalue ylittää 0,55 kW:sta 1900 kW:iin saakka 230-690 V jännitteellä. /8/, /12/

Moduuli sisältää oletuksena yliaaltokuristimen sekä lisäoptioina muun muassa jarrukatkojan, common mode - ja EMC-suotimen. Lisäksi

taajuusmuuttajamoduuleihin on tarjolla laaja skaala erilaisia I/O-kommunikaatio-
optioita ja kenttäväylämoduuleita. Asiakkaalla on valittavanaan useita erilaisia
lisävarusteita, jonka lisäksi moduulit voidaan kustomoida esimerkiksi
asennustapansa tai lähtöjen mukauttamisen avulla. /8/, /12/, /15/

Olellisimmat rakenteelliset ACS880-04-taajuusmuuttajan
standardiominaisuudet on listattu alle:

- IP00-luokitus
- tehoalue 0,55-1900 kW
- jännitealue 230-690 V
- SIL 3 –luokitus
- yliaaltokuristin
- moduuli.

Kaappiasennukset

Suuret, omalla syötöllään varustetut teollisuustaajuusmuuttajat asennetaan lattialle
omana keskuksenaan (**Kuva 24.**). Esimerkkinä ovat yleisimmin käytetty ACS800-
07, verkkoonjarruttava ACS800-17 ja low harmonic –teknologialla toteutettu
ACS800-37 sekä näiden taajuusmuuttajien vesijäähdytteiset mallit.
Prosessiteollisuuden ratkaisujen kannalta painopiste on raskaisiin teollisuuden
käyttöihin suunniteltu ACS800-07 single drive –taajuusmuuttaja, jonka tehoalue
yltää 400 V:lla 1,45 kW:iin ja 690 V:lla jopa 2,8 MW:iin saakka. Siinä missä alle
560 kW:n sähkökäytöt voidaan vielä toteuttaa kompakteilla moduuleilla, tämän
teholuokan käytöt sisältävät erillisen tasasuuntaus- ja vaihtosuuntausyksikkönsä.
Nämä yksiköt on kytketty toisiinsa rinnan plug in –teholiittimien avulla, mikä
mahdollistaa yksiköiden helpon huollon ja käytön. Standardiratkaisuna
suojaluokituksessa käytetään IP21:ä, mutta ACS800-07 mahdollistaa erilaisten
optioiden avulla luokituksen jopa IP54R:ään saakka. Käytännössä näin korkea
luokitus ei ole useinkaan tarpeellinen, sillä taajuusmuuttajat asennetaan omaan
sähkötilaansa. /8/, /12/, /25/

ACS800-07-taajuusmuuttajan standardiominaisuuksia ovat esimerkiksi sisäänrakennettu yliaaltokuristin, 2. käyttöympäristön EMC-suodin, du/dt- ja common mode –suotimet sekä laajennettu ohjelmoitava I/O-yksikkö. Vakiotuotteeseen voidaan tarpeen vaatiessa myös asentaa lisäkaappi asiakkaan omia laitteita varten. Tarkemmat vakio- ja lisäominaisuudet ovat nähtävillä taajuusmuuttajia koskevista esitteistä. /8/, /12/, /25/

ACS800-07-taajuusmuuttajaan on saatavilla myös useita lisäominaisuuksia täyttämään eri teollisuussovellusten tarpeet. Näitä ovat esimerkiksi moottorin vahinkokäynnistyksen esto, pääkontaktori ja ATEX-hyväksytyt moottorin suojaus, joka mahdollistaa taajuusmuuttajan käytön räjähdysvaarallisissakin tiloissa. Lisävarusteina voidaan asentaa myös STO- ja SLS-turvatoiminnot sekä hätäseis-toiminto kategoriaan 0 ja 1. ACS800-07-taajuusmuuttajaan STO-toiminto kuuluu vakio-ominaisuutena. ACS800-07-taajuusmuuttaja on lisäksi saatavilla laivakäyttösovellutuksiin. /8/



Kuva 24. ACS800-07-taajuusmuuttajan rakenne. /8/

Nestejäähdytteiset single drive –taajuusmuuttajat mahdollistavat sähkökäytöt suuritehoisissa teollisuus- ja laivakäyttösovelluksissa. Vesijäähdytys vähentää jäähdytyksestä syntyviä meluhaittoja ja edistää lämmön siirtymistä, mikä mahdollistaa taajuusmuuttajan käytön vaativissakin sovelluksissa. Tehostuneen lämmönsiirron ansiosta saadaan käytön tehoaluetta nostettua. Esimerkiksi ACS800-07-taajuusmuuttajan tehoalue ylittää vesijäähdytteisenä 200 kW:sta jopa 5,6 MW:iin, vastaavan tehon ollessa ilmajäähdytteisenä puolet pienempi, 2,8 MW. Jännitteenä käytetään 380-690 V. Standardiratkaisuna käytetään IP42-suojaluokitusta, mutta lisäoptioilla mahdollisesta koteloitinta IP54:ään saakka. /8/, /15/

Yhteenvetona tärkeimmät ACS880-07-taajuusmuuttajan rakenteelliset ominaisuudet on listattu alle:

- suojausluokka
ilmajähdytteinen: IP21, vesijähdytteinen: IP42
- mahdollisuus SIL 3 –luokitukseen
- tehoalue
ilmajähdytys: 75-2800 kW, vesijähdytys: 200-5600 kW
- jännitealue 400-690 V
- STO-toiminto (ACS880-07)
- yliaaltokuristin
- 2. käyttöympäristön EMC-suodin
- du/dt-suodin
- common mode - suodin
- laajennettu ohjelmoitava I/O-yksikkö
- kaappiasennus.

5.1.2 Toiminnalliset ominaisuudet

ABB tarjoaa teollisuustaajuusmuuttajia tavanomaisimpien prosessiteollisuudessa käytettyjen ratkaisujen lisäksi esimerkiksi low harmonic –toteutuksiin ja verkkovaihtosuuntaukseen. Rakenteellisilta ominaisuuksiltaan nämä taajuusmuuttajat poikkeavat käyttötarkoituksensa perusteella perinteisellä 6-pulssisella dioditasasuuntaajalla toteutetuista taajuusmuuttajista. Yksinkertaisimmillaan 6-pulssinen tasasuuntaajamoduuli voidaan korvata 12-pulssisella dioditasasuuntaajalla, jolloin syntyviä harmonisia yliaaltovirtoja saadaan pienennettyä aiemmin kappaleessa 4.3.4 esitetyn teorian mukaisesti. Näin voidaan menetellä esimerkiksi yleisimmin käytetyn ACS800-07-taajuusmuuttajan yhteydessä. /8/

Verkkoonjarruttavat taajuusmuuttajat

Rakenteellisilta ominaisuuksiltaan perinteisestä dioditasasuuntaajasta poikkeavia taajuusmuuttajia ovat esimerkiksi verkkoon jarruttavat sekä low harmonic -teknologialla toteutetut taajuusmuuttajat. Esimerkiksi ABB:n tarjoamia verkkoon jarruttavia taajuusmuuttajia ovat ACS800-sarjan seinälle asennettava ACS800-11 ja kaappiasenteinen ACS800-17 sekä jälkimmäisen vesijäähdytteinen malli. Nämä taajuusmuuttajat mahdollistavat jarrutusenergian ohjaamisen takaisin syöttöverkkoon lisäten näin käytön energiatehokkuutta. Tällöin myöskään jarruvastusta ei tarvita. /8/

Raskaampiin teollisuuskäyttöihin tarkoitettu ACS800-17-malli on rakenteensa puolesta pitkälti ACS800-07:n kaltainen, mutta nyt seinälle asennettavan ACS800-11 tavoin se sisältää verkkoonjarrutukseen tarvittavan LCL-suotimen, aktiivisen syöttöyksikön sekä latauspiirin. Näistä aktiivinen syöttöyksikkö sallii moottorin nelikvadranttikäytön, mikä yhdessä DTC-säädön kanssa mahdollistaa syöttöjännitteen vaihtelun kompensoinnin. Kompensointi takaa, etteivät sähköverkon jännitteenalenemat aiheuta sähkökäytön komponenteille vahinkoa. Latauspiirin tarkoituksena on puolestaan tehostaa ulostulojännitettä, mikä takaa täyden moottorijännitteen syöttöjännitteen mahdollisesti jäädessä alle nimellisen. /8/

Low harmonic –taajuusmuuttajat

Low harmonic –teknologialla toteutettuja taajuusmuuttajia ovat ACS800-31, ACS800-37 ja ACS800-37LC, jotka verkkoonjarruttavien taajuusmuuttajien tavoin sisältävät tasasuuntaajan asemasta vaihtosuuntauksen mahdollistavan IGBT-kytkimistä koostuvan sillan alaluvussa 4.3.5 esitetyn mukaisesti. Näistä seinälle asennettava ACS800-31 on pienille ja lattia-asenteinen ACS800-37 vastaavasti suurille tehoille suunniteltu taajuusmuuttaja. Molemmat sisältävät sisäänrakennetun aktiivisen syöttöyksikön ja low harmonic –suotimen, mikä mahdollistaa 12- tai 18-pulssistakin ratkaisua paremman suodatuksen ilman

ulkoisen suodatuksen tai monikämmimuuntajien tarvetta. Lisäksi verkon epätasapaino tai sen puutteet ovat hallittavissa. Lopputuloksena saadaan pienten harmonisten virtayliaaltojen osuutta syöttöverkossa pienentyneeksi alle 5 %:iin, mikä täyttää IEEE 519 –standardin mukaiset vaatimukset heikoimmassakin verkossa. Lisäksi käytön tehokerroin kyetään aina pitämään arvossa $\cos\phi = 1$. /8/

5.2 Keskijännitetaajuusmuuttajat

ABB valmistaa nopeussäädettyjä käyttöjä ja pehmokäynnistimiä keskijännitesovelluksiin 250 kW:n tehosta yli 100 MW:n toteutuksiin. Kaikki keskijännitetaajuusmuuttajat ovat kaappiasenteisia ja niitä on saatavilla ilma- tai vesijäähdytteisinä erilaisin syöttömahdollisuuksin. Osa tuotteista on toteutettu ulkoisella tai sisäänrakennetulla syöttömuuntajalla ja osa mahdollistaa kytkemisen suoraan sähkönsyöttöön ilman muuntajaa, säästäten siten tilaa. Tarkastelun kohteena olevat yleisimpiin keskijännitekäyttöjen sovellutuksiin tarkoitettut ACS1000- ja ACS2000-teollisuustaajuusmuuttajat, joita käytetään vakiomoottorikäytöissä pääosin pumppujen, puhaltimien, tuulettimien ja sekoittimien ohjaukseen (**Kuva 25**). Kaikki ABB:n keskijännitekäytöt on varusteltu Emergency off/emergency stop –toiminnoilla. Erilaisin optioin sallitaan käyttöjen SIL 3 –luokitus. Ohjaustapana käytetään DTC-säätöä, mikä mahdollistaa käytön vaativaakin tarkkuutta tarvitsevilla sovellutuksissa. /7/, /19/, /34/



Kuva 25. ACS1000- ja ACS2000-keskijännitetaajuusmuuttajat. /8/

ACS1000

ACS1000-taajuusmuuttajasarja mahdollistaa oikosulkumoottorin nopeuden ja momentin ohjauksen tehoalueella 315-2000 kW, vesijäähdytteisen mallin yltäessä 5000 kW:iin. Standardiratkaisuna suojaluokituksessa käytetään IP21:ä ja vesijäähdytteiselle mallille IP31:ä. Erilaisten optioiden avulla mahdollistetaan lisäksi vesijäähdytteisen mallin luokitus jopa IP54:än saakka. Jännitealue on välillä 2,3-4,16 kV:a. /19/, /21/

Ilmajäähdytteinen malli voidaan toimittaa joko erillisen syöttömuuntajan kanssa (ACS1000) tai täysin integroituna ratkaisuna (ACS1000i), jolloin ratkaisu sisältää syöttömuuntajan lisäksi ylimääräisen teholähteen jatarvittaessa myös kontaktorin. Ratkaisun joustavuus mahdollistaa esimerkiksi ulkopuolelle asennettavien ilmaeristeisten muuntajien korvaamisen öljyeristeisillä vastaavilla. Näin esimerkiksi lämpöhäviöt eivät pääse haihtumaan sähkötiloihin, kuten sisätiloihin asennettavilla muuntajilla. Toisaalta taajuusmuuttajaan integroitu muuntaja vähentää asennustilan tarvetta ja helpottaa käyttöönottoa sekä asennusta. Valittavana on useita lisävarusteita, jotka mahdollistavat toteutuksen asiakkaan tarpeiden mukaisesti. Esimerkkinä moottorin ja muuntajan valvonta, pulssiluvun valinta sekä prosessien kauko-ohjaus- ja diagnostiikkajärjestelmä asiakkaan

vaatimusten mukaisesti. ACS1000:n tekniset ja toiminnalliset pääpiirteet ovat nähtävillä taulukossa 2 ja kuvassa 26. /19/, /21/

Taulukko 2. ACS1000:n tekniset pääpiirteet. /34/

Motors Induction motors; ACS 1000: 315 – 2000kW air cooled 1800 – 5000kW water cooled ACS 1000i: 315 – 2000kW air cooled	Efficiency of converter ACS 1000 typically > 98% ACS 1000i typically > 96% (incl. integrated transformer)
Enclosure classes ACS 1000 <u>Standard:</u> <u>Optional:</u> Air cooled: IP21, IP22, IP31, IP32, IP42 Water cooled: IP31, IP54 ACS 1000i: IP21, IP42	Overload capacity <u>Standard:</u> Normal use, 10% short term overload capacity allowed for one minute every 10 minutes <u>Optional:</u> For higher overload capacity contact ABB
Input bridge ACS 1000 <u>Standard:</u> 12-pulse <u>Optional:</u> 24-pulse ACS 1000i <u>Standard:</u> 24-pulse	Input power factor Fundamental: > 0.97; Total: > 0.96
Output voltage <u>Standard:</u> Sinusoidal, 0 – 2.3kV, 0 – 3.3kV, 0 – 4.0/4.16kV Nominal output voltage 4.0kV according to NEMA MG1. 4.16kV is available on request.	Inverter type Three-level Voltage Source Inverter (VSI) with fast-switching power semiconductors – Integrated Gate Commutated Thyristors (IGCTs), without parallel or series connected devices

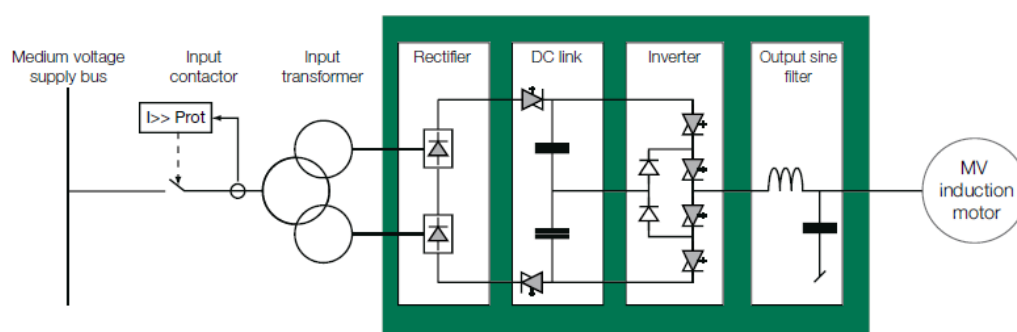
ACS 1000 highlights

Features
<ul style="list-style-type: none"> – Air-cooled power range 315 kW to 2 MW (2.3, 3.3, 4.0, 4.16 kV) – Water-cooled power range 1.8 to 5 MW (3.3, 4.0, 4.16 kV) – Available with an integrated input transformer or for connection to external input isolation transformer – Output sine filter for pure sinusoidal voltage and current outputs – For induction motors – Marine certification available for ABS, CCS, DNV

