

Eero Santamala

Taajuusmuuttajien käyttö kaivoksissa

Sähkötekniikan korkeakoulu

Kandidaatintyö

Espoo 1.12.2014

Vastuupettaja ja ohjaaja:

TkT Pekka Forsman

Tekijä: Eero Santamala

Työn nimi: Taajuusmuuttajien käyttö kaivoksissa

Päivämäärä: 1.12.2014

Kieli: Suomi

Sivumäärä: 5+13

Koulutusohjelma: Automaatio- ja systeemitekniikka

Vastuupettaja ja ohjaaja: TkT Pekka Forsman

Tiivistelmä suomeksi.

Avainsanat: Avainsanoiksi valitaan kirjoituksen sisältöä keskeisesti kuvaavia käsitteitä

Esipuhe

Kiitos ABB ja sillee jee.

Otaniemi, 1.12.2014

Eero H. Santamala

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	ii
Esipuhe	iii
Sisällysluettelo	iv
Symbolit ja lyhenteet	v
1 Johdanto	1
2 Kaivosympäristön vaatimukset taajuusmuuttajalle	3
2.1 Ympäristöolosuhteet	3
2.1.1 Lämpö	3
2.1.2 Kosteus	4
2.1.3 Pienpartikkelit	6
2.1.4 Mekaaniset rasitukset	6
2.2 Kaivoksen sähköverkko	6
2.3 Käyttöikä ja luotettavuus	6
2.4 Kaivosteollisuuden standardit	6
3 Taajuusmuuttajien toiminnallisuus	7
3.1 Toimintasyklit	7
3.2 Turvallisuustoiminnot	7
3.3 Mittaukset	7
3.4 Ohjaus ja -valvontajärjestelmät	7
3.5 Verkkoon jarruttavat taajuusmuuttajat	7
4 Taajuusmuuttajien sovellukset kaivoksissa	8
4.1 Kokoluokat ja sijoittelu	8
4.2 Sovellukset	8
4.2.1 Kaivinkoneet	8
4.2.2 Liukuhihnat ja kuljettimet	8
4.2.3 Murskaimet	8
4.2.4 Hissit	8
4.2.5 Tuulettimet ja ilmanvaihto	8
4.2.6 Pumput	8
4.2.7 Paineilman tuottaminen?	9
5 Yhteenveto	10
Viitteet	11
A Liite 1	13

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

Operaattorit

Lyhenteet

AC	vaihtovirta
DC	tasavirta
IEC	International Electrotechnical commission
NEMA	National Electrical Manufacturers Association

1 Johdanto

Taajuusmuuttajia käytetään yhä enenemässä määrin vaihtovirtasähkömoottoreiden ohjaukseen kaikilla teollisuudenaloilla ja erityisesti kaivosteollisuudessa [2, s. 262]. Erilaiset käyttöympäristöt ja -sovellukset vaikuttavat taajuusmuuttajalta vaadittuun toiminallisuuteen ja fyysisiin ominaisuuksiin. Käyttökohteesta riippuvat ominaisuudet luovat taajuusmuuttajavalmistajille näin tarpeen kartoittaa eri teollisuudenalojen erityisvaatimuksia, jotta tuotteet pystytään kehittämään vastaamaan asiakkaiden tarpeita mahdollisimman hyvin.

Tämän työn tarkoituksena on tarkastella kaivosteollisuuden asettamia vaatimuksia ja tarpeita taajuusmuuttajan toiminnallisuudelle ja kestävyydelle sekä kartoittaa millaisia eri sovelluksia taajuusmuuttajille kaivostoiminnassa esiintyy. Tämän työn yhteydessä kaivosteollisuudella tarkoitetaan kaivosta ja sen välittömässä läheisyydessä tapahtuvaa malmin siirtoa ja käsittelyä ja tarkastelu keskittyy yksinomaan siihen. Mineraalien jatkokäsittely kaivosalueen ulkopuolella muistuttaa jo tavanomaista prosessiteollisuutta, eikä siksi ole tämän työn kannalta mielenkiintoista.

Yleisin taajuusmuuttajan sijoituspaikka on sisätiloissa esimerkiksi tuotantolaitoksen sähköhuoneessa. Tällöin ympäristöolosuhteet saadaan pysymään hyvin tasaisina ja taajuusmuuttajan toiminnalle edullisina. Lämpötila- tai kosteusvaihteluita ei ilmastointijärjestelmän ansiosta juuri ole ja huoneen ilma on suodatettu pienpartikkeleista jo ennen sen pääsyä kosketuksiin taajuusmuuttajan kanssa. Kaivosteollisuudessa vastaavan tasaisen käyttöympäristön järjestäminen voi olla epäkäytännöllistä tai taloudellisesti kannattamatonta, jolloin taajuusmuuttajalta itseltään edellytetään kestävyyttä ja toimintavarmuutta vaativissakin käyttöympäristöissä. Myös kaivoksen sähköverkko asettaa taajuusmuuttajalle omat vaatimuksensa.

Työn alussa selvitetään kaivosympäristön erityisvaatimukset lähtien liikkeelle ympäristöolosuhteista. Osan tarkoituksena on luoda selvä kuva kaivoksen asettamista vaatimuksista siellä käytettävälle laitteistolle jotta voidaan ymmärtää mitä taajuusmuuttajilta vaaditaan. Tarkastelun alla ovat lisäksi standardit, jotka kaivosteollisuuden laitteita koskevat.

Seuraavassa osassa esitetään millaista toiminnallisuutta taajuusmuuttajien sisäisillä logiikkapiireillä voidaan toteuttaa ja miten niitä voidaan hyödyntää kaivosteollisuuden sovelluksissa. Viimeisessä osassa esitetään taajuusmuuttajien käyttökohteita kaivoksissa lähtien liikkeelle taajuusmuuttajien tyypillisestä sijoittelusta sekä tyypillisistä teho- ja jänniteluokista. Sovellukset-osio käy läpi suurimmat teollisuudenalan sähkövoimaa käyttävät sovellukset ja kertoo millaisia taajuusmuuttajaratkaisuja niissä käytetään ja mitä hyötyjä taajuusmuuttajien käyttö niissä tuo verrattuna perinteisiin ohjausratkaisuihin.

Työssä on oleellista taajuusmuuttajien hyödyntäminen ja niistä saatava lisäarvo kaivosteollisuuden asiakkaan näkökulmasta. Se keskittyy sovelluksiin ja niiden vaa-

timuksiin eikä niinkään taajuusmuuttajan sisäisiin ratkaisuihin näiden hyötyjen aikaansaamiseksi. Työ esittää alan olemassa olevat taajuusmuuttajaratkaisut ja pohtii mitä lisäarvoa taajuusmuuttajilla voitaisiin vielä saavuttaa.

2 Kaivosympäristön vaatimukset taajuusmuuttajalle

2.1 Ympäristöolosuhteet

Kuten todettu, kaivosympäristö on sähkölaitteille toimintaympäristönä erittäin raskas [2, s. 251]. Sähkölaitteille kaivoksissa raskasta aiheuttavia tekijöitä ovat

- Lämpötila
- Kosteus
- Ilman epäpuhtaudet
- Mekaaniset rasitukset

Suurin ympäristön aiheuttama vaara taajuusmuuttajien toiminnalle on ylikuumentuminen ja elektronisten komponenttien vaurioituminen kosteuden, ilman epäpuhtauksien, mekaanisten iskujen tai värinän seurauksena. Jotta taajuusmuuttajan luotettava toiminta voidaan taata, täytyy taajuusmuuttajan koteloinnin olla soveltuva käyttöympäristöönsä. Lähes kaikki taajuusmuuttajavalmistajat valmistavatkin taajuusmuuttajia eri suojausluokissa vastaamaan sovellusten vaatimuksia.

Euroopassa yleisesti käytössä oleva luokitus sähkölaitteen vesi- ja pölytiivyydelle on kansainvälisen sähköalan standardointitoimiston IEC:n IP-luokitus. Luokitus on kaksiosainen lähtien täysin suojaamattomasta IP00-luokasta ja päättyen täysin vesi- ja pölytiiviseen IP69-luokitukseen [LIITE 1 TÄHÄN]. Pohjois-Amerikassa on käytössä vastaava NEMA-tiiveysluokitus.

Markkinoilla olevat taajuusmuuttajat ulottuvat suojaamattomista IP00-laitteista aina lähes vesitiiviisiin IP66-laitteisiin. IP00 taajuusmuuttajat asennetaan poikkeuksetta ulkoisiin koteloihin, jännitteellisten komponenttien ollessa täysin esillä. IP21 on yleinen käytössä oleva luokka taajuusmuuttajille, jotka tulevat kuivaan tilaan esimerkiksi tehtaan sisälle. Märkin tai muuten erityistä suojausta vaativiin soveluksiin tarkoitettut IP66 laitteet kestävät suoran painevesiriuksun kaikista suunnista ja ovat täysin pölysuojattuja. Suuremman suojausluokituksen omaavat laitteet ovat luonnollisesti fyysisesti suurempia ja mekaanisesti haastavampia rakentaa. LÄHDE?

Seuraavissa kappaleissa eritellään eri ympäristötekijöiden merkitsevyys kaivosympäristössä. Tarkastelun alla ovat myös tavat mitä vaikutuksia näillä olosuhteilla on taajuusmuuttajien toiminnalle sekä miten nämä asiat on otettu huomioon taajuusmuuttajien suunnittelussa. Käsittely koskee pääosin maanalaisia kaivoksia avolouhosten olosuhteiden ollessa tavallista ulkoilmakäyttöä vastaavat.

2.1.1 Lämpö

Maanalaisissa kaivoksissa lämpöolosuhteet eroavat huomattavasti maanpäällisistä. Kaivoksessa lämpöä aiheuttaa itse kallioperän lämpö, ilman puristuminen, lämpimät

pohjavesivuodot, koneet, valaistus ja räjäytykset.

Etenkin syvissä kaivoksissa kallioperän lämpö on suurimpia kaivoksen sisäilman lämmittäjiä. Kallioperän lämpötila kasvaa syvemmälle mentäessä noin $25\text{--}30^\circ\text{C}/\text{km}$, joten jo kilometrin syvyisessä kaivoksessa lämpötila voi yltää $30\text{--}40^\circ\text{C}$ riippuen paikallisesta ilmastosta [1, s. 62]. Esimerkkinä todettakoon Suomen syvin metallikaivos Pyhäsalmella on 1400 metriä syvä, jolloin lämpötila ilman ilmanvaihtoa kohoaa yli kolmeen kymmeneen asteeseen.

Hyvin suunnitellussa kaivoksessa kuitenkin harvoin on ongelmana, että kaivoksen sisälämpötila olisi liian korkea laitteiden toiminnalle. Olennaista on, että lämpö pystytään johtamaan ulos sitä tuottavista laitteista ja ilmaa lämmittävästä kallioperästä jotta lämpötila pysyy koneille ja henkilöstölle edullisena. Ilmanvaihtojärjestelmän suunnittelun tärkeys tulee tässä vahvasti esille.

Taajuusmuuttajat ovat hyvin energiatehokkaita laitteita siirtäen noin 98% vastanottamastaan energiasta moottorille[12]. Energiasta 2% kuitenkin muuttuu taajuusmuuttajan sisäisenä häviönä lämpöenergiaksi. Tämä tarkoittaa esimerkiksi 500kW taajuusmuuttajan vaativan noin 10kW jäähdystystehon toimiakseen jatkuvasti. Tämä lämpöenergia poistetaan taajuusmuuttajasta ilma- tai nestejäähdytyksen avulla ympäristöön.

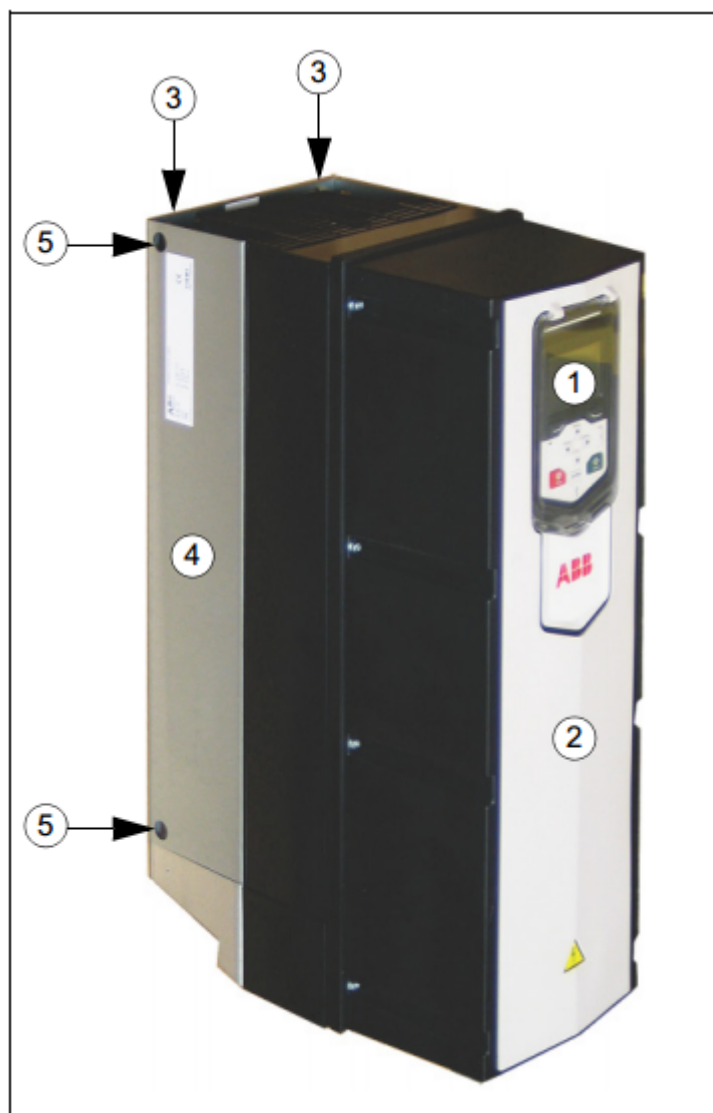
2.1.2 Kosteus

Kosteus voidaan jakaa kahteen luokkaan: ilmankosteuteen ja nestemäiseen veteen. Suurimman uhan sähkölaitteen toiminnalle aiheuttaa nestemäinen vesi, jota kondensoituu kosteasta ilmasta. Kaivoksissa suhteellinen ilmankosteus saattaa nousta hyvinkin koreaksi suljetun tilan sitoessa kostean ilmamassan. Syvimmissä kaivoksissa voidaan saavuttaa jopa yli 95% suhteellinen ilmankosteus [13]. Kondensoituvan veden lisäksi kaivoksissa täytyy ottaa huomioon myös katosta mahdollisesti tihkuva vesi.

Kaivoksen tekniikkaa suunniteltaessa on otettava huomioon sähkölaitteiden kosteudensieto ja sijoitettava laitteet joko eristettyyn sähkötilaan tai hankkia ne riittävällä suojausluokituksella varustettuna. Ilmajäähdytteisten laitteiden haasteena on yleisesti niiden pienempi IP-luokitus, mikä sallii veden kondensoitumisen laitteen sisälle[15]. Vesijäähdytys tarjoaa yleisesti paremman tiiveysluokituksen, sillä laitetta viilentää ilman sijasta suljettu nestejärjestelmä. Kaivoksen tilapäisen luonteen vuoksi nestejärjestelmät voivat kuitenkin osoittautua epäkannattaviksi.

Jotta myös ilmajäähdytteisiä laitteita pystytään käyttämään vaativissa olosuhteissa täytyy korkeamman suojausluokan laitteissa jäähdytysilma johtaa laitteen läpi sen pääsemättä kosketuksiin elektroniikan kanssa. Tämä on usein toteutettu jakamalla laite sisäisesti kahteen osaan: kosteudelle herkän elektroniikan sisältävään osioon ja jäähdytysosioon, jossa jäähdytyslementti sijaitsee. Lämpö johtuu komponenteista jäähdytyslementin säleikköön, josta se johtuu säleikön läpi kulkevaan ilmaan. Ilma

kierrätetään laitteen läpi tuulettimilla, joiden täytyy kestää ympäristön olosuhteet. Tuuletin onkin yksi ilmajäähdytteisen taajuusmuuttajan herkimmin hajoavia komponentteja. Kuva 1 esittää IP55 luokitellun taajuusmuuttajan, jossa jäähdytysilma ohjataan jäähdytyslementin kautta sen pääsemättä kosketuksiin elektronikan kanssa. [8].



	Kuvaus
1	Ohjauspaneeli ja ohjauspaneelin suojakansi
2	Etukansi
3	Neljä kiinnityspistettä laitteen takana
4	Jäähdytyslementti
5	Nostoaukot

Kuva 1: ACS880-01 taajuusmuuttaja IP55-koteloinnilla [14, s.28]

Toinen mahdollisuus on sijoittaa jäähdytyslementti laitteen ulkopuolelle, jolloin yleisesti puhutaan niin sanotusta laippa-asennuksesta (flange-installation). [Lähde] Tällä tekniikalla taajuusmuuttaja pysytään upottamaan ulkoiseen koteloon ja kierrättämään jäähdytysilma kotelon ulkopuolella esimerkiksi tuuletuskanavassa. Tämä eristää taajuusmuuttajan täysin tuuletusilmasta ja sallii tehokkaan lämmön poistamisen tuuletuskanavan välityksellä.

Kaivoksen kiinteissä asennuksissa on mahdollista rakentaa myös kokonaisia kosteuden- ja pölynkestäviä sähköhuoneita, joissa pystytään käyttämään normaalin IP21 tai IP20 tiiveysluokituksen omaavia sähkölaitteita [2, s.253]. Taajuusmuuttajien sijoittelu näihin pysyviin rakennelmiin voi kuitenkin olla kannattamatonta moottorikaapeli-pituuksien kasvaessa kohtuuttoman pitkiksi.

2.1.3 Pienpartikkelit

Kaivoksen ilmassa on kosteuden lisäksi pölyä ja muita kemikaaleja, joita muodostuu työkoneiden ja räjäytysten seurauksena.

Mitä kaikkea kaivoksissa pölyä : [16]

2.1.4 Mekaaniset rasitukset

- kuljetus,asennus
- Tärinä (murskaimet yms. Liikkuvat laitteet?)

2.2 Kaivoksen sähköverkko

Kaivoksen sähköverkko (EMC häiriöt)

- jännite,laajuus, häiriönsieto, EMC
- kuristimien/filttereiden tarpeellisuus

2.3 Käyttöikä ja luotettavuus

- kaivoksen ikä? Sama laite koko elinkaaren?
- Esim tuuletusjärjestelmän luotettavuus ensisijaisen tärkeää?
- Redundanttius?
- Virran katkeaminen? varavoimalähteet?

2.4 Kaivosteollisuuden standardit

- ex-luokitus: Räjähdysherkkä tila?
- mitä muita?

3 Taajuusmuuttajien toiminnallisuus

Milaisia toimintoja taajuusmuuttajista löytyy?

Tamujen kehitys

3.1 Toimintasyklit

- Millaisia tamuista löytyy (rampit, pid, vektoriohjaus, ABB:n DTC momenttiojaus,)
- Vaihtoehtoiset ohjaustavat (softstartterit yms), Hyödyt? (verkon heilahdukset, energiansäästö, tarkemmat prosessit)

—Nää ehkä sovellukset osioon?—

- Murskaimet [10]
- Kuljettimet (ramppikäynnistys? kuorman mukaan säätäminen?)
- Multidrive? ACS800 OPM (open pit mine) control program?

3.2 Turvallisuustoiminnot

- turvallisuus tärkeää, kaivokset vaarallisia jne.
- STO, miten voisi hyödyntää?
- Profisafe yms.

3.3 Mittaukset

- Kuljettimet, määrän mittaus kuormasta ja nopeudesta? -Mitä muuta (malmivirtojen mallinnus)

3.4 Ohjaus ja -valvontajärjestelmät

- Keskitetty automaatiojärjestelmä? -Kenttäväylät? -

3.5 Verkkoon jarruttavat taajuusmuuttajat

- miten käytännössä toimii
- Missä voidaan hyödyntää? (hissit, alamäkeen jarrutus, dumppitrukkien sähköraidejärjestelmä, yms.)

4 Taajuusmuuttajien sovellukset kaivoksissa

4.1 Kokoluokat ja sijoittelu

- Teho- ja jänniteluokat (kuvia!)
- Seinä,lattia,floorstanding
- Asennuspaikat
- fyysinen koko?
- Hyvät/huonot puolet
- kaapelien pituus, EMC

4.2 Sovellukset

4.2.1 Kaivinkoneet

- mitä erilaisia? (jäättävän isot osana sähköverkkoa vs pienet)
- Multidrive ohjaamaan kaikkea?

4.2.2 Liukuhihnat ja kuljettimet

- Millaisia erilaisia? (liukuhihnat,ruuvit,nostimet,yms.)
- Nykyratkaisut?
- Miten tamuja hyödynnetään? edut perinteiseen verrattuna?

4.2.3 Murskaimet

- Millaisia? kuinka isoja?
- Toimintasyklit? [10]
- Automaation taso?

4.2.4 Hissit

- Henkilöhissit, junat, karryt. Millä ihmiset liikkuu?

4.2.5 Tuulettimet ja ilmanvaihto

- Kaivoksen tuulettaminen!
- Miten tehty?
- Ohjaus, valvonta?
- Varajärjestelmät?

4.2.6 Pumput

- mutapumput, vesipumput.
- puhdistus
- mittaukset

4.2.7 Paineilman tuottaminen?

Paljon sähköä kuluttava?

Mihin käytetään kaivoksissa?

Miten tamuja voidaan hyödyntää?

5 Yhteenveto

- Energiansäästö
- Kustannukset
- Tarkemmat prosessit
- Tulevaisuus?
 - profit

Viitteet

- [1] Fridleifsson, Ingvar B., Bertani, Ruggero, Huenges, Ernst, Lund, John W., Ragnarsson, Arni ja Rybach, Ladislaus. *The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change*. IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources. Luebeck, Germany, 2008, Saatavissa: <http://www.ipcc.ch/pdf/supporting-material/proc-renewables-lubeck.pdf>
- [2] Hakapää, A. ja Lappalainen, P. *Kaivos- ja louhintatekniikka*. 2. painos. Helsinki, Vammalan kirjapaino Oy, 2007.
- [3] IEC 60529. *Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)*. Versio 2.1, Geneve, Sveitsi, International Electrotechnical Commission, 2001.
- [4] Rumpunen, A. *Tuulivoiman vaatimukset taajuusmuuttajalle*. Kandidaatintyö. Aalto-yliopisto. Insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo. 2012.
- [5] ABB Drives *Technical guide book*, 2008.
- [6] Lukkarinen T. *Mineraalitekniikka Osa 1 Mineraalien hienonnus*. Hki: Insinööritieto Oy, 1984.
- [7] Anttila A. *Kaivosten tuuletusilman energiatehokas lämmitys Suomessa*. Kandidaatintyö. Aalto-yliopisto. Insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo. 2014.
- [8] Muttilainen, A. *Lifetime and Reliability of a Frequency Converter's Fan*. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Sähkötekniikan korkeakoulu. Espoo. 2013
- [9] Karlsson, S. *Murskaintyyppien ominaisuuksien vertailu*. Kandidaatintyö. Aalto-yliopisto. Insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo. 2011.
- [10] Erik Hulthén, C. Evertsson, M. *Real-time algorithm for cone crusher control with two variables*. Minerals Engineering. 24. Painos. Numero 9. Elokuu 2011. s. 987-994. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2011.04.007>.
- [11] CUPP, *Pyhäsalmen kaivos*. Verkkodokumentti. Päivitetty 26.3.2013. Viitattu 6.10.2014. Saatavissa: http://www.cupp.fi/index.php?option=com_content&view=article&id=3&Itemid=41&lang=fi
- [12] ABB Oy. *ABB drives in mining*. Päivitetty 2012. Viitattu 6.10.2014. Saatavissa: [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)
- [13] Man-chao, H. *Application of HEMS cooling technology in deep mine heat hazard control*. Mining Science and Technology (China). 19. Painos, Numero 3. Toukokuu 2009. S. 269-275. Saatavissa: [http://dx.doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60051-X](http://dx.doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60051-X).

- [14] ABB Oy. 2012. *Laiteopas, ACS880-01-taajuusmuuttajat, Rev E*. Saatavissa: [http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/71ce8071e2a7ae2bc1257bd70046ade1/\\$file/FI_ACS880-01_0_55to250kW_HW_E_plus_update_notice_screen.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/71ce8071e2a7ae2bc1257bd70046ade1/$file/FI_ACS880-01_0_55to250kW_HW_E_plus_update_notice_screen.pdf). Päivitetty 29.6.2012. Viitattu 9.10.2014.
- [15] Pallasmaa, A. *Ulkokäyttöön Tarkoitettun Tehoelektroniikkalaitteen Konseptisuunnittelu*. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Espoo. 2009.
- [16] Hartman, H. Mutmansky, J. Ramani, R. Wang, Y. *Mine Ventilation and Air Conditioning*. Saatavissa: http://www.google.fi/books?id=xPpnf0dMwtoC&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs_atb#v=onepage&q&f=false.

A Liite 1

IP-luokat taulukossa