

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+23

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 Taajuusmuuttajien toiminnallisuus	3
2.1 Toimintasyklit	3
2.2 Ohjaus ja -valvontajärjestelmät	4
2.3 Turvallisuustoiminnot	6
2.4 Verkkoon jarruttavat taajuusmuuttajat ja jaettu välipiiri	8
3 Kaivosympäristön vaatimukset taajuusmuuttajalle	10
3.1 Ympäristöolosuhteet	10
3.1.1 Lämpö	11
3.1.2 Kosteus	11
3.1.3 Pienpartikkelit	13
3.1.4 Mekaaniset rasitukset	14
3.2 Kaivoksen sähköverkko	15
3.3 Käyttöikä ja luotettavuus	16
4 Taajuusmuuttajien sovellukset kaivoksissa	17
4.1 Kokoluokat ja sijoittelu	17
4.2 Sovellukset	17
4.2.1 Kaivoskoneet	17
4.2.2 Liukuhihnat ja kuljettimet	17
4.2.3 Murskaimet ja sekoittimet	17
4.2.4 Hissit	17
4.2.5 ilmanvaihto	17
4.2.6 Pumput	18
4.2.7 Paineilma	18
5 Yhteenveto	19
Viitteet	20
A Liite 1: Kotelointiluokitus standardin SFS-EN 60529 mukaan	23

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

Operaattorit

Lyhenteet

AC	Vaihtovirta
DC	Tasavirta
IEC	International Electrotechnical Commission
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
IP	Ingress Protection marking
PLC	Programmable Logic Controller
PID-Säädin	Proportional-Integral-Derivative-säädin
STO	Safe Torque Off
SIL	Safety Integrity Level
VSI	Voltage-Source Inverter

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 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 esitellään 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 Taajuusmuuttajien toiminnallisuus

Taajuusmuuttajat ovat laitteita, jotka muuttavat siihen syötetyn vaihtovirran amplitudia eli jännitettä ja sen taajuutta syöttäen sen siihen kytketylle sähkömoottorille. Taajuusmuuttajia käytetään vaihtovirtasähkömoottoreiden tehokkaaseen ohjaamiseen kaikkialla niiden tuodessa merkittäviä kustannussäästöjä perinteisiin ohjausmenetelmiin verrattuna. Suoraan sähköverkkoon kytketyt sähkömoottorit pyörivät sähköverkon määräämällä vakiotajuudella eli esimerkiksi Suomessa käytössä olevalla 60Hz taajuudella, jolloin pyörimisnopeuden säätöön tarvitaan esimerkiksi moottoriin kytketty vaihteisto tai jarru. Näillä tavoilla ohjatun moottorin pyörittämiseen syötetystä energiasta suuri osa kuluu esimerkiksi jarrun lämpenemiseen. Taajuusmuuttajalla pystytään tehokkaan nopeussäädön lisäksi ohjaamaan myös moottorin tuottamaa momenttia, mikä on tietyissä sovelluksissa kuten vinsseissä olennainen tekijä.

Tarkan nopeus ja momenttisäädön lisäksi taajuusmuuttajiin on viimeisten vuosikymmenten aikana kehittynyt paljon moottorin ohjaukseen liittyviä ominaisuuksia. Nykyaikaisissa taajuusmuuttajissa sisäänrakennettu mikroprosessori kykenee käsittelemään suuren määrän ohjaussignaaleja käyttäen perinteisiä digitaali- ja analogisignaaleja sekä kenttäväyliä. Sisäiset funktiot kykenevät monimutkaisiin moottorinohjaussykleihin, mitkä vähentävät tarvetta ulkoisille logiikkaohjaimille.

Tässä osassa käsitellään taajuusmuuttajien sisäistä toiminnallisuutta ja toimintojen tuomia käytännön hyötyjä eri sovelluksissa. Tarkastelun alla ovat myös taajuusmuuttajien integrointi osaksi sovellusten automaatiojärjestelmää ja useita yhteen kytkettyjä taajuusmuuttajia käsittävien järjestelmien tuomat edut.

2.1 Toimintasyklit

Olennainen osa taajuusmuuttajan toiminnallisuutta ovat siihen ohjelmoidut toimintasyklit eli automaattinen moottorinohjaus tietyn ohjelmoidun sarjan mukaan. Toimintasykli voidaan käynnistää käyttäjän toimesta mitä tahansa sisääntuloa esimerkiksi kenttäväylää hyödyntäen.

Yleisin ja yksinkertaisin käytetty toimintasykli lienee ramppikäynnistys ja ramppipyäytys. Ramppikäynnistys kiihdyttää moottorin ramppimaisesti haluttuun pyörimisnopeuteen halutussa ajassa huolimatta moottoriin kytketystä kuormasta. Ramppikäynnistys on moottorin ja siihen kytketyn laitteiston rasituksen kannalta edullinen hitaan kiihdytyksen aiheuttaessa pienen rasituksen kytketylle laitteistolle ja moottorille. Kytkettäessä ohjaamaton moottori sähköverkkoon, alkaa se pyöriä lähes välittömästi ominaistajuudellaan aiheuttaen suuren rasituksen moottorille. Myös sähköverkon ja energiankulutuksen kannalta taajuusmuuttaja on hyödyllinen laite ohjaamattoman moottorin vetäessä käynnistyessään hyvin suuren virran. Taajuusmuuttajalla on mahdollista jännitettä ja taajuutta säätämällä saavuttaa käynnistyksessä 150% moottorin ominaismomentista käyttäen vain 50% ominaistehosta [5].