Kuva 26. ACS1000:n toiminnalliset pääpiirteet. /31/

ACS1000-taajuusmuuttajat voidaan varustella sähköverkon olosuhteista riippuen joko 12- tai 24-pulssisella dioditasasuuntaajalla, joista 24-pulssinen suuntaaja voidaan asentaa optiona. Näin ollen ACS1000 vaatii aina syöttöpuolelle

kolmikäämimuuntajan (**Kuva 27**). Pulssiluvun lisääminen takaa harmonisten virta- ja jänniteylijaltojen pysymisen niille asetetuissa rajoissa, jolloin saavutetaan IEEE519- , IEC- ja EN-standardien mukaiset vaatimukset. Ylimääräisiä ylijallosuotimia tai verkon harmonista analyysia ei siten tarvita, mikä puolestaan säästää kustannuksissa. Muita rakenteellisia ominaisuuksia ovat vaihtosuuntaajan tehopoulijohteina käytetyt IGCT-kytkimet (Integrated Gate Commutated Thyristor), jotka ovat ideaalisia suuritehoisiin sovellutuksiin. /19/, /21/



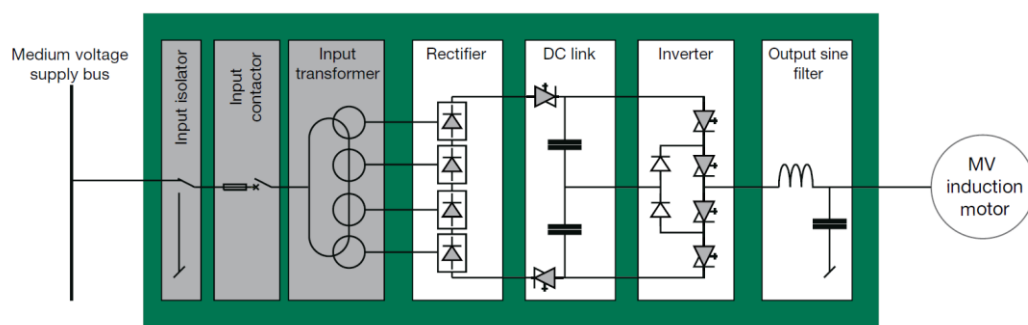
Kuva 27. ACS1000-taajuusmuuttajan tyypillinen rakennekuva. /19/

Vakioratkaisu sisältää sisäänrakennetun sinisuotimen, mikä takaa sinimuotoisen syöttöjännitteen ja -virran moottorille. Tämä sallii standardin mukaisten moottoreiden ja moottorikaapeleiden käytön sekä pienentää moottorin käyntiääntä. Moottorikaapeleiden maksimipituudeksi on asetettu 1000 m, mutta tarvittaessa voidaan ratkaisu toteuttaa myös pidemmällä kaapeleilla.

ACS1000 taajuusmuuttajat soveltuvat lähes kaikkiin keskijännitesovelluksiin ja ne on mahdollista asentaa jälkikäteen jo käytössä oleville moottoreille. Muita etuja ovat ratkaisun sulakkeettomuus ja optiona valokaarisuojaus, joka takaa käytön korkean turvallisuustason. ACS1000-keskijännitekäyttö sisältää myös useita turvatoimintoja, kuten maasulun ja moottorin ylijännitteen valvonnan (**Kuva 28**). Lisäksi se soveltuu perinteisten teollisuusratkaisujen ohella laivakäyttösovelluksiin. Integroidulla muuntajalla varustettu ACS1000i-taajuusmuuttajan rakennekuva on esitetty kuvassa 29. /19/, /21/

Standard protection functions
 Auxiliary voltage fault, cabinet temperature supervision, overcurrent, short circuit detection, earth fault, input phase loss, output phase loss, overvoltage, motor overload, motor underload, motor stall and overspeed protection, communication fault, main circuit breaker supervision and many others

Kuva 28. ACS1000-käytön tarjoamat standarditurvatoiminnot. /19/



Kuva 29. ACS1000 integroidulla muuntajalla (ACS1000i). /19/

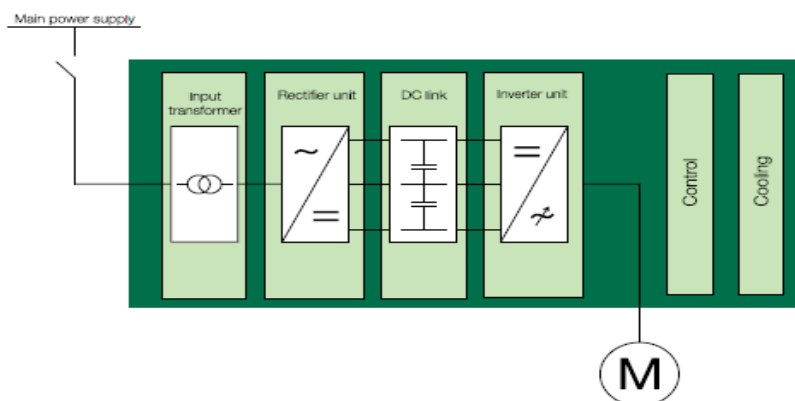
Yhteenvedona ACS1000-taajuusmuuttajaratkaisun standardiominaisuudet ovat seuraavanlaiset:

- suojausluokitus:
ilmajäähdytteinen: IP21, vesijäähdytteinen: IP31
- SIL 3 –luokitus
- tehoalue
ilmajäähdytys: 315-2000 kW, vesijäähdytys: 1800-5000 kW
- jännitealue 0-2,3 kV, 0-3,3 kV, 0-4,0 kV
- sinisuodin
- 12-pulssinen dioditasasuuntaaja
- IGCT-tehopuolijohde
- emergency off/emergency stop –toiminto
- sulakkeeton

- useita turvatoimintoja
- kaappiasennus
- muuntaja
- moottorikaapelin enimmäispituus ≤ 1000 m.

ACS2000-taajuusmuuttaja

ACS2000-taajuusmuuttaja on pääosin samanlainen kuin ACS1000, mutta se voidaan jälkimmäisestä poiketen toteuttaa verkkovaihtosuuntaajalla tai low harmonic –teknologialla. Tehoalue on hieman ACS1000-sarjaa laajempi ja ylittää ilmajäähdytteisenä 250 kW:sta 2600 kW:iin, jännitteen ollessa 4,0-6,9 kV. Lisäksi ACS2000 mahdollistaa asennuksen joko suoraan 4,0-6,9 kV:n syöttöön (direct on line) tai vaihtoehtoisesti öljy- tai ilmaeristeisen syöttömuuntajan kautta. Saatavilla on toteutuksia integroidulla tai erillisellä muuntajalla, mikä tekee ratkaisusta joustavan (**Kuva 30.**). Suojausluokkana käytetään standardiratkaisuna IP21:ä, mutta tarvittaessa voidaan saavuttaa myös IP42-luokan suojaustaso. Lisäksi ratkaisu sisältää useita turvatoimintoja vakio-ominaisuutena, joista esimerkkejä ovat emergency off –toiminto ja moottorin ylijännitteen valvonta (**Kuva 31.**).
/21/, /20/



Kuva 30. ACS2000:n rakenne integroidulla muuntajalla. /20/

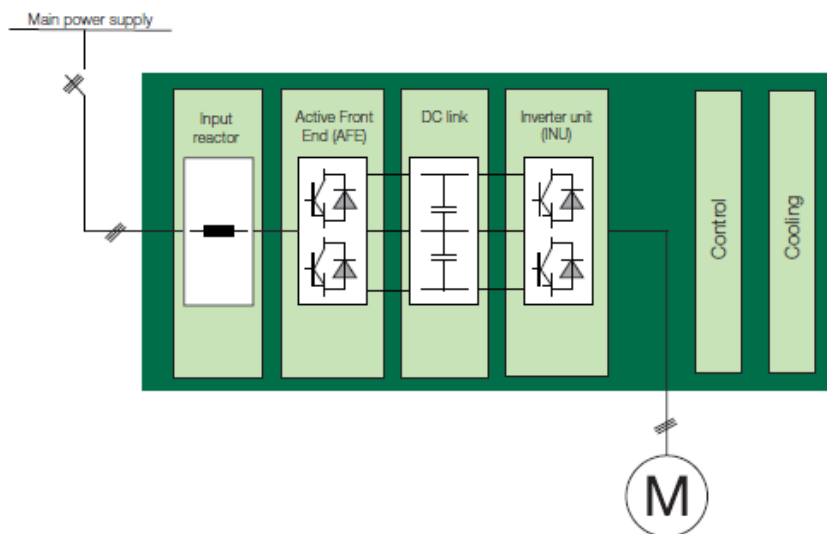
Standard protection functions

Auxiliary voltage fault, overtemperature supervision, overcurrent, short circuit detection, motor overload, motor stall and over-speed protection, communication fault (I/O watchdog), earth fault, main circuit breaker supervision/tripping, emergency off signal supervision

Kuva 31. ACS2000-käytön tarjoamat standarditurvatoiminnot. /20/

ACS2000:n invertteriteknologia sallii direct on line –toteutuksen tinkimättä käytön korkeasta tehokertoimesta (**Kuva 32.**). Lisäksi saavutetaan suoria kustannussäästöjä syöttömuuntajan jäädessä pois. Low harmonic –teknologia tarjoaa optimaalisen harmonisia yliaaltoja rajoittavan ratkaisun ilman ulkoisen suodatuksen tai monikämmimuuntajien tarvetta. Saavutettu harmonisten pitoisuus pysyy yleisimpien yliaaltoja rajoittavien standardien määrittelemien raja-arvojen sisällä. Lisäksi käytön tehokerrointa voidaan korjata, mikä on erityisen hyödyllistä kohteissa, joissa muita kuormia on kytketty samaan syöttöön aiheuttaen tehokertoimen vaihtelua. /20/

Verkkovaihtosuuntauksessa käytetään aina ns. AFE-teknologiaa (Active Front End), jolla tarkoitetaan tasasuuntaussillan korvaamista IGBT-kytkimistä koostuvalla vaihtosuuntaussillalla. Tätä teknologiaa käytetään myös low harmonic –ratkaisun DOL-toteutuksen yhteydessä eli kytkettäessä taajuusmuuttaja suoraan keskijännitteeseen (**Talulukko 3**). Muuntajalla varustetussa low harmonic –toteutuksessa käytetään kuitenkin aina niin sanottua DFE-teknologiaa (Diode Front End). Tällöin käytössä on verkkovaihtosuuntaukseen kykenevien IGBT-puolijohdekytkinten sijasta 24-pulssinen dioditasasuuntaaja. Käytetty tasasuuntaussilta mahdollistaa AFE-teknologian tavoin suotuisan ulostulojännitteen ja harmoniset yliaallot pysyvät standardeissa määriteltyjen rajojen sisäpuolella. /20/



Kuva 32. ACS2000-taajuusmuuttajan kytkeminen suoraan sähkönsyöttöön. /20/

Taulukko 3. ACS2000:n tekniset pääpiirteet. /20/

Motors Induction motors; 250 – 2,500 kW	Input 5-level self-commutated IGBT active front end (AFE) or 24-pulse diode front end (DFE)			
Enclosure classes IP21 to IP42		direct-to-line	with integrated transformer	for operation with external transformer
Rated output voltage 4.0 – 6.9 kV	Low harmonic drives	AFE	DFE	DFE
Efficiency of converter up to 97.5%	Regenerative drives	AFE	AFE	AFE
Auxiliary supply voltage 400, 440, 480 or 600 VAC, 3-phase, 50/60 Hz	Input power factor Controlled to 1 or adjustable to compensate for reactive power of other loads connected to the same network			

ACS2000 mahdollistaa nopean ja helpon asennuksen, ja soveltuu ACS1000-taajuusmuuttajasarjan tavoin jälkikäteen asennettavaksi. Lisävarusteet mahdollistavat räätälöinnin asiakkaan tarpeiden mukaiseksi, joista esimerkkinä ovat muun muassa moottorin ja muuntajan valvonta, lisätuulettimet sekä prosessien kauko-ohjaus- ja diagnostiikkajärjestelmä asiakkaan vaatimusten mukaisesti. Tarvittaessa voidaan käyttöön lisätä myös ylimääräinen sinisuodin

esimerkiksi kohteissa, joissa kaapelit ovat erityisen pitkät tai moottorin ollessa räjähdysalttiissa ympäristössä. Moottorikaapelin enimmäispituudeksi on rajoitettu $\leq 300\text{m}$, mutta erikoissovellutuksissa toteutus on mahdollista jopa 1000 metriin saakka. ACS1000:sta poiketen ACS2000-sarjaa ei kuitenkaan ole saatavilla vesijähdytteisenä mallina, eikä laivakäyttösovellutuksiin. ACS2000-taajuusmuuttajan pääpiirteet ovat nähtävillä aiemmin esitettyssä taulukossa 3 ja kuvassa 33. /20/, /21/, /31/

ACS 2000 highlights

Features
- Power range 250 to 2600 kW (4.0 to 6.9 kV)
- Air cooling
- Available for transformerless operation allowing a direct connection to the line supply (direct-to-line), for connection to an external input isolation transformer or with an integrated transformer
- Available as a low harmonic drive for optimal low harmonic performance or as a regenerative drive for enhanced active braking and power factor correction
- For induction motors

Kuva 33. ACS2000:n toiminnalliset pääpiirteet. /31/

Yhteenvedona ACS2000-taajuusmuuttajaratkaisun standardiominaisuudet näkyvät seuraavasta:

- suojausluokitus:
ilmajähdytteinen: IP21
- SIL 3 –luokitus
- tehoalue
ilmajähdytys: 250-2500 kW
- jännitealue 4,0-6,9 kV
- IGBT-puolijohdekytkin
- emergency off/emergency stop –toiminto
- useita turvatoimintoja
- common mode –suodin DOL-toteutuksessa

- kaappiasennus
- muuntaja
- moottorikaapelin enimmäispituus ≤ 300 m.

6 TAAJUUSMUUTTAJARATKAISUJEN VERTAILUT CASE-TAPAUKSIN

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on kartoittaa Industry Solutions Electrification –yksikössä käytettävät taajuusmuuttajaratkaisut pien- ja keskijännitteellä. Tarkastelu suoritetaan teollisuuslähtöisesti teknistaloudellisesta näkökulmasta ja saatuja tuloksia käytetään helpottamaan teknisesti ja taloudellisesti parhaan taajuusmuuttajasovelluksen valintaa eri käyttökohteissa. Toteutuksissa huomioidaan myös ratkaisujen vaikutukset verkon yliaaltopitoisuuteen. Tutkimus pohjautuu Case-tapauksien kautta suoritettavaan menetelmään, mikä osoittautui toimivimmaksi lähestymistavaksi ratkaisujen muutoin muodostaessa lukemattomia erilaisia yhdistelmiä. Näin myös mahdollistetaan halutut ja selkeät tutkimustulokset ja niiden vertailukelpoisuus.

Tutkimustyö aloitettiin perehtymällä tarkastelun kohteena oleviin taajuusmuuttajiin ACS800-07, ACS1000 ja ACS2000, joiden pääperiaatteet on esitelty luvussa 5. Ennen teknistaloudellisen vertailun aloittamista selvitettiin erilaisten taajuusmuuttajateknologioiden vaikutus ratkaisun toteutukseen, kuten esimerkiksi komponenttien valintaan, häiriöpäästöihin ja edelleen koko sähkökäyttöön. Näin mahdollistettiin vertailussa tehtyjen havaintojen ymmärrettävyys sekä luotettava arviointi. Lähtötietomateriaalina käytetty hintataulukko ratkaisuihin esiintyville laitteille löytyy liitteestä 1.

6.1 Taajuusmuuttajatoteutusten esittely Case-tapauksin

Taajuusmuuttajaratkaisu tulee aina valita teollisuusympäristön asettamien vaatimusten mukaisesti. Myöhemmin tässä opinnäytetyössä tehtävä Case-vertailu suoritetaan viiden teknisesti erilaisen taajuusmuuttajan pohjalta, joiden vaikutus vertailtaviin taajuusmuuttajakokonaisuuksiin selvitetään tässä alaluvussa. Tarkasteluissa huomioidaan vain pääpiiriin vaikuttavat asiat, sillä ohjauspiirin vaikutus hintavertailun kannalta on olematon.

Taajuusmuuttajajien mitoitus tehtiin pumppu- ja puhallin – tyyppiselle kuormalle. Tarkastelussa käytetään pääasiassa ilmajähdytteisiä taajuusmuuttajamalleja, mutta vesijähdytteisiin (Liquid Cooled) siirrytään tehoalueen jäädessä ilmajähdytteisenä riittämättömäksi. Tarkastelu kattaa koko taajuusmuuttajaratkaisun huomioiden taajuusmuuttajan lisäksi moottorin, käyttöympäristön, kaapelit ja katkaisijakentän sekä tarvittaessa myös syöttömuuntajan ja imupiirin. Syöttömuuntajan yläjännitepuolella esiintyviä laitteita ei huomoida hintavertailussa, sillä ne esiintyvät osana jokaista taajuusmuuttajaratkaisua. Näin ollen syöttävä keskijännitekojeisto voidaan jättää vertailusta pois. Pienjännitekojeiston syöttökatkaisijakenttä tulee kuitenkin ottaa mukaan vertailuun, sillä keskijännitetaajuusmuuttajatoteutuksissa sitä ei luonnollisestikaan esiinny.

Ratkaisuihin valitut moottoreiden ja taajuusmuuttajien tyyppitiedot on kerätty asianmukaisista ABB:n mitoitusaulukoista. Moottoreiksi on valittu taajuusmuuttajatoteutuksien tehoalueen perusteella sopivimmat moottorityypit, jotka ovat HXR ja AMI. Mikäli molemmat moottorityypit ovat tehoalueeltaan riittäviä, valitaan niistä edullisempi vaihtoehto. Tätä vastoin syöttökatkaisijakentän tai muuntajan tarkkaa tyyppiä ei ole tarpeellista määrittää, ja niiden vaikutus sähkökäyttöön huomioidaan vain hinnassa. Kaikki tarkasteltavat muuntajat ovat valuhartsieristeisiä ns. kuivamuuntajia. Myös mahdollisten imupiirien hinta on mukana viitteellisenä, sillä niiden hintaa ei voi hyvittää sellasenaan käytöille.

Tarkastelun kohteina olevat taajuusmuuttajat ovat verkkosuuntaajiltaan erilaisia, jolloin valinnan seuraukset myös verkon yliaaltopitoisuuteen selvitetään yleispätevästi. Lisäksi huomioidaan olennaisimpien optioiden vaikutus taajuusmuuttajaratkaisun hintaan, mikäli niille on tarvetta. Kaikkia taajuusmuuttajaratkaisuja tarkastellaan tiettyjen muuttujien kautta, jotka muodostavat keskenään erilaisia yhdistelmiä (**Taulukko 4.**). Käyttöjen tehoalueet on valittu siten, että niiden pohjalta on mahdollista suorittaa vertailu pien- ja keskijännitetaajuusmuuttajien kesken ja saadut tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia. Syöttöjännitteenä käytetään pääosin kahta eri jännitetasoa, 6 ja

10 kV:a. Poikkeuksen muodostaa kuitenkin ACS2000:n yhteydessä käytetty 20 kV:n porras, jota käytetään muissa taajuusmuuttajaratkaisuisa esiintyvän 10 kV:n jännitetason asemasta. Huomiota tulee lisäksi kiinnittää syöttökaapelin pituuteen pien- ja keskijännitetoteutusten välillä, jossa pienjännitteellä syöttökaapeli on 25 m ja keskijännitteellä 50 m.

Tässä alaluvussa on käyty läpi vain periaatteet teknisesti ja taloudellisesti parhaan taajuusmuuttajan valitsemiseen, varsinainen vertailu suoritetaan myöhemmin kappaleessa 6.2.

Taulukko 4. Taajuusmuuttajaratkaisujen variaatiot.

Moottoritehot	630 kW, 1000 kW, 1600 kW, 2000 kW, 2500 kW, 3000 kW
Moottorikaapelin pituudet	50 m 100 m 150 m
Syöttökaapelin pituudet	25 m (pienjännitteellä) 50 m (keskijännitteellä)
Syöttöjännite	6 kV/10 kV tai 20 kV 20 kV:n porrasta käytetään 10 kV:n sijasta ACS2000-taajuusmuuttajan yhteydessä

Toteutuksissa käytettävät kaapelit mitoitetaan suurimman jatkuvan kuormitettavuuden mukaan, jolla tarkoitetaan moottorin tehoa ja nimellisvirtaa. Haluttu nimellisvirta voidaan joko laskea tai selvittää asianmukaisista moottoriluotteloista. Tässä opinnäytetyössä haluttu I_N on selvitetty ABB:n moottoritaulukoista. Laskennallinen moottorin nimellisvirta voitaisiin puolestaan selvittää alla näkyvän yhtälön 2 mukaisesti.

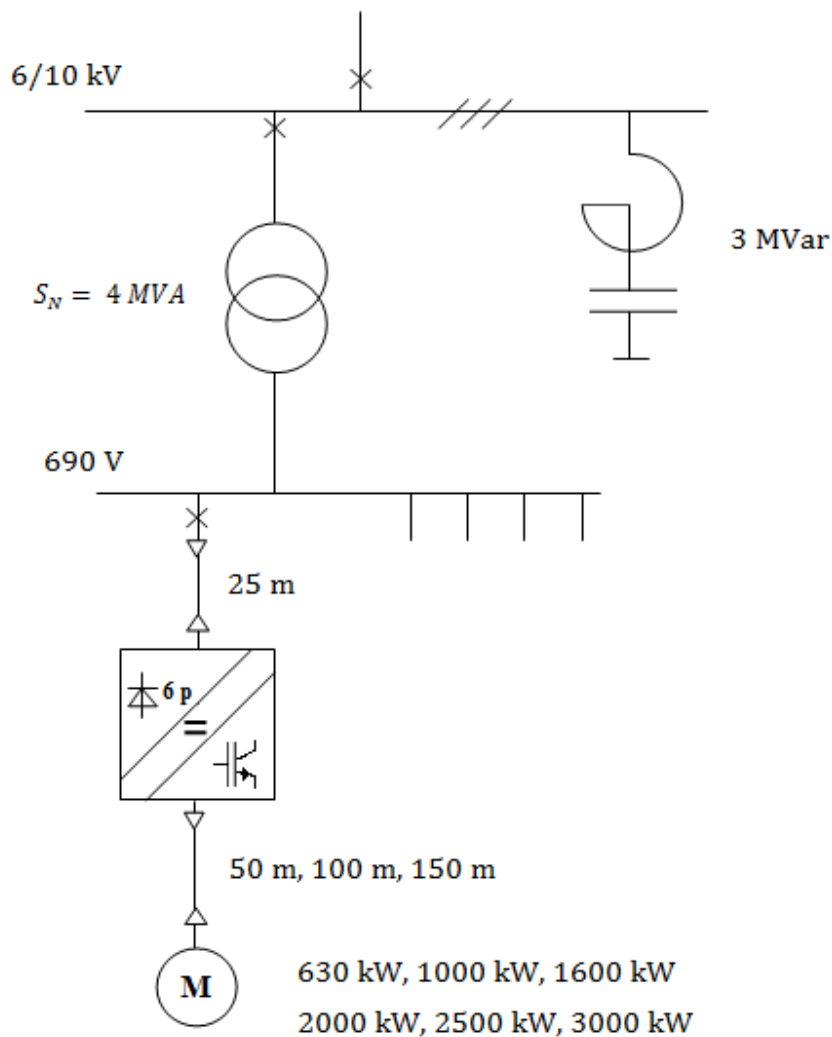
$$I_N = \frac{P_N}{\eta_N \times \sqrt{3} \times U_N \times \cos\varphi} \quad (2)$$

Kaapelin mitoitusta ohjaavat erilaiset säännöt, joita yksikkö käyttää laskennoissaan. Mitoituksen peruseriaatteita seuraamalla saadaan kaapeleiden mitoitukseen keskimääräinen korjauskertoimen, joka määräytyy ympäristötekijöiden ja kaapeleiden asennustavan mukaisesti. Kaapeleiden mitoituksessa huomioitu todellinen kuormitettavuus saadaan kertomalla kaapelivalmistajien antama kuormitettavuuden arvo vapaasti ilmaan asennetuille kaapeleille, asennusolosuhteet huomioivalla korjauskertoimella. Tässä yhteydessä kaapeleiden korjauskertoimeksi on valittu $k = 0,7$. Mitoituksessa on käytetty Prysmianin kaapeliluetteloa.

Pienjänniteratkaisuihin on valittu MCMK 3½ -johtiminen 1 kV:n voimakaapeli ja keskijänniteratkaisuihin 3-johtiminen AHXAMK-W 10 kV:n kaapeli, sillä ne ovat yleisimmin käytössä teollisuusympäristössä. Vaihtoehtoisesti olisi voitu käyttää keskijänniteratkaisuissa myös kuparikaapeleita, mutta tällöin kaapelit olisivat olleet näissä tarkasteluissa huomattavasti ylimitoitettuja. Lisäksi ne ovat merkittävästi kalliimpia vastaavan alumiinikaapelin ollessa noin kolmasosa kuparikaapelin hinnasta. Keskijännitekaapeleina käytetään PEX-eristeisiä kaapeleita, sillä ne lisäävät kaapelin kuormitettavuutta sallimalla kaapelille 90°:n käyttölämpötilan. Yli 240 mm²:n keskijännitekaapelia ei tavanomaisesti käytetä, jolloin niiden tilalle on valittu useampia, halkaisijaltaan pienempiä kaapeleita. Kaapeleiden hinnassa on huomioitu varsinaisten materiaalikustannusten lisäksi työ- ja asennuskustannukset.

Case 1: ACS800, 6-p

Käytettäessä perinteistä kuusipulssisella dioditasasuuntaajalla varustettua ACS800-07-taajuusmuuttajaa on taajuusmuuttajasovelluksen kokoonpanon periaatekuva alla olevan kuvan mukainen (**Kuva 34.**). Koska kyseessä on pienjännitteinen taajuusmuuttajatoteutus, käytetään syöttökaapelin pituutena 25 metriä.



Kuva 34. Taajuusmuuttajaratkaisun periaatekuva toteutettuna 6-pulssisella ACS800-07-taajuusmuuttajalla.

Kuten kuvasta nähdään, sisältää taajuusmuuttajasovellus pienjännitepuolelle sijoitetun katkaisijan lisäksi imupiirin yliaaltojen suodattamiseen. Kuten jo aiemmin on todettu, aiheuttavat 6-pulssisella dioditasasuuntaajalla toteutetut taajuusmuuttajat syöttöverkkoon suuren määrän yliaaltoja, joita yleensä joudutaan suodattamaan suuntaajakäytöissä. Periaatekuvassa nähtävä imupiiri on sijoitettu keskijänniteverkon puolelle, sillä taajuusmuuttajakeskus ei tarvitse imupiirin tuottamaa perustaajuista loistehoa. Keskijännitepuolelle sijoitettu imupiiri palvelee myös muita verkon kuluttajia, jolloin sen hinta tulee jakaa muun kulutuksen kesken. Taajuusmuuttajaratkaisuun valittu imupiiri on

loistehontuotannoltaan 3 Mvar ja se on mitoitettusuodattamaan viidettä yliaaltoa teollisuusverkossa. Koska imupiiriä ei voi kokonaan hyvittää taajuusmuuttajakäytölle, jaetaan sen kokonaishinta kokemusperäisesti muun verkon kulutuksen kesken. Kyseisen taajuusmuuttajakäytön osuus imupiirin hinnasta oletetaan olevan puolet.

Ratkaisussa käytetyt muuntajat on määritelty taulukossa 5, jonka mukaisesti syöttömuuntajana käytetään 4 MVA:n muuntajaa. Kuten edellä esitetystä periaatekuvasta nähdään, mahdollistaa taajuusmuuttajaratkaisu perinteisen kaksikäämitysmuuntajan valinnan syöttömuuntajaksi. Koska muuntaja syöttää yleensä useampaa kuormaa samanaikaisesti, tulee kustannukset allokoida eli jakaa syötettävien kuormien tehojen suhteen yhtälön 3 mukaisesti. Suuritehoinen moottori voi kuitenkin tarvita oman muuntajansa, jolloin kustannukset eivät luonnollisesti jakaudu muun kulutuksen välillä. Näin menetellään esimerkiksi käytettäessä vertailujen kannalta kahta suuritehoisinta moottoria, 2500 kW ja 3000 kW:a, yhdessä 4 MVA:n muuntajan kanssa.

Taulukko 5. Syöttömuuntajien koot ja tyypit 6-pulssisen ACS800-07:n yhteydessä.

Muuntaja			
Jännite/kV	Koko	Tyyppi	Eriste
6/0,69	4 MVA	2-käämi	Valuhartsi
10/0,69	4 MVA	2-käämi	Valuhartsi

Muuntajan hinnan osuuden määrittäminen:

$$\frac{\text{Kuorman teho} / \text{MW}}{\text{Muuntajan teho} / \text{MVA}} \times \text{muuntajan hinta} / \text{€} \quad (3)$$

Kuten jo aiemmin kappaleessa 6.1 todettiin, valitut moottori- ja syöttökaapelit valitaan kaapelin suurimman jatkuvan kuormitettavuuden mukaan eli moottorin

nimellisvirran perusteella. Teho määrittää myös ratkaisussa käytetyt taajuusmuuttaja- ja moottorityytit. Kaikki nämä on koottu alla olevaan yhteiseen taulukkoon tehoalueittain (**Taulukko 6**). /8/ /16/

Taulukko 6. Moottoreiden, taajuusmuuttajien ja kaapeleiden tyytit tehoalueittain käytettäessä 6-pulssista ACS800-07-taajuusmuuttajaa.

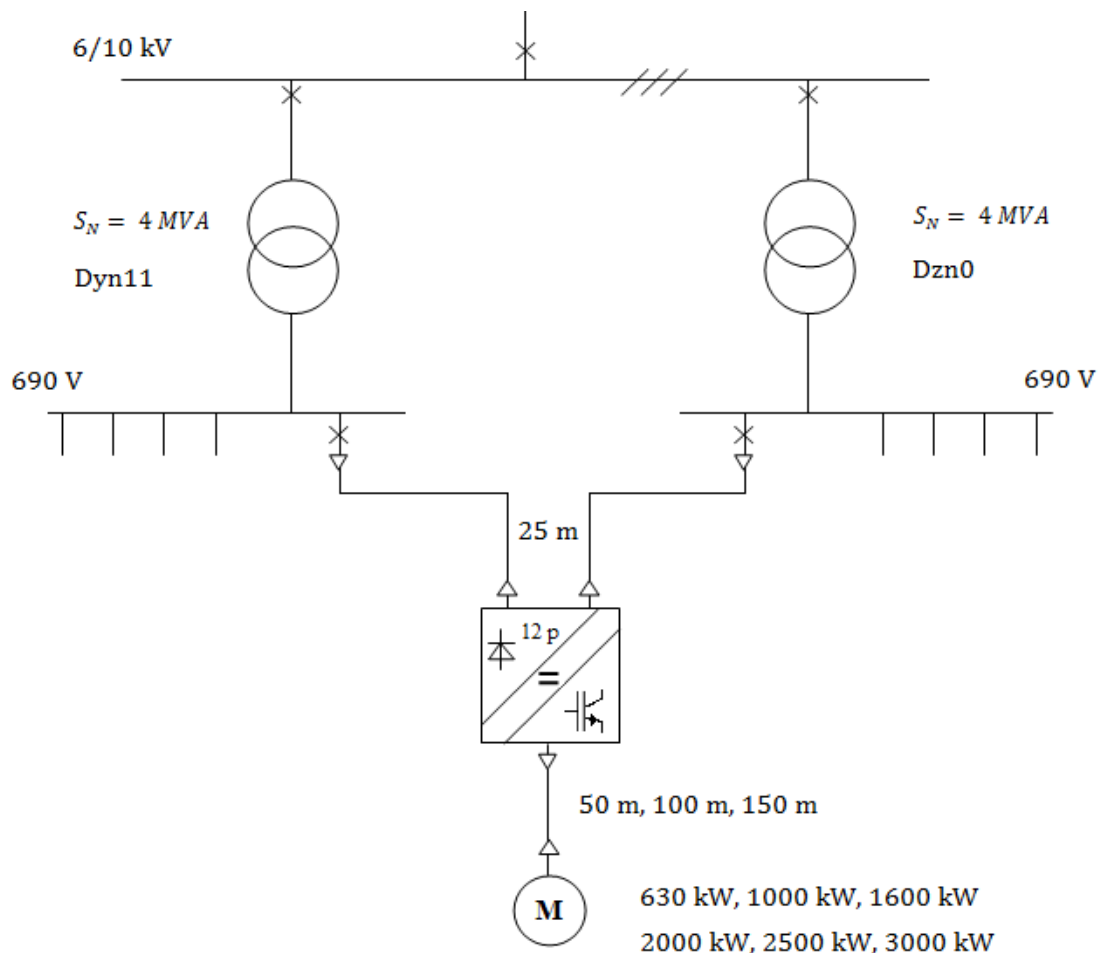
ACS800-07 6-p, 690 V				
Teho/kW	Moottori	Taajuusmuuttaja	INU	Moottori- ja syöttökaapeli MCMK 3½
630	HXR 400LF4	ACS800-07-0750-7	2R8i	4x 3x95/50
1000	HXR 500LG4	ACS800-07-1500-7	3R8i	6x 3x95/50
1600	AMI 450L4W BAFH	ACS800-07-2120-7	4R8i	8x 3x120/70
2000	AMI 450L4W BAFH	ACS800-07-2900-7	5R8i	10x 3x120/70
2500	AMI 500L4W BAFH	ACS800-07-3190-7	6R8i	12x 3x150/70
3000	AMI 500L4W BAFH	ACS800-07LC-3970-7	6R8i	12x 3x185/95

LC = Liquid Cooled

Kaapeleiden tyytit ja lukumäärät on valittu siten, että ne on mahdollista asentaa osaksi taajuusmuuttajaratkaisua. Taajuusmuuttaja sisältää aina yhden tai useamman syöttö- (SU, supply unit) ja invertteriyksikön (INU, inverter unit). Taulukossa näkyvä invertteriyksiköiden lukumäärä on ratkaiseva, sillä ratkaisuun valitut moottorikaapelit tulee valita yksiköiden lukumäärän perusteella. Jokaisesta invertteriyksiköstä tulee lähteä sama määrä kaapeleita, jolloin lähtevien kaapeleiden lukumäärä on jaollinen yksiköiden lukumäärällä. Syöttökaapeleina käytetään yleensä moottorikaapeleiden kanssa vastaavanlaisia kaapeleita, joten niitä ei tarvitse erikseen mitoittaa käytölle.

Case 2: ACS800-07, 12-p

12-pulssisella dioditasasuuntaajalla toteutetun ACS800-07-pienjännitetaajuusmuuttajan vaikutus taajuusmuuttajasovellukseen on nähtävillä alla olevasta periaatekuvasta (**Kuva 35.**). Perinteisestä 6-pulssisesta ACS800-07-taajuusmuuttajasta poiketen, ratkaisu sisältää kahden keskijännitepuolelle sijoitetun katkaisijakentän lisäksi kaksi pienjännitekojeiston katkaisijakenttää. Näistä keskijännitepuolen katkaisijoita ei huomioida toteutuksessa, kuten aiemmin tässä kappaleessa on todettu. Koska 12-pulssisella tasasuuntaussillalla varustetun ACS800-07:n vaikutukset verkon kannalta ovat myönteisemmät 6-pulssiseen toteutukseen verrattuna oletetaan, ettei taajuusmuuttajaratkaisu tarvitse tässä yhteydessä verkon puolelle lisäsuodatusta. Syöttökaapelin pituutena käytetään edellisen ratkaisun tavoin 25 metriä.



Kuva 35. Taajuusmuuttajaratkaisun periaatekuva toteutettuna 12-pulssisella ACS800-07-taajuusmuuttajalla syötettäessä kuormaa kahdelta eri keskukselta.

Muuntajat ovat vastaavat ACS800-07 vastaavaan 6-pulssiseen toteutukseen verrattuna (**Taulukko 7.**). Kuvan 35 tapauksessa syöttömuuntajina käytetään kuitenkin kahta eri moottorikeskuksen jakelumuuntajaa, jotka molemmat ovat kooltaan 4 MVA:a. Näin ollen kuormalle syötettävä teho jakautuu tasaisesti molempien muuntajien kesken. Tämä huomioidaan myöhemmin kappaleessa 6.2 tehtävissä hintavertailuissa.

Yleensä käytössä on yksi kolmikäämimuuntaja, mutta sen sijasta voidaan myös käyttää kahta normaalia kaksikäämistä jakelumuuntajaa, joilla on erivaiheiset toisiokytkennät. Koska kuormaa syötetään tässä yhteydessä kahdelta eri keskukselta, kumoutuu yliaaltovaikutus vasta keskijännitepuolella. Ratkaisussa

käytettyjen muuntajien kytkentäryhmiksi on valittu Dyn11 ja Dzn0, jolloin saavutetaan haluttu 30° vaihesiirto toisiojännitteiden välille.

Taulukko 7. Syöttömuuntajien koot ja tyypit 12-pulssisen ACS800-07:n yhteydessä.

Muuntaja			
Jännite/kV	Koko	Tyyppi	Eriste
6/0,69	2 x 4 MVA	2-käämi	Valuharts
10/0,69	2 x 4 MVA	2-käämi	Valuharts

Muuntajilla voidaan syöttää verkossa esiintyvää muutakin kulutusta, jolloin muuntajan hinta allokoidaan syötettävien kuormien tehojen kesken aiemmin esitetyn yhtälön 3 mukaisesti. Koska syöttömuuntajan hinta jakautuu kuormalle syötettävän tehon perusteella, on hinnan osuus luonnollisesti sama 6- ja 12-pulssisilla taajuusmuuttajilla toteutettujen ratkaisujen välillä kuormien ollessa keskenään vastaavan tehoiset. Yhden muuntajan osuus on siis vain puolet käytön tehosta. Tehoalueilla 2500 kW ja 3000 kW muuntajan teho-osuus ei jakaannu muun kulutuksen kesken, vaan se allokoidaan kokonaan käytölle. Muuntajien tavoin tehoalueittain määritellyt taajuusmuuttaja- ja moottorityypit ovat vastaavat ACS800-07:n 6-pulssiseen toteutukseen verrattuna (**Taulukko 8.**).

Taulukko 8. Moottori- ja taajuusmuuttajatyypit 12-pulssisella ACS800-07:lla tehoalueittain. /8/ /16/

ACS800-07 12-p, 690 V		
Teho/kW	Moottori	Taajuusmuuttaja
630	HXR 400LF4	ACS800-07-0750-7
1000	HXR 500LG4	ACS800-07-1500-7
1600	AMI 450L4W BAFH	ACS800-07-2120-7
2000	AMI 450L4W BAFH	ACS800-07-2900-7
2500	AMI 500L4W BAFH	ACS800-07-3190-7
3000	AMI 500L4W BAFH	ACS800-07LC-3970-7

LC = Liquid Cooled

Kaapeleiden asennustapa poikkeaa kuitenkin hieman tavanomaisella 6-pulssisella dioditasasuuntaajalla toteutetusta ratkaisusta (**Taulukko 9**). 12-pulssisen ACS800:n yhteydessä syötettäessä kuormaa kahdelta eri keskukselta, jakaantuu kuormalle syötettävä teho muuntajien lisäksi myös kahden syöttökaapelin kesken. Näin ollen yhden syöttökaapelin kuormitettavuus on puolet moottorikaapelin vastaavaan verrattuna.

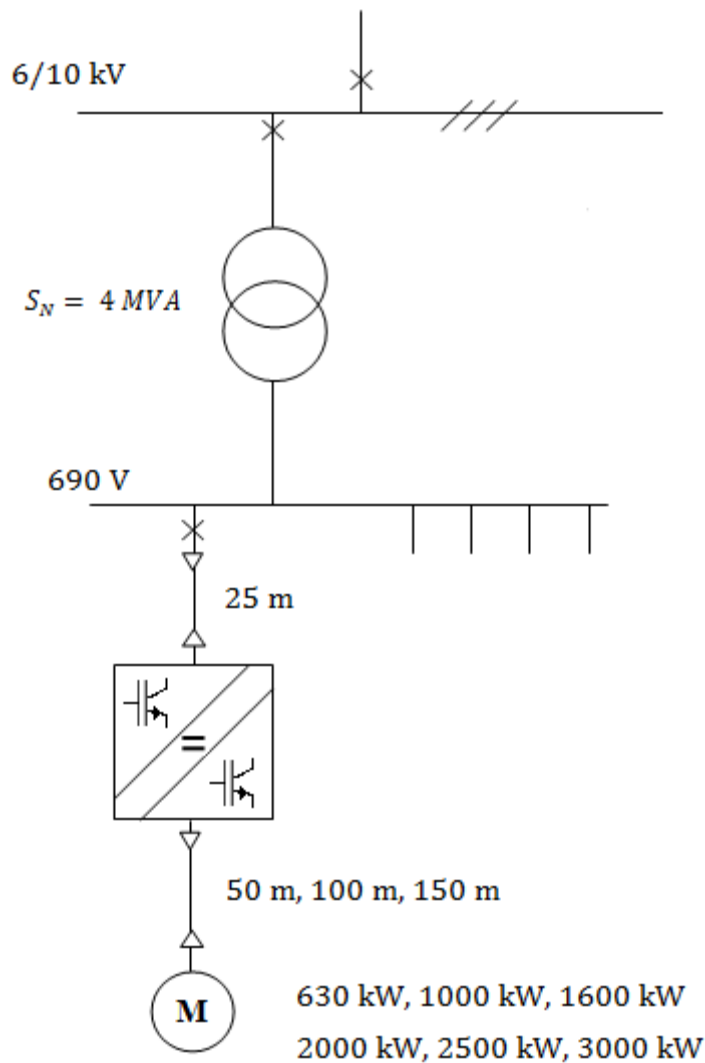
Taulukko 9. Moottori- ja syöttökaapelityypit 12-pulssisella ACS800-07:lla tehoalueittain syötön tullessa kahdelta eri keskukselta.

ACS800-07 12-p, 690 V			
Teho/kW	INU	MCMK 3½	
		Syöttökaapeli	Moottorikaapeli
630	2R8i	2kpl 2x 3x95/50	4x 3x95/50
1000	3R8i	2kpl 3x 3x95/50	6x 3x95/50
1600	4R8i	2kpl 4x 3x120/70	8x 3x120/70
2000	5R8i	2kpl 5x 3x120/70	10x 3x120/70
2500	6R8i	2kpl 6x 3x150/70	12x 3x150/70
3000	6R8i	2kpl 6x 3x185/95	12x 3x185/95

Kuten jo kappaleessa 6.1.1 todettiin, toteutetaan taajuusmuuttajalle tulevat ja siitä lähtevät kaapelit yleisimmin samanlaisella kaapeloinnilla. Jälleen kaapeleiden tyypit ja lukumäärät on valittu siten, että ne on mahdollista asentaa osaksi taajuusmuuttajaratkaisua, ratkaisun sisältäessä yhden tai useampia supply- ja invertteriyksiköitä. Edellisen pienjännitetaajuusmuuttajaratkaisun tavoin, myös nyt invertteriyksiköiden lukumäärä vaikuttavaa moottorikaapelin valintaan. Näin ollen syötön tullessa kahdelta eri keskukselta, vaikuttaa se tässä yhteydessä vain asennuksen toteutukseen. Syöttökaapelina käytetään siis moottorikaapelin kanssa vastaavaa kaapelia, mutta yhdeltä keskukselta tulevat syöttökaapelit ovat vain määrällisesti puolet moottorikaapeleiden lukumäärästä.

Case 3: ACS800-37, low harmonic

Low harmonic –teknologialla toteutetun ACS800-37-pienjännitetaajuusmuuttajan vaikutus ratkaisuun on nähtävillä periaatekuvasta 36. Myös tässä yhteydessä syöttökaapelin pituudeksi on valittu 25 m, taajuusmuuttajatoteutuksen ollessa pienjännitteinen.



Kuva 36. Taajuusmuuttajaratkaisun periaatekuva käytettäessä ACS800-07 low harmonic –taajuusmuuttajaa.

Kuvasta huomataan ratkaisun olevan pitkälti 6-pulssisella dioditasasuuntaajalla toteutetun ACS800-07:n kaltainen. Taajuusmuuttajaratkaisu sisältää pienjännitepuolelle sijoitetun katkaisijan, mutta imupiiri on voitu jättää toteutuksesta pois. Poiketen perinteisestä ACS800-07:lla toteutetusta ratkaisusta, saadaan low harmonic –teknologian ansiosta harmonisten virtayliaaltojen osuutta verkossa pienennettyä huomattavasti kappaleen 4.3.5 esitetyn teorian mukaisesti. Harmonisten yliaaltojen oletetaan pysyvän sallituissa rajoissa ilman lisäsuodatusta, eikä imupiiriä tarvitse huomioida siten hintavertailussa. Luonnollisesti itse taajuusmuuttajan hinta on kuitenkin hieman korkeampi aiemmin esitettyihin pienjännitetaajuusmuuttajiin verrattaessa.

Toteutuksessa käytetyt syöttömuuntajat ovat vastaavat aiemmin esitettyyn kuusipulssiseen taajuusmuuttajaratkaisuun verrattaessa (**Taulukko 10**). Muuntajana käytetään siis tavanomaista 4 MVA:n kaksikäymismuuntajaa, jolla voidaan edellisten taajuusmuuttajaratkaisuiden tavoin syöttää verkossa esiintyvää muutakin kulutusta. Tällöin muuntajan hintakustannukset tulee jälleen allokoida syötettävien kuormien tehojen kesken aiemmin esitetyn yhtälön 3 mukaisesti. Suuritehoiselle kuormalle tarvitaan kuitenkin oma syöttömuuntajansa, jolloin muuntajaa ei allokoida, eivätkä kustannukset siten jakaudu muun kulutuksen kesken. Näin menetellään esimerkiksi käytettäessä vertailujen kannalta kahta suuritehoisinta moottoria, 2500 kW ja 3000 kW:a, yhdessä 4 MVA:n syöttömuuntajan kanssa. Low harmonic –teknologian myönteinen vaikutus verkon yliaaltoihin pienentää myös muuntajan virran yliaaltopitoisuutta, mikä puolestaan vähentää muuntajan tehontarvetta. Tässä yhteydessä vaikutusta ei kuitenkaan oleteta merkittäväksi.

Taulukko 10. Syöttömuuntajien koot ja tyypit ACS800-37:n yhteydessä.

Muuntaja			
Jännite/kV	Koko	Tyyppi	Eriste
6/0,69	4 MVA	2-käämi	Valuhartsi
10/0,69	4 MVA	2-käämi	Valuhartsi

ACS800-37:llä toteutettuun ratkaisuun valitut taajuusmuuttaja- ja moottorityypit näkyvät tehoalueittain taulukossa 11. Edellisestä pienjännitetaajuusmuuttajaratkaisusta poiketen, kyseessä on nyt oma erillinen taajuusmuuttajatyypinsä, eikä perinteisen ACS800-07:n varustelu optiolla.

Taulukko 11. Moottoreiden, taajuusmuuttajien ja kaapeleiden tyypit tehoalueittain käytettäessä ACS800-37-taajuusmuuttajaa. /8/ /16/

ACS800-37, 690 V				
Teho/kW	Moottori	Taajuusmuuttaja	INU	Moottori- ja syöttökaapeli MCMK 3½
630	HXR 400LF4	ACS800-37-0790-7	2R8i	4x 3x95/50
1000	HXR 500LG4	ACS800-37-1330-7	3R8i	6x 3x95/50
1600	AMI 450L4W BAFH	ACS800-37-2320-7	4R8i	8x 3x120/70
2000	AMI 450L4W BAFH	ACS800-37-2780-7	5R8i	10x 3x120/70
2500	AMI 500L4W BAFH	ACS800-37-3310-7	6R8i	12x 3x150/70
3000	AMI 500L4W BAFH	ACS800-37LC-4630-7	7R8i	14x 3x150/95

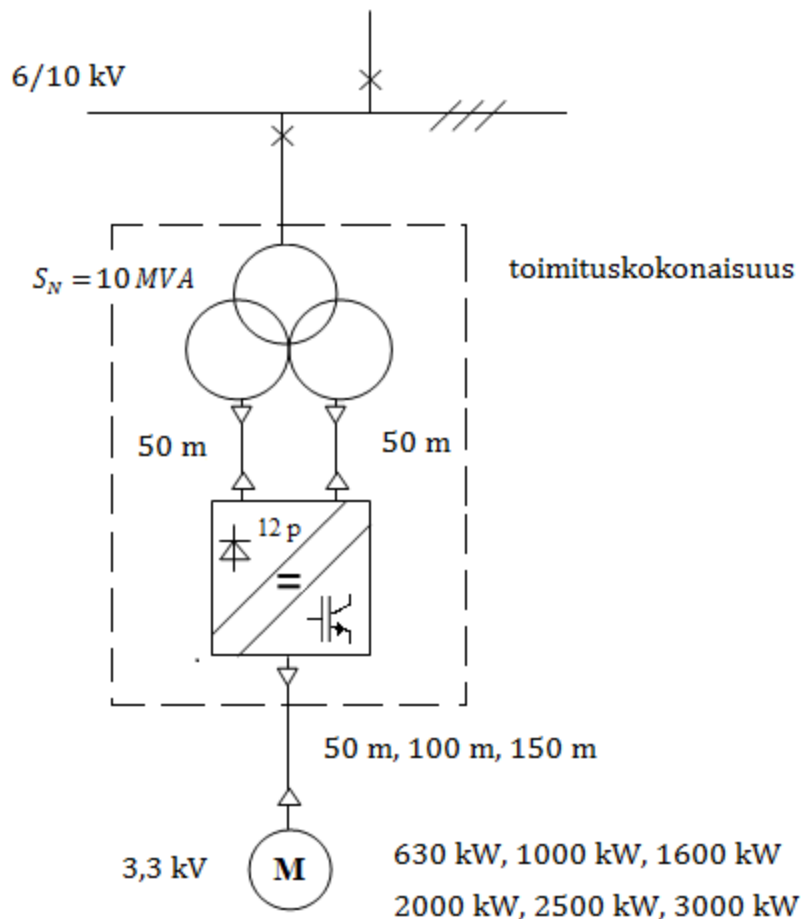
LC = Liquid Cooled

Kaapeleiden mitoituksessa on huomioitu kahden edellisen pienjänniteratkaisun tavoin taajuusmuuttajille tyypillisten supply- ja invertteriyksikköjen vaikutus valintaan. Koska syöttö tulee nyt vain yhdeltä jakelumuuntajalta, ovat syöttö- ja moottorikaapelit jälleen identtiset syötetyn tehon ollessa kuorman tehon suuruinen.

Case 4: ACS1000

Taajuusmuuttajaratkaisun periaatekuva toteutettuna ACS1000-keskijännitetaajuusmuuttajalla on nähtävillä kuvassa 37. Syöttöjännitteenä käytetään pienjännitetaajuusmuuttajien tavoin 6 ja 10 kV:a, kuten kappaleessa 6.1 on jo todettu. Tästä poiketen kuormalle syötettävä jännite on 690 V:n asemasta

3,3 kV. Koska kyseessä on keskijännitteinen taajuusmuuttajaratkaisu, käytetään syöttökaapelin pituutena 50 metriä. /34/ /16/



Kuva 37. ACS1000:lla toteutettu taajuusmuuttajasovellus.

ACS1000 on toteutettu standardina 12-pulssisella dioditasasuuntaajalla, jolloin se vaatii aina syöttömuuntajaksi kolmikäämimuuntajan. Käytetty muuntaja on suuruudeltaan 10 MVA:a. Toisin kuin aiemmin esitetyillä ACS800-pienjännitetaajuusmuuttajilla, ACS1000:lla syöttömuuntaja sisältyy taajuusmuuttajan hintaan ja toimitetaan osana sitä. Näin ollen muuntajaa ei allokoita muun kulutuksen kesken. Myös verkon lisäsuotimet oletetaan

tarpeettomiksi, sillä 12-pulssisen rakenteensa vuoksi ei taajuusmuuttaja aiheuta juurikaan yliaaltoja muuhun sähköverkkoon. Näin ollen imupiiriä ei oteta mukaan hintavertailuun. Pulssiluvun vaikutusta yliaaltoihin on käsitelty tarkemmin kappaleiden 4.3.4 ja 5.2 teoriaosuuksissa. Ratkaisussa käytetyt moottori- ja taajuusmuuttajatyypit ovat nähtävillä taulukossa 12 tehoalueittain.

Taulukko 12. Moottoreiden, taajuusmuuttajien ja kaapeleiden tyyppimerkinnot ACS1000:lla tehoalueittain.

ACS1000; 3,3 kV		
Teho/kW	Moottori	Taajuusmuuttaja
630	HXR 400LG4	ACS 1013-A1-G
1000	HXR 500LG4	ACS 1013-A2-L
1600	HXR 500LQ4	ACS 1013-A3-Q
2000	AMI 450L4W BAFH	ACS 1013-A3-S
2500	AMI 500L4W BAFH	ACS 1013-W1-U -LC
3000	AMI 500L4W BAFH	ACS 1013-W2-W -LC

LC=Liquid Cooled

Kaapeleiden mitoituksessa on noudatettu tämän kappaleen alussa esiteltyjä peruseriaatteita. Ratkaisuun valitut kaapelit on nähtävillä taulukossa 13. Keskiäänitetaajuusmuuttajaratkaisuisissa ei tarvitse pienjänniteratkaisujen tavoin huomioida invertteriyksiköiden vaikutusta kaapeleiden mitoitukseen.

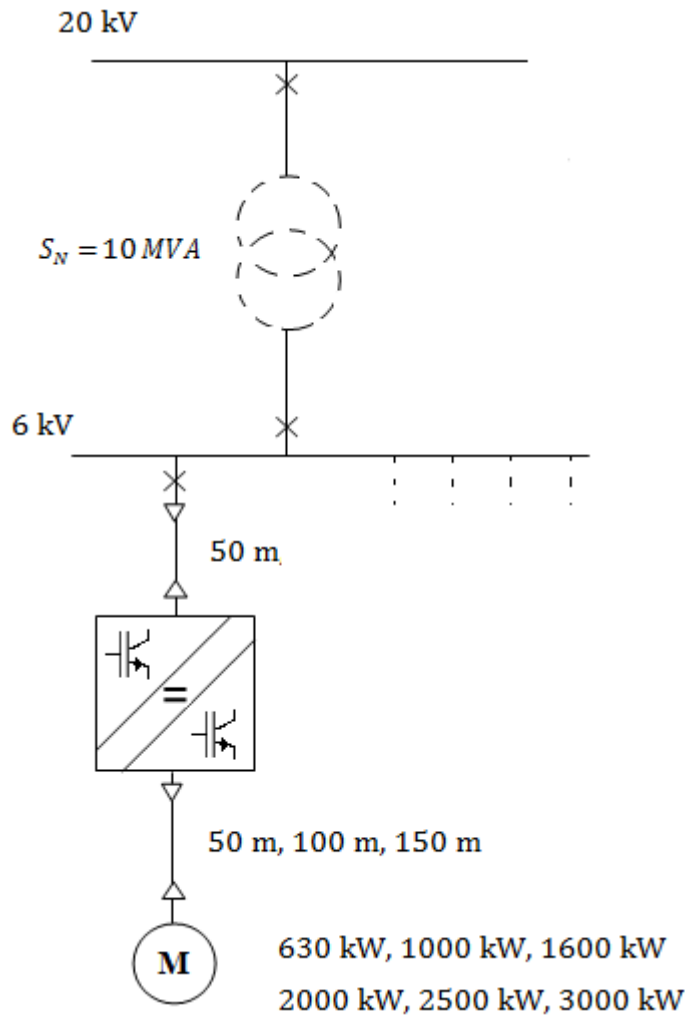
Kuten jo Case 1:n alla todettiin, toteutetaan taajuusmuuttajalle tulevat ja siitä lähtevät kaapelit usein samanlaisilla kaapeleilla, muidenkin kaapelityyppien ollessa mahdollisesti ratkaisuun soveltuvia. Koska ACS1000-taajuusmuuttajan yhteydessä käytössä on kolmikäämimuuntaja, sisältää ratkaisu jälleen kaksi syöttökaapelia. Näin ollen kuormalle syötettävä teho ja siten nimellisvirta, jakautuvat näiden kahden kaapelin kesken, jolloin yksittäisen kaapelin kuormitettavuus puolittuu. Syöttökaapelina käytetään siis moottorikaapelin kanssa vastaavaa kaapelia, mutta yhdeltä keskukselta tulevat syöttökaapelit ovat vain määrällisesti puolet moottorikaapeleiden lukumäärästä.

Taulukko 13. Moottori- ja syöttökaapelityypit ACS1000:lla tehoalueittain syötön tullessa kolmikäämimuuntajalta.

ACS1000; 3,3 kV		
AHXAMK-W, 10 kV		
Teho/kW	Syöttökaapeli	Moottorikaapeli
630	2kpl 1x3x50Al+35Cu	2x3x50Al+35Cu
1000	2kpl 1x3x50Al+35Cu	2x3x50Al+35Cu
1600	2kpl 1x3x95Al+35Cu	2x3x95Al+35Cu
2000	2kpl 1x3x150Al+35Cu	2x 3x150Al+35Cu
2600	2kpl 1x3x185Al+35Cu	2x 3x185Al+35Cu
3000	2 kpl 2x3x95Al+35Cu	4 kpl 2x3x95Al+35Cu

Case 5: ACS2000

Taajuusmuuttajaratkaisun periaatekuva toteutettuna ACS2000-keskijännitetaajuusmuuttajalla on nähtävillä kuvassa 38. Syöttöjännitteenä käytetään 6 kV:n lisäksi aiemmista ratkaisuista poiketen 20 kV:a, jolloin muuntajan vaikutus ratkaisun hintaan voidaan selvittää. Taajuusmuuttaja mahdollistaa kytkennän suoraan syöttöjännitteeseen 6 kV:lla (DOL), jolloin syöttömuuntaja jää tarpeettomaksi. Syöttöjännitteen ollessa 20 kV:a on muuntaja kuitenkin välttämätön. Tämän vuoksi periaatekuvaan muuntaja on merkitty katkoviivalla. Kuormalle syötettävä jännite on siis 6 kV:a, mikä poikkeaa aiempien taajuusmuuttajaratkaisujen jännitteestä. Ratkaisu sisältää lisäksi 6 kV:n keskijännitekatkaisijan. Syöttökaapelin pituutena käytetään 50 metriä.



Kuva 38. ACS2000:lla toteutettu taajuusmuuttajasovellus.

Taajuusmuuttajaratkaisussa käytetyt taajuusmuuttaja- ja moottorityypit on nähtävillä tehoalueittain taulukosta 14. Taulukosta huomataan ACS2000 tehoalueen jäävän hieman vajaaksi suurilla tehoilla, eikä aiemmista ratkaisuista poiketen vesijäähdytteistä mallia taajuusmuuttajasta ole tarjolla. Kaapelit on valittu niiden kuormitettavuuden perusteella tämän kappaleen alussa esitetyn mukaisesti. Kuten Case 4 yhteydessä jo todettiin, ei keskijännitekäytöllä tarvitse pienjänniteratkaisujen tavoin huomioida invertteriyksiköiden vaikutusta kaapelin mitoitukseen. Muuntajan yhteydessä tulee syöttö vain yhdeltä jakelumuuntajalta, jolloin syöttö- ja moottorikaapelit ovat identtiset syötetyn tehon ollessa kuorman tehon suuruinen. Näin menetellään myös, mikäli taajuusmuuttaja kytketään suoraan sähkönsyöttöön.

Taulukko 14. Moottoreiden, taajuusmuuttajien ja kaapeleiden tyypit ACS2000:lla tehoalueittain. /20/ /16/

ACS2000, 6 kV			
Teho/kW	Moottori	Taajuusmuuttaja	Syöttö- ja moottorikaapeli AHXAMK-W, 10 kV
630	HXR 450LG4	ACS 2060-1x-AN1-a-0S	1x 3x50Al+35Cu
1000	HXR 500LH4	ACS 2060-2x-AN1-a-1A	1x 3x50Al+35Cu
1600	AMI 450L4W BAFH	ACS 2060-3x-AN1-a-1J	1x 3x95Al+35Cu
2000	AMI 500L4W BAFH	ACS 2060-3x-AN1-a-2A	1x 3x120Al+35Cu
2500	-	ei mahdollinen	-
3000	-	ei mahdollinen	-

Taajuusmuuttajaksi voidaan valita joko low harmonic tai verkkoonjarruttava vaihtoehto, joista jälkimmäisessä käytetty AFE-teknologia on oletuksena DOL-toteutuksessa. Ratkaisun sisältäessä syöttömuuntajan, käytetään yleisimmin low harmonic –toteutuksen yhteydessä DFE-tekniikkaa. Tässä opinnäytetyössä kuitenkin myös syöttömuuntajan yhteydessä käytetään AFE:tä, jolloin muuntajaksi on voitu valita perinteinen kaksikäännyksimuuntaja (**Taulukko 15.**). Tarkoituksena ei kuitenkaan ole syöttää tehoa takaisin verkkoon. Muuntaja voidaan toteuttaa joko ulkoisella tai integroidulla ratkaisulla, joista vertailuissa keskitytään vain edelliseen. Vertailuihin valittu syöttömuuntaja on suuruudeltaan 10 MVA:a.

Käytettäessä ulkoista syöttömuuntajaa ACS2000:n yhteydessä, voidaan muuntajalla syöttää verkon muutakin kulutusta. Tällöin muuntajan hintakustannukset jaetaan muiden kuormien tehojen perusteella kappaleessa 6.2.1 esitetyn yhtälön 3 mukaisesti.

Taulukko 15. Mahdollisen syöttömuuntajan tiedot ACS2000:n yhteydessä.

Muuntaja			
Jännite/kV	Koko	Tyyppi	Eristys
20/6	10 MVA	2-käämi	Valuharts

ACS2000:ssa käytetty AFE-teknologia takaa, että verkon harmoniset pysyvät standardien sallimissa rajoissa. Näin ollen imupiiriä ei tarvita. ACS2000 ei kuitenkaan sisällä oletusarvoisesti sinisuodinta, jolloin se tulisi huomioida osana taajuusmuuttajaratkaisua kaapelipituuksien ollessa pitkät tai asennettaessa taajuusmuuttaja räjähdysalttiille alueelle. Tässä yhteydessä olosuhteiden oletetaan olevan normaalit, jolloin sinisuodinta ei tarvitse huomioida osana taajuusmuuttajan hintaa kappaleessa 6.2 suoritettavien vertailujen yhteydessä.

6.2 Case-tapausten hintavertailu ja saadut tulokset

Tutkimustyön tarkoituksena on tarkastella kappaleessa 6.1 esitettyjen taajuusmuuttajatoteutusten kokonaiskustannuksia eri moottorikaapelipituuksilla, ja vertailla tuloksia keskenään tehoalueittain. Kaapelipituudet ovat ratkaisuihin yhtenäiset, vain syöttökaapelin pituus poikkeaa pien- ja keskijännitteratkaisujen välillä aiemmin todetun mukaisesti. Tuloksissa selvitetään kullekin tehoalueelle hinnaltaan ja teknisiltä ominaisuuksiltaan paras taajuusmuuttajatoteutus edellisessä kappaleessa esiteltyjen Case-tapausten pohjalta. Tulosten perusteella taajuusmuuttajaratkaisut luokitellaan paremmuusjärjestykseen, joissa edullista hintaa pidetään vertailun kannalta tärkeimpänä tekijänä. Taajuusmuuttajatoteutusten kokonaiskustannuksissa on huomioitu koko ratkaisu, mahdollista imupiiriä ja muuntajan allokoointia myöten. Teknisillä ominaisuuksilla viitataan pääosin häiriöpäästöihin.

Taajuusmuuttajaratkaisuille muodostuvat kokonaiskustannukset on eritelty alla olevaan taulukkoon 16, jossa ratkaisujen hinnat on esitetty suhdelukuina. Kokonaiskustannuksiltaan kalleinta ratkaisua on merkitty luvulla 10 000, johon muut ratkaisut on suhteutettu. Erittelyn ansiosta toteutuksen kokonaishintaan

merkittävimmin vaikuttavat tekijät voidaan paikantaa. Tulokset on taulukoitu tehoalueittain, moottorikaapelin pituuden ollessa yhteisenä muuttuvana tekijänä. Tarkastelut on suoritettu ainoastaan 10 kV:lla, sillä hintaero vastaaviin tarkasteluihin 6 kV:n jännitteellä on merkityksetön. Todelliset vertailussa käytetyt hintatiedot on koottu liitteeseen 1.

Taulukko 16. Taajuusmuuttajaratkaisujen kokonaiskustannukset suhdelukuina tehoalueittain eri moottorikaapelin pituuksilla, syöttöjännitteen ollessa 10 kV ja kalleimman vaihtoehdon saadessa arvon 10 000.

Case 1: ACS800-6p								
Verkon KJ-taso 10 kV	Teho/kW	630	1000	1600	2000	2500	3000	
	Taajuusmuuttaja	370	772	1 103	1 526	1 708	2 892	
	Moottori	747	910	953	1 089	1 316	1 371	
	Muuntaja	133	211	338	422	845	845	
	Moottorikaapeli /m	2	4	6	7	10	12	
	Syöttökaapeli /m	2	4	6	7	10	12	
	Imupiiri	155	155	155	155	155	155	
	Katkaisijakenttä 690 V	232	232	232	232	232	232	
	Summa							
	50 m	1 817	2 547	3 206	3 955	4 675	6 382	
	100 m	1 936	2 725	3 489	4 309	5 167	6 973	
	150 m	2 055	2 904	3 771	4 662	5 658	7 564	
	Case 2: ACS800-12p							
Verkon KJ-taso 10 kV	Teho/kW	630	1000	1600	2000	2500	3000	
	Taajuusmuuttaja	383	790	1 122	1 550	1 731	3 047	
	Moottori	747	910	953	1 089	1 316	1 371	
	Muuntaja	133	211	338	422	845	845	
	Moottorikaapeli /m	2	4	6	7	10	12	
	Syöttökaapeli /m	2	4	6	7	10	12	
	2x katkaisijakenttä 690 V	465	465	465	465	465	465	
	Summa							
	50 m	1 907	2 643	3 302	4 056	4 776	6 614	
	100 m	2 026	2 821	3 585	4 409	5 267	7 205	
	150 m	2 145	3 000	3 867	4 763	5 759	7 796	
	Case 3: ACS800-LH							
	Verkon KJ-taso 10 kV	Teho/kW	630	1000	1600	2000	2500	3000
Taajuusmuuttaja		775	1 342	1 923	2 645	2 888	5 483	
Moottori		747	910	953	1 089	1 316	1 371	
Muuntaja		133	211	338	422	845	845	
Moottorikaapeli /m		2	4	6	7	10	12	
Syöttökaapeli /m		2	4	6	7	10	12	
Katkaisijakenttä 690 V		232	232	232	232	232	232	
Summa								
50 m		2 066	2 962	3 871	4 919	5 701	8 818	
100 m		2 185	3 141	4 153	5 273	6 192	9 409	
150 m		2 305	3 319	4 436	5 626	6 684	10 000	

Case 4: ACS1000							
Verkon KJ-taso 10 kV	Teho/kW	630	1000	1600	2000	2500	3000
	Taajuusmuuttaja	1 347	1 596	1 881	2 645	3 003	3 270
	Moottori	679	947	1 215	1 274	1 457	1 548
	Muuntaja	2 064	2 064	2 064	2 064	2 064	2 064
	Moottorikaapeli /m	0	1	1	1	1	2
	Syöttökaapeli /m	1	1	1	1	1	2
	Summa						
	50 m	4 157	4 676	5 242	6 095	6 643	7 072
	100 m	4 182	4 702	5 275	6 150	6 703	7 162
	150 m	4 206	4 729	5 307	6 206	6 762	7 251
Case 5: ACS2000							
Verkon KJ-taso 6 kV	Teho/kW	630	1000	1600	2000	2500	3000
	Taajuusmuuttaja	1 454	2 052	2 606	3 107	Ei saatavilla	Ei saatavilla
	Moottori	778	981	1 224	1 399	-	-
	Moottorikaapeli /m	0	0	0	1	-	-
	Syöttökaapeli /m	0	0	0	1	-	-
	Katkaisijakenttä 6 kV	465	465	465	465	-	-
	Summa						
	50 m	2 738	3 539	4 345	5 024	-	-
	100 m	2 759	3 560	4 370	5 050	-	-
	150 m	2 780	3 581	4 395	5 077	-	-
Verkon KJ-taso 20 kV	Taajuusmuuttaja	1 454	2 052	2 606	3 107	Ei saatavilla	Ei saatavilla
	Moottori	778	981	1 224	1 399	-	-
	Muuntaja	88	139	223	279	-	-
	Moottorikaapeli /m	0	0	0	1	-	-
	Syöttökaapeli /m	0	0	0	1	-	-
	Katkaisijakenttä 6 kV	465	465	465	465	-	-
	Summa						
	50 m	2 826	3 679	4 568	5 303	-	-
	100 m	2 847	3 700	4 593	5 329	-	-
	150 m	2 868	3 721	4 618	5 355	-	-

Taulukon 16 mukaisista tuloksista voidaan havaita eri tekijöiden vaikutus taajuusmuuttajaratkaisujen kokonaiskustannuksiin. Kokonaiskustannusten muodostumisesta on tehty edelleen graafi, joka selkeyttää tulosten luettavuutta ja havainnollistaa paremmin ratkaisujen välisiä hintaeroja (**Liite 2**). Tulosten

pohjalta voidaan lisäksi taajuusmuuttajaratkaisut luokitella paremmuusjärjestykseen moottorikaapelin pituuden ollessa muuttavana tekijänä (**Taulukko 17.**). Taulukossa esiintyvät luvut on värjätty, jotta tuloksien lukeminen helpottuisi. Numerolla 1 tarkoitetaan kustannuksiltaan halvinta vaihtoehtoa ja vastaavasti numerolla 6 epäedullisinta eli hintavinta ratkaisua. Tehoalueilla 2500 kW ja 3000 kW ei edellisessä kappaleessa 6.1 todetun mukaisesti voida käyttää ACS2000-taajuusmuuttajaa, minkä vuoksi tulos on jätetty taulukkoon merkitsemättä. Taulukon 17 avulla kyetään lisäksi paikantamaan rajapinnat, jolloin on edullisempaa siirtyä pienjännitteisistä taajuusmuuttajista keskijännitteisiin vaihtoehtoihin.

Taulukko 17. Taajuusmuuttajaratkaisujen paremmuusjärjestys hintansa perusteella.

50 m						
Teho/kW	630	1000	1600	2000	2500	3000
ACS800 6-p	1	1	1	1	1	1
ACS800 12-p	2	2	2	2	2	2
ACS800 LH	3	3	3	3	3	4
ACS1000	6	6	6	6	4	3
ACS2000 DOL	4	4	4	4	-	-
ACS2000 20 kV	5	5	5	5	-	-
100 m						
Teho/kW	630	1000	1600	2000	2500	3000
ACS800 6-p	1	1	1	1	1	1
ACS800 12-p	2	2	2	2	2	3
ACS800 LH	3	3	3	4	3	4
ACS1000	6	6	6	6	4	2
ACS2000 DOL	4	4	4	3	-	-
ACS2000 20 kV	5	5	5	5	-	-
150 m						
Teho/kW	630	1000	1600	2000	2500	3000
ACS800 6-p	1	1	1	1	1	2
ACS800 12-p	2	2	2	2	2	3
ACS800 LH	3	3	4	5	4	4
ACS1000	6	6	6	6	3	1
ACS2000 DOL	4	4	3	3	-	-
ACS2000 20 kV	5	5	5	4	-	-

Caset 1 ja 2: ACS800, 6-ja 12-p

Taajuusmuuttajaratkaisujen paremmuusjärjestyksen nähdään pysyvän pienillä tehoalueilla pääosin samana moottorikaapelin pituudesta huolimatta. Keskiännitetaajuusmuuttajat ovat epäedullisia pienillä tehoalueilla, taajuusmuuttajan hinnan muodostaessa suurimman osan ratkaisun hinnasta. Keskiännitetaajuusmuuttajat ovat kaksi kertaa pienjännitteisiä kalliimpia, niiden ollessa lisäksi kyseisille tehoille ylimitoitettuja. Näin ollen **edullisimmaksi** ratkaisuksi osoittautuu 6-pulssisella dioditasasuuntaajalla varustettu ACS800, jonka hinta pysyy ratkaisulle välttämättömästä imupiiristä huolimatta muita taajuusmuuttajatoteutuksia kannattavampana. Syynä tähän on pääosin taajuusmuuttajan edullinen hinta, joka on alle puolet vastaavan low harmonic – toteutuksessa käytetyn taajuusmuuttajan hinnasta ja yli kolmaosan halvempi keskiännitteisistä vastaavista. Lisäksi muuntajan kustannuksien jakautuminen muiden syötettävien kuormien kesken alentaa ratkaisun kokonaishintaa merkittävästi. Ratkaisun yhteydessä voidaan myös käyttää tavanomaista kaksikäännyttävää muuntajaa, joka on erikoismuuntajaa halvempi ratkaisu. Moottorikustannukset ovat tätä vastoin kaikkien taajuusmuuttajaratkaisujen kesken likimain samat 630-1600 kW:n tehoalueella, jolloin niiden kustannukset eivät muodostu avaintekijöiksi tuloksien kannalta.

Taajuusmuuttajaratkaisusta 12-pulssisella dioditasasuuntaajalla varustettu ACS800 on taulukon 17 mukaisesti kannattavuudeltaan **seuraava vaihtoehto**. Taajuusmuuttajaa lukuunottamatta on ratkaisu 6-pulssisen toteutuksen kanssa identtinen. Myös muuntajalta syötettävä teho-osuus ja siten hintakustannukset ovat samat 6-pulssiseen ratkaisuun nähden. Ratkaisevaksi tekijäksi näiden taajuusmuuttajatoteutusten välillä osoittautuukin pienjännitteinen syöttökatkaisijakenttä, joita 12-pulssisessä toteutuksessa tarvitaan kaksi. Syötön teho on toisaalta puolta pienempi kuusipulssiseen toteutukseen verrattuna, mutta katkaisijakentän hintaan sillä ei ole merkittävää vaikutusta. Katkaisijakenttä on likimain samanhintainen 6-pulssisessä ratkaisussa tarvittavan imupiirin kanssa, mutta hintojen erotus on olennainen lopputuloksen kannalta. Yksinään

pienjännitteisen 690 V:n katkaisijakentän osuus kokonaishinnasta on kuitenkin melko pieni.

Perinteisen 6-pulssisen taajuusmuuttajatoteutuksen kannattavuutta voidaan toisaalta ajatella harmonisten yliaaltojen kannalta. Tarkasteltavassa Case 1:ssä on huomioitu imupiiri vain 5. harmoniselle yliaallolle, vaikka tavanomaisesti verkossa esiintyy sen yhteydessä merkittävästi myös 7. yliaaltoa. Koska yksi imupiiri mitoitetaan aina vain tietylle yliaaltotaajuudelle, tulisi näin ratkaisuun lisätä imupiirejä verkossa esiintyvälle muillekin yliaaltotaajuuksille. Tämä puolestaan toisi ratkaisulle lisähintaa. Näin ollen syöttöverkon yliaaltopitoisuuden ollessa merkittävä, osoittautuu 12-pulssinen ACS800 kustannuksiltaan ratkaisevasti 6-pulssista toteutusta kannattavammaksi. Lisäksi 12-pulssisen toteutuksen avulla syöttöverkkoon siirtyvät yliaaltopitoisuudet ovat paremmin hallittavissa.

Case 3: ACS800, low harmonic

Kolmanneksi edullisin ratkaisu on pienjännitteinen low harmonic –taajuusmuuttaja, keskijänniteratkaisujen yhä ollessa pienillä tehoilla epäedullisia. Huolimatta huomattavasti kalliimmasta taajuusmuuttajasta verrattaessa muihin pienjänniteratkaisuihin, tulee ratkaisu kokonaisuudessaan keskijännitteisiä taajuusmuuttajia edullisemmaksi. Itse low harmonic –taajuusmuuttajan nähdään olevan jopa keskijännitteistä ACS1000-taajuusmuuttajaa kalliimpi, mutta kokonaiskustannuksiltaan se osoittautuu kuitenkin hinnaltaan ACS1000-ratkaisua otollisemmaksi. Syynä tähän on taajuusmuuttajassa yliaaltojen hallitsemiseen käytetty kallis teknologia, jonka ansiosta taajuusmuuttaja soveltuu vaativiinkin kohteisiin. On kuitenkin hyvä arvioida, onko kohteen kannalta tarpeellista käyttää juuri low harmonic –teknologiaa, vai olisiko esimerkiksi 630-1600kW:n tehoalueella 12-pulssinen ACS800 kannattavampi mahdollisilla lisäsuotimilla varustetuna.

Low harmonic –toteutuksen **kannattavuusraja** tulee vastaan 1600 kW:lla moottorikaapelin ollessa 150 m. Keskijännitteinen ACS2000:n DOL-toteutus osoittautuu low harmonic –taajuusmuuttajaa edullisemmaksi, huolimatta keskijännitteisen syöttökatkaisijakentän kaksinkertaisesta hinnasta pienjännitteiseen katkaisijakenttään nähden. Syynä tähän ovat säästöt kaapelikustannuksissa, mikä osoittautuu ratkaisevaksi moottorikaapeleiden ollessa pitkiä (**Taulukko 18.**). Keskijänniteratkaisujen kaapelikustannuksien nähdään olevan huomattavasti edullisemmat vastaaviin pienjännitetaajuusmuuttajien kaapelointiin nähden jo aiemmin kappaleessa 6.1 esitetyistä syistä. Kuparikaapeleiden sijaan voidaan käyttää edullisempaa alumiinikaapelia, eikä SU- ja INU-yksiköiden merkitystä kaapelointiin ja asennuskustannuksiin tarvi pienjännitetaajuusmuuttajien tavoin ottaa huomioon. Pelkästään syöttökaapelikustannukset keskijännitteellä ovat kolmasosan pienjännitteen vastaavista, kaapelin ollessa kaksi kertaa pidempi vastaavaan pienjännitteiseen kaapeliin nähden. Moottorikaapelikustannukset ovat pienjännitteellä melkein kuusinkertaiset vastaaviin kustannuksiin keskijänniteratkaisuissa. Varsinaiset ACS2000 DOL-toteutuksen säästöt muuntajassa eivät ole vielä 1600 kW:lla olennaiset, vaikka muuntajattomuus mahdollistaakin ratkaisun kilpailukykyisyyden pienjännitteisten toteutuksien kanssa. Muutoin DOL-toteutus olisi osoittautunut edullisemmaksi jo 50 m ja 100 m:n kaapelipituuksilla.

Taulukko 18. Esimerkki kaapelipituuden vaikutuksesta kokonaishintaan pien- ja keskijännitetaajuusmuuttajaratkaisujen välillä.

Teho: 1600 kW			
Moottorikaapelin pituus	50 m	100 m	150 m
Case 1: ACS800, 6-p	283	566	848
Case 5: ACS2000	25	50	74

Case 4: ACS1000

Taulukon 17 tuloksien perusteella huomataan ACS1000-taajuusmuuttajan olevan kustannuksiltaan **kallein**, vaikka tarkastelu ei sisällä muiden tavoin

katkaisijakenttää. Syynä tähän ovat ratkaisun muuntajakustannukset. Muuntajana käytetään kolmikäämimuuntajaa, jonka hinta muodostaa muihin ratkaisuihin verrattaessa jopa yli kolmasosan ratkaisun kokonaishinnasta, muissa ratkaisuissa osuuden ollessa noin 5-10 %. Poiketen muista taajuusmuuttajaratkaisuista, ei ACS1000:ssa muuntajaa voida allokoida, eikä siten sen kustannukset jakaudu muun kulutuksen kesken.

Huolimatta viimeisestä sijasta, muodostaa ACS1000 **poikkeuksen** tehoalueella 2500 kW, moottorikaapelin ollessa 150 m. Tällöin ACS1000 taajuusmuuttajaratkaisu on ensimmäistä kertaa pienjännitteisiä kannattavampi verrattaessa hintaa low harmonic -toteutukseen. Seuraava ACS1000:n rajapinta tulee vastaan tehoalueella 3000 kW moottorikaapelin ollessa 100 metriä, jolloin kyseinen taajuusmuuttajaratkaisu osoittautuu kustannuksiltaan heti 6-pulssisen ACS800-toteutuksen jälkeen edullisimmaksi. Näin ollen keskijännitteinen ACS1000 tulee hinnaltaan jopa 12-pulssista ACS800-taajuusmuuttajaratkaisua kannattavammaksi. Syynä tähän ovat kaapelointikustannukset, jotka ovat keskijänniteratkaisuissa pienjänniteratkaisuja edullisemmat. Kaapelointikustannuksien merkitys korostuu entisestään mentäessä tehoalueessa ylöspäin, kaapelointikustannuksien kasvaessa tehojen suhteessa.

Ratkaisevaksi tekijäksi osoittautuu erityisesti myös syöttömuuntajakustannukset. Tehoalueella 2500-3000 kW ei pienjänniteratkaisuissa muuntajalla syötetä verkon muuta kulutusta, jolloin myöskään muuntajan hinta ei jakaannu tehojen suhteessa. Aiemmasta poiketen muuntajan hinta allokoituu siis kokonaan kyseiselle käytölle, mikä luonnollisesti lisää taajuusmuuttajaratkaisun kustannuksia. Muuntajakustannuksien lisäksi ratkaisevaksi tekijäksi ymmärretään ACS2000-taajuusmuuttajan tehoalueen riittämättömyys, jolloin sen käyttö kyseisillä tehoilla ei ole mahdollista.

Tehoalueella 3000 kW ja moottorikaapelin pituuden ollessa 150 metriä, osoittautuu ACS1000-keskijännitetaajuusmuuttajalla toteutettu ratkaisu kaikkia pienjännitteisiä ACS800-taajuusmuuttajaratkaisuja kannattavammaksi, kaapelointikustannuksien muodostuessa jälleen avaintekijäksi. Syynä ensimmäiseen sijaan lienee kaapelointikustannuksien ohella jälleen ACS2000-

taajuusmuuttajan tehoalueen riittämättömyys. Low harmonic –taajuusmuuttaja on puolestaan vesijäähdytteisenä eli 3000 kW:lla hyvin kallis, hinnan lähestyessä lähes kaksinkertaista arvoa verrattuna vastaavan taajuusmuuttajan hintaan 2500 kW:lla. Näin ollen myös low harmonic –taajuusmuuttaja sulkeutuu pois kustannussyistä 3000 kW:lla kaikilla kaapelipituuksilla.

Case 5: ACS2000

Ensimmäisen kerran keskijännitetaajuusmuuttaja osoittautuu pienjännitetaajuusmuuttajaratkaisua edullisemmaksi 1600 kW:n kohdalla moottorikaapelin ollessa 150 m. Kuten aiemmin tässä kappaleessa jo todettiin, on syynä kaapeloinnin vaikutus ratkaisevasti kokonaishintaan.

Tehoalueen noustessa 2000 kW:iin tulevat molemmat ACS2000-ratkaisut pienjännitteistä low harmonic –taajuusmuuttajaratkaisua kannattavammaksi, pienjännitteisten ACS800 6- ja 12-pulssisten taajuusmuuttajien ollessa yhä listan kärjessä. ACS2000 DOL-toteutus tulee ACS800 low harmonic –toteutusta edullisemmaksi 100 metrin moottorikaapelilla ja vastaavasti muuntajan sisältävä ACS2000 20 kV muuttuu kannattavammaksi 150 metrillä. Syynä tähän ovat kaapeloinnin lisäksi low harmonic –taajuusmuuttajan hinta yli 1600 kW:lla suhteessa muihin pienjännitetaajuusmuuttajiin sekä DOL-tekniikan mahdollistama säästö muuntajan jäädessä pois. Vastaavasti ACS2000 20 kV:n ratkaisussa 10 MVA:n muuntajan hinta suhteessa kuorman tehoon verrattaessa ACS800 low harmonic –toteutukseen on pienempi, mikä osaltaan kompensoi keskijännitteistä katkaisijakentän hintaa. ACS2000:n laitekustannuksien ero suhteessa low harmonic –ratkaisuun ei ole suurempi kuin pien- ja keskijänniteratkaisujen kaapelointikustannuksien erotus, jolloin ACS2000 menee molemmilla toteutuksilla ACS800 low harmonic –taajuusmuuttajaratkaisun edelle. ACS2000:n tehoalue kuitenkin rajoittuu 2000 kW:iin, joten tarkasteluita 2500 kW ja 3000 kW ei voida suorittaa.

7 POHDINTA

Tuloksien perusteella 6- ja 12-pulssiset ACS800 pienjännitetaajuusmuuttajat ovat selkeästi muita taajuusmuuttajaratkaisuja taloudellisesti kannattavampia, eikä keskijännitetaajuusmuuttajaratkaisuihin olisi kannattavaa siirtyä edes suurilla tehoalueilla. Tätä vastoin keskijännitetaajuusmuuttajista ACS2000:n DOL-toteutuksen kannattavuus näillä tehoilla näyttäisi lisääntyvän, kuten teorian perusteella osattiinkin odottaa. Valitettavasti ACS2000:n DOL-toteutuksen lopullista tulosta ei kuitenkaan voida nähdä taajuusmuuttajan rajallisen tehoalueen vuoksi. ACS1000 puolestaan jäi vertailuissa lähes aina viimeiseksi, muutamaa poikkeusta lukuunottamatta.

Vertailusta saatuihin tuloksiin tulee kuitenkin suhtautua sopivalla kriittisyydellä. Tuloksista ymmärretään hintaerojen olevan paikoittain hyvinkin pieniä eri taajuusmuuttajaratkaisujen välillä, jolloin pienikin muutos ratkaisun muodostumisessa voi osoittautua ratkaisevaksi taloudellisesti kannattavimman taajuusmuuttajatoteutuksen valinnassa. Tästä esimerkkinä on ACS800:n 6- ja 12-pulssiset taajuusmuuttajaratkaisut. Huolimatta näiden pienjännitetaajuusmuuttajien menestyksestä vertailuissa, ei tuloksista voida vielä lukea koko totuutta. Kuten jo edellisen kappaleen alla suoritetuissa vertailuissa todettiin, esiintyy todellisessa sähköverkossa usein 5. yliaallon lisäksi merkittävästi myös 7. yliaaltoa. Näin ollen ACS800 6-pulssiseen toteutukseen tulisi lisätä vähintään toinen imupiiri suodattamaan kyseiset yliaaltovirrat, mikä puolestaan lisäisi taajuusmuuttajatoteutuksen hintaa ratkaisevasti. Tällöin 12-pulssinen ratkaisu osoittautuisi 6-pulssista toteutusta halvemmaksi. Pelkkä kustannustehokkuus ei siis ole vielä syy valita taajuusmuuttajaa, vaan tärkeää on huomioida lisäksi tekninen näkökanta. Tämä on hyvin tärkeää mieltää erityisesti projektin tarjous- ja suunnitteluvaiheessa määritettäessä asiakkaalle tarjottavia ratkaisuja. Siten asiakas saa ostamansa palvelun laadukkaana ja toteutus palvelee mahdollisimman hyvin asiakkaan tarvetta.

Pienjännitetaajuusmuuttajilla pärjätään pääosin aina tavanomaisissa toteutuksissa. Erityisesti mikäli verkossa ei ole merkittäviä ongelmia yliaaltojen kanssa, on taajuusmuuttajien käyttö kannattavaa. ACS2000 ei kuitenkaan ole täysin poissuljettu vaihtoehto. Suurilla tehoalueilla voi projektin toteutuksen kannalta olla helpompaa valita ACS2000:n DOL-ratkaisu. Ratkaisun mahdollistama muuntajattomuus säästää tilaa, asennuskustannuksia, huollon tarvetta ja mahdollistaa pienjännitetaajuusmuuttajiin verrattaessa 690 V:n portaan poisjättämisen. Lisäksi taajuusmuuttajassa käytetty teknologia on suotuisampi muun sähköverkon kannalta. DOL-toteutus tulee kuitenkin kannattavaksi vasta pitkillä kaapelipituuksilla sekä suurilla tehoilla. Näin ollen on hyvä pohtia sähköverkon tilannetta ja kehitystä pitkällä aikavälillä, jotta valinta 12-pulssisen ACS800:n ja ACS2000 DOL-toteutuksen välillä osattaisiin tehdä. Keskiännitetaajuusmuuttajista ACS1000:n käytöstä voisi pitkälti luopua kokonaan, mikäli ACS2000:n tehoaluetta laajennettaisiin.

Tulokset ovat pitkälti viitteellisiä myös siksi, ettei tarkastelluissa Case-tapauksissa ole voitu huomioida teollisuusverkon todellista tilannetta. Jotta tarkastelut olisivat oikeelliset, tulisi verkon todelliset hyvyysluvut selvittää. Siten tiedettäisiin minkälaista suodatusta verkossa todellisuudessa tarvitaan. Esimerkiksi imupiirin hinnan jakaminen muun verkon kuormien kesken saataisiin siten todenmukaisemmaksi, vaikkei imupiirin hintaa voikaan hyvittää sellaisenaan käytölle. Näiden tekijöiden lisäksi teollisuusverkossa esiintyvät kuormat olisi hyvä kartoittaa, jolloin niiden vaikutus osaltaan sähköverkon hyvyyslukuihin osattaisiin arvioida. Mikäli tarkasteluista haluttaisiin mahdollisimman kattavat, tulisi single käyttöjen lisäksi huomioida myös monimoottorikäytöt. Tällöin selviäisi myös kuormien jarrutusenergioiden hyödynnettävyys osana sähkökäyttöä. Myös kaapelointi voi poiketa ratkaisevasti esimerkeissä esitetyistä. Todellisessa projektissa tulee lisäksi huomioida ensisijaisesti asiakkaan asettamat vaatimukset toteutukselle.

Näissä tarkasteluissa on perehdytty vain single drives –toteutuksiin, mutta vertailuista saatavien tulosten perusteella saadaan silti näkymää mahdollisia jatkotarkasteluita silmällä pitäen. Tähän opinnäytetyöhön tulostetut taulukot on

laskettu Excel – laskentataulukko-ohjelmalla, josta syntynyt laskentataulukko on hyödynnettävissä jatkoa ajatellen muidenkin taajuusmuuttajaratkaisujen kokonaiskustannuksien määrittämiseen. Laskentaohjelmalla voidaan nopeasti selvittää ratkaisun kannattavuus esimerkiksi muutettaessa yhtä tai useampaa tekijää toteutuksissa. Tästä esimerkkinä ACS800 12-pulssisen taajuusmuuttajaratkaisun kaksikäimitysmuuntajien korvaaminen yhdellä kolmikäämimuuntajalla. Opinnäytetyötä varten tehtyjä taulukoita voidaan myös käyttää pohjana muita laskentoja varten.

Opinnäytetyössä ei voitu huomioida kaikkia taajuusmuuttajaratkaisuihin vaikuttavia tekijöitä, jonka vuoksi aihe rajattiin koskemaan vain yleisimpiä taajuusmuuttajatoteutuksia. Jokaisen projektin ollessa keskenään erilaisia, ei spesifisiä tarkasteluita olisikaan voitu työssä suorittaa. Työn lopputuloksena onnistuttiin kuitenkin laatimaan tavoitteiden mukaiset vertailu- ja yhteenvetotaulukot, tuloksien ollessa kehityskelpoisia sekä hyödynnettävissä jatkossa myynnin lisäksi muillakin osa-alueilla. Keskijännitekäyttöjen ollessa yksikölle vielä toistaiseksi vähemmän tavanomaisia, perehdyttää tämä opinnäytetyö myös niiden ominaisuuksiin ja käytettävyyteen. Tämä osaltaan helpottaa vertailua pien- ja keskijännitetoteutuksien välillä ja selkeyttää taajuusmuuttajan valintaa eri projekteihin.

LÄHTEET

- /1/ ABB in brief. Viitattu 25.9.2013.
<http://new.abb.com/about/abb-in-brief>
- /2/ ABB lyhyesti. ABB Suomessa. Viitattu 25.9.2013
<http://www.abb.fi/cawp/fiabb251/0b5e2755355c156dc12579bb003910a4.aspx>
- /3/ ABB lyhyesti. Avainluvut. Viitattu 25.9.2013
<http://www.abb.fi/cawp/fiabb251/4c7fb86040626fd9c2256b2000427c68.aspx>
- /4/ ABB lyhyesti. Historia. Viitattu 25.9.2013
<http://www.abb.fi/cawp/fiabb251/4c7fb86040626fd9c2256b2000427c68.aspx>
- /5/ ABB lyhyesti. Kestävä kehitys. Ympäristö. Viitattu 25.9.2013.
<http://www.abb.fi/cawp/fiabb253/608680688e4b006fc125749600284b2f.aspx>
- /6/ ABB lyhyesti. Teknologia. Viitattu 25.1.2013.
<http://www.abb.fi/cawp/fiabb255/30a8c11be074053fc22569d00052bd7e.aspx>
- /7/ ABB Oy. ABB drives in mining. Medium voltage drives for reduced energy consumption and optimized process control. 2012. Viitattu 31.10.2013
[http://www05.abb.com/global/scot/scot216.nsf/veritydisplay/2205e72865c2c747c1257a620026d001/\\$file/Mining%20brochure_EN_lowres.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot216.nsf/veritydisplay/2205e72865c2c747c1257a620026d001/$file/Mining%20brochure_EN_lowres.pdf)
- /8/ ABB Oy. ABB Industrial Drives. ACS800 single drives catalog. 2013. Viitattu 23.10.2013
[http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/fcad7e1548b9e934c1257b67003616fe/\\$file/EN_ACS800singledrivescatalogRevO.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/fcad7e1548b9e934c1257b67003616fe/$file/EN_ACS800singledrivescatalogRevO.pdf)
- /9/ ABB Oy. ABB industrial drives. ACS880-01, single drives 0.55 to 250 kW Catalog. 2011. Viitattu 23.10.2013.
http://www.sibocom.com/uploads/documents/Catalogs/Drives/AC_Low_voltage_drives/Promyshlennye_privody_ACS810_ACS800_ACS880/ACS880/ACS880-01_Odinochnyi%20privod_EN_REVD.pdf
- /10/ ABB Oy. ABB industrial drives. User's manual FSO-11 safety functions module. Viitattu 23.10.2013
[http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/d8a6d3bae4d10c55c1257b980021afb1/\\$file/EN_FSO_11_UM_D_screenres.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/d8a6d3bae4d10c55c1257b980021afb1/$file/EN_FSO_11_UM_D_screenres.pdf)

- /11/ ABB Oy. ABB:n taajuusmuuttajat. Tuoteluettelo. 2006. Viitattu 16.10.2013
http://www.sahkokonekorjauspursiainen.fi/tiedostot/ABB_taajuusmuuttajat_valintaopas_REV_D_FI.pdf
- /12/ ABB Oy. ACS800 Tuoteluettelo. Työkalut ja lisävarusteet. 2003. Viitattu 23.10.2013
http://www180.abb.com:9010/ac/8518/C02%20Customer%20Documents/11.Taajuusmuuttaja_ACS800.pdf
- /13/ ABB Oy. ACSM1-04 Taajuusmuuttajamoduulit Laiteopas . 2008. Viitattu 7.10.2013
[http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/5f34a6fa9e7c9210c125741100377c74/\\$file/FI_ACSM1-04_55to110kW_HWMan_Rev_A_sreenres.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/5f34a6fa9e7c9210c125741100377c74/$file/FI_ACSM1-04_55to110kW_HWMan_Rev_A_sreenres.pdf)
- /14/ ABB Oy. Automaatio11 – 4.-6.10.2011 Loppukooste. Viitattu 26.9.2013
2_LOPPUKOOSTE_Automaatio11_10_2011_7_Mom_1711_ppt
- /15/ ABB Oy. Drives and controls. The green guide to more profitable business.2013. Viitattu 24.10.2013
<http://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3AFE68401771&LanguageCode=en&DocumentPartId=1&Action=Launch>
- /16/ ABB Oy. High voltage induction motors. Technical catalog for IEC motors. 2011. Viitattu 26.11.2013
[http://abblibrary.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/593ffc2bb0b08efac1257917003fae1c/\\$file/HV_Induction_motors_technical_IEC_catalog_FINAL_EN_092011_lowres.pdf](http://abblibrary.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/593ffc2bb0b08efac1257917003fae1c/$file/HV_Induction_motors_technical_IEC_catalog_FINAL_EN_092011_lowres.pdf)
- /17/ ABB Oy. Industry Solutions. Viitattu 26.9.2013
<http://www.abb.fi/cawp/fiabb251/c6854499eded9f38c1257961003edcec.aspx>
- /18/ ABB Oy. Process Industry Sähköistyksen esittely. Viitattu 26.9.2013
1_Sähköistyksen_esittely_short.pdf
- /19/ ABB Oy. Product brochure. Medium voltage AC drive ACS1000 ACS1000i.2012. Viitattu 29.10.2013.
[http://www05.abb.com/global/scot/scot216.nsf/veritydisplay/f8f2f0ed4f9b0b81c1257abf002ab813/\\$file/ACS%201000%20EN%20Rev%20H_lowres.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot216.nsf/veritydisplay/f8f2f0ed4f9b0b81c1257abf002ab813/$file/ACS%201000%20EN%20Rev%20H_lowres.pdf)

- /20/ ABB Oy.Product brochure. Medium voltage AC drive ACS2000. 2012. Viitattu 30.10.2013.
[http://www05.abb.com/global/scot/scot216.nsf/veritydisplay/c4f310e455b0b4dc1257abf002b980c/\\$file/ACS%202000%20EN_brochure_RevE_lowres.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot216.nsf/veritydisplay/c4f310e455b0b4dc1257abf002b980c/$file/ACS%202000%20EN_brochure_RevE_lowres.pdf)
- /21/ ABB Oy.Product guide.ABB medium voltage drives. (s. 22-23). 2010. Viitattu 29.10.2013.
<http://pdf.directindustry.com/pdf/abb-motors-drives-power-electronics/abb-drives-product-guide/30286-180458-22.html>
- /22/ ABB Oy. Safety and functional safety. A general guide. 2010.
- /23/ ABB Oy.Safety and functional safety.A general guide.2010. Viitattu 17.10.2013
[http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/2d936e3efe5089ddc12576cd0028dce8/\\$file/1sfc001008b0201.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/2d936e3efe5089ddc12576cd0028dce8/$file/1sfc001008b0201.pdf)
- /24/ ABB Oy. Taajuusmuuttajat. Viitattu 26.9.2013
<http://www.pkky.fi/Resource.phx/pkky/projektit/taitaja-osaaminen/sahko.htx.i2025.pdf>
- /25/ ABB Oy. Tekninen erittely ACS800 taajuusmuuttajat. 2007. Viitattu 23.10.2013
<http://www180.abb.com:9010/ac/6314AC02/A05%20Quotation/Taajuusmuuttajat%20Tarjous%20liitteineen/S2%20Tekninen%20erittely%20ACS800%20taajuusmuuttajat%2020.09.07.pdf>
- /26/ ABB Oy. Tekninen Opas nro 1.2001. Viitattu 29.9.2013
[http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/fdba0b31a34b89d1c1256d280040b4ae/\\$file/Tekninenopasnro1.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/fdba0b31a34b89d1c1256d280040b4ae/$file/Tekninenopasnro1.pdf)
- /27/ ABB Oy. Tekninen opas nro 3. 2000. PDS-käyttöjen asennus ja kokoonpano EMC-vaatimusten mukaan. Viitattu 8.10.2013
[http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/bb3f0dff646d5948c1256d2800411386/\\$file/technicalguideno_3fi.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/bb3f0dff646d5948c1256d2800411386/$file/technicalguideno_3fi.pdf)
- /28/ ABB Oy. Tekninen Opas nro 4. 2001. Viitattu 29.9.2013
[http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/32f0404329db7689c1256d2800411f0a/\\$file/Tekninen_opas_nro4.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/32f0404329db7689c1256d2800411f0a/$file/Tekninen_opas_nro4.pdf)
- /29/ ABB Oy. Tekninen opas nro. 6. Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas. 2001. Viitattu 7.10.2013
[http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/\\$file/Tekninen_opas_nro_6.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/$file/Tekninen_opas_nro_6.pdf)

- /30/ ABB Oy. Toiminnallisen turvallisuuden sovellusprosessimalli, Paperikoneen linjakäyttö. 2010. Viitattu 17.10.2013
http://www.tsr.fi/c/document_library/get_file?folderId=13109&name=DLFE-4401.pdf
- /31/ ABB Oy. Tuoteluettelo. ABB drives and controls. The green guide to more profitable business.2013.
- /32/ ABB Oy. Tuoteluettelo. ABB industrial drives. ACS800, single drive - taajuusmuuttajat, 0,55–5600 kW.
- /33/ ABB Oy. Tuotteet ja järjestelmät. ACS550-01. Viitattu 21.10.2013
<http://www.abb.com/product/seitp322/d73959c36cac7187c12578a00025f2c1.aspx>
- /34/ ABB Oy. Tuotteet ja järjestelmät. ACS1000. 2013. Viitattu 29.10.2013.
[http://www05.abb.com/global/scot/scot216.nsf/veritydisplay/f8f2f0ed4f9b0b81c1257abf002ab813/\\$file/ACS%201000%20EN%20Rev%20H_lowres.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot216.nsf/veritydisplay/f8f2f0ed4f9b0b81c1257abf002ab813/$file/ACS%201000%20EN%20Rev%20H_lowres.pdf)
- /35/ ABB Oy. Tuotteet ja järjestelmät. Pienjänniteverkon aktiivisuodattimet. Viitattu 12.10.2013
<http://www.abb.com/product/seitp329/3f1af44613f62310c1256ffe004e1e20.aspx>
- /36/ ABB Oy. Tuotteet ja järjestelmät. Taajuusmuuttajat ja tasavirtakäytöt. Viitattu 16.10.2013
<http://www.abb.fi/product/fi/9AAC100211.aspx?country=FI>
- /37/ ABB Oy. Tüv Nord. Certificate.2010. Viitattu 31.10.2013.
[http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/da0962f6f7a6792bc1257a6900316d9e/\\$file/ACS880_STO_certificate.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/da0962f6f7a6792bc1257a6900316d9e/$file/ACS880_STO_certificate.pdf)
- /38/ ABB Oy. Yliaaltosuodatin pienjänniteverkkoon. Viitattu 12.10.2013
[http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/140e4c78047a31a2c2256de5003364ad/\\$file/1tfc902004b1802.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/140e4c78047a31a2c2256de5003364ad/$file/1tfc902004b1802.pdf)
- /39/ ABB. Lehdistöiedotteet. Verkon loistehoa ja yliaaltoja kompensoiva sähkökäyttö. 2011. Viitattu 25.10.2013
<http://www.abb.com/cawp/seitp202/354d704744cf1ea1c12578a200261dac.aspx>

- /40/ Euroopan unionin julkaisutoimisto. Euroopan unionin virallinen lehti. Lainsäädäntö. 2010. Viitattu 6.11.2013.
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:308:FULL:FI:PDF>
- /41/ Functional Safety Finland. Viitattu 18.10.2013
<http://www.fsf.fi/>
- /42/ Harju, J. Insinööriyö. 2013. ACS880 toiminnallisuus. Vaasan ammattikorkeakoulu. Viitattu 17.10.2013
https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/57991/harju_joni.pdf?sequence=1
- /43/ Harsia, P. 2009. Kompensointitavat. Viitattu 12.10.2013
<http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/opintojaksot/030503/1134045922435/1134046524532/1134047263593/1134047404815.html>
- /44/ Heimonen T. 2008. Insinööriyö. Moottorien ylijännitesuojaus taajuusmuuttajakäytöissä. Helsingin ammattikorkeakoulu Stadia. Viitattu 29.9.2013
<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/38759/stadia-1210690152-6.pdf?sequence=1>
- /45/ Honkanen H. Taajuusmuuttajat. Kajaanin ammattikorkeakoulu. Viitattu 28.9.2013
http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honHar/ma/SVTEK_Taajuusmuuttajat.pdf
- /46/ JMK. EMC Filters/EMI Filters / RFI Filters Frequently Asked Technical Questions. Viitattu 11.10.2013
http://www.jmkfilters.com/faq.htm#EMI_filter
- /47/ Jokinen, K. Vaasan ammattikorkeakoulu. Yliopettaja. Opintomoniste. Moottorikäyttöjen ohjaus ja suojaus. Viitattu 26.9.2013
- /48/ Jokinen, K. Vaasan ammattikorkeakoulu. Yliopettaja. Opintomoniste. Moottorikäyttöjen säätö. Viitattu 25.9.2013, 27.9.2013 ja 28.9.2013
- /49/ Jokinen, K. Vaasan ammattikorkeakoulu. Yliopettaja. Opintomoniste. Suuntaajatekniikan sovellutukset. Viitattu 7.10.2013
- /50/ Jokinen, K. Vaasan ammattikorkeakoulu. Yliopettaja. Opintomoniste. Suuntaajatekniikka. Viitattu 27.9.2013 ja 28.9.2013
- /51/ Jokinen, K. Vaasan ammattikorkeakoulu. Yliopettaja. Opintomoniste. Teollisuuden sähköverkon ominaisuuksia. Viitattu 8.10.2013

- /52/ Kainulainen, K. 2012. Diplomityö. Monimoottorikäyttöjen suojaukset, mitoitus ja ohjeistus. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Viitattu 6.11.2013
- /53/ Kiiski, T. 2012. Diplomityö. Taajuusmuuttajien luotettavuus, huollettavuus ja kunnossapito teollisessa ympäristössä. Tampereen teknillinen yliopisto. Viitattu 26.9.2013
<http://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/21246/kiiski.pdf?sequence=1>
- /54/ Koponen, A. 2007. Diplomityö. Taajuusmuuttajan käytön ongelmat kiinteistöautomaatiossa. Espoon teknillinen korkeakoulu. Viitattu 9.10.2013
<http://lib.tkk.fi/Dipl/2007/urn007838.pdf>
- /55/ Korpinen, L., Mikkola M., Keikko T. & Falck E. Yliaalto-opus. Viitattu 7.10.2013
<http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/ylialto-opus.pdf>
- /56/ Koskenjoki, K. 2012. Diplomityö. Verkkovaihtosuuntaajan suuntaajasillan optimointi. Tampereen teknillinen yliopisto. Viitattu 14.10.2013
<http://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/21200/koskenjoki.pdf?sequence=1>
- /57/ Murata. Basics of Noise Countermeasures, Common mode choke coils. 2011. Viitattu 6.11.2013
http://www.murata.com/products/emicon_fun/2011/24/emc_en28.html
- /58/ Niemi, M. 2013. Viitattu 10.10.2013
- /59/ OEM Automatic. Yleistä verkkosuodattimista. Viitattu 10.10.2013
http://www.oem.fi/Tuotteet/Keskus/EMC-suodattimet/Yleista/Yleista_verkkosuodattimista/824316-516424.html
- /60/ Ristola, A. 2007. Insinööritö. Taajuusmuuttajan vaihtaminen pakkaajarobottiin. Helsingin ammattikorkeakoulu Stadia. Viitattu 28.9.2013
<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/6138/stadia-1182331891-5.pdf>
- /61/ Sentrige Control. Power Quality Filters - How do they work?. 2014. Viitattu 5.1.2013
<http://www.sentrige.com/power-quality-filters-how-do-they-work/>
- /62/ Sesko ry. 2012. SFS-käsikirja 600-2. Sähköasennukset. Osa 2: Säädökset, sähkötyöturvallisuus, erityisasennukset ja liittyvät standardit. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

- /63/ Sievä, E. 2013. Opinnäytetyö. Yliaaltojen suodatus laboratoriorio- ja toimistorakennuksissa. Tampereen ammattikorkeakoulu. Viitattu 12.10.2013
https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/61338/Sieva_Ella.pdf?sequence=1
- /64/ Stek. Sähkömagneettinen yhteensopivuus. 2011. Viitattu 9.10.2013
http://www.stek.fi/oikopolut/ammattilaiselle/fi_FI/sahkomagneettinen_yhteensopivuu/
- /65/ Suomisanakirja.fi. Taajuusmuuttaja. Viitattu 27.9.2013
<http://www.suomisanakirja.fi/taajuusmuuttaja>
- /66/ Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. 2012. Käsikirja rakennusten sähköasennukset D1 – 2012. Suojaus jännitehäiriöiltä ja sähkömagneettisilta häiriöiltä. Helsinki. Sähköinfo Oy.
- /67/ Sähköala.fi. Kevään standardiuudistukset tuovat lukuisia muutoksia. 2008. Viitattu 10.10.2013
http://www.xn--shkala-bua0m.fi/ajankohtaista/artikkeleita/saadokset_ja_maaraykset/fi_FI/standardimuutokset_08/_print/
- /68/ Tukes. EMC –sähkömagneettinen yhteensopivuus. 2013. Viitattu 9.10.2013
<http://www.tukes.fi/fi/Toimialat/Sahko-ja-hissit/Sahkolaitteet1/Sahkolaitteiden-vaatimukset/EMC---sahkomagneettinen-yhteensopivuu/>
- /69/ Tukes. Tukes opas. Turva-automaatio prosessiteollisuudessa. 2008. Viitattu 17.10.2013
http://www.tukes.fi/Tiedostot/kemikaalit_kaasu/Turva-automaatio_prosessiteollisuudessa.pdf
- /70/ Tuovinen, O. Vaasan ammattikorkeakoulu. Lehtori. Opetusmateriaali. Automaatiotekniikan perusteet. Viitattu 28.9.2013
- /71/ Viestintävirasto. Sähkömagneettisia radiotaajuisia häiriöitä sekä sähkön toimituksen laatua koskevat valitukset. 2013. Viitattu 10.10.2013
<https://www.viestintavirasto.fi/ohjausjavalvonta/ohjeettulkinnatsuosituksentaselvitykset/ohjeidentulkintojensuositustenjaselvitystenasiakirjat/sahkomagneettisaradiotaajuisiahairioitasekasahkontoimituksenlaatuakoskevatvalitukset.html>

- /72/ Vähäylikkä, M. Opinnäytetyö. Koneturvallisuus osana sähkösuunnittelua. 2013. Viitattu 17.10.2013
https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/60203/Vahajylkka_Mikko.pdf?sequence=1

Liite poistettu tilaajan pyynnöstä.

Taajuusmuuttajataratkaisujen kustannusdiagrammi