Ramppipysäytys on hyödyllinen jos kytketty laite, esimerkiksi paperikone, ei saa pysähtyä liian nopeasti. Taajuusmuuttajilla on myös mahdollista pysäyttää kytketty laite nopeammin, kuin mitä siltä itsestään vastusvoimien johdosta kestäisi pysähtyä. Tällöin voidaan käyttää taajuusmuuttajaan kytkettyä erillistä jarruvastusta, joka muuttaa moottorin jarruttamisesta syntyneen sähköenergian suoraan lämmöksi[5].

Taajuusmuuttajissa on myös edistyneempiä toimintoja kuten PID-säätimiä¹, joilla voidaan pitää esimerkiksi vesisäiliön pinta halutulla tasolla taajuusmuuttajaohjattua pumppua käyttäen. Tällöin taajuusmuuttaja saa ohjaussignaalina esimerkiksi säiliöön kytketyn korkeusanturin dataa ja sen perusteella ohjaa pumpun pyörimisnopeutta. Joihinkin taajuusmuuttajiin voidaan ohjelmoida myös toiminnallisuutta toimilohko-ohjelmoinnilla, esimerkiksi CodeSys-ohjelmointikielellä [Lähde, esim joku codesys-manuaali tjsp]. Toimilohkoilla voidaan taajuusmuuttajaan toteuttaa yksinkertainen tilakone ja näin siirtää laskentaa automaatiojärjestelmältä taajuusmuuttajaan tai yksinkertaisissa tapauksissa korvata se kokonaan. Automaatiojärjestelmän siirtyminen yhä enemmän taajuusmuuttajiin laskee kustannuksia tehokkaiden logiikkaohjainten tarpeen vähentyessä.

2.2 Ohjaus ja -valvontajärjestelmät

Taajuusmuuttajaa on tyypillisesti mahdollista ohjata kolmea eri tapaa, paneelia, I/O:ta ja kenttäväylää, käyttäen. Näistä tyypillisesti vain yhtä pystytään käyttämään kerrallaan. Paneeli on taajuusmuuttajaan kiinteästi asennettu tai johdolla yhdistetty yksikkö, jolla taajuusmuuttajan toimintoja pystytään ohjaamaan käsin. Nykyaikaisissa taajuusmuuttajissa paneeli sisältää yleensä painikkeiden lisäksi pienen LCD-näytön, joka helpottaa taajuusmuuttajan asetusten säätämistä ja toimii samalla myös valvontatyökaluna. Kuvassa 1 on esimerkkinä ACS880 taajuusmuuttajan ohjauspaneeli.

¹Proportional-integral-derivative-säädin, lyhyemmin PID-säädin, on yksi säätötekniikan perussäätimistä.



Kuva 1: ABB:n valmistaman ACS880 taajuusmuuttajan ohjauspaneeli. [25]

Toinen tapa taajuusmuuttajan ohjaukseen on I/O. I/O koostuu joukosta analogi- ja digitaalituloja, joilla taajuusmuuttajaa voidaan ohjata esimerkiksi PLC:n avulla. Analogiliitännät käyttävät yleensä standardoitua 4-20mA virtasilmukkaa tai 0-10V jännitesilmukkaa. Digitaalituloissa on käytössä 24V jännitesilmukka, joissa alle 5V jännite taso tarkoittaa tilaa 0 ja yli 15V tarkoittaa tilaa 1. Taajuusmuuttajan I/O:ssa on lisäksi analogi- ja digitaali lähtöjä, jotka pystytään taajuusmuuttajan sisäistä logiikkaa käyttäen ohjelmoida ohjaamaan järjestelmän muita komponentteja. Nykyään suuremmissa automaatiojärjestelmissä ovat kenttäväylät alkaneet korvaamaan perinteisiä analogi- ja digitaali liitännöitä mahdollistaen näin kattavamman ohjauksen ja kustannustehokkaamman järjestelmän.

Kenttäväylillä tarkoitetaan joukkoa verkkoprotokollia, jotka on määritelty IEC 61158-standardissa. Kenttäväylät ovat yleistyneet automaatioissa niiden tuomien kustannussäästöjen ja yksinkertaisuuden vuoksi. Aikaisemmin yleisesti käytössä olleet 4-20mA ja 0-10V analogi- 0-24V digitaalisignaalit mahdollistivat ainoastaan kahden laitteen välisen kommunikoinnin yhtä johdinta käyttäen. Kenttäväyläprotokollat sallivat useiden laitteiden kytkemisen samaan verkkoon. Näin useita signaaleita voi kulkea eri laitteiden välillä samaa johdinta pitkin, jolloin kaapeloinnin tarve vähenee huomattavasti. Nykyään lähes kaikki taajuusmuuttajat sisältävätkin mahdollisuuden kenttäväylän liittämiseen. Yleisesti taajuusmuuttajissa käytettyjä kenttäväyliä ovat esimerkiksi PROFIBus ja ProfiNET. Muita kenttäväyliä voidaan yhdistää käyttäjän

tarpeen mukaan erillisten lisäkorttien avulla.

Kenttäväylät ovat mahdollistaneet yhä kattavampien automaatiojärjestelmien luomisen. Kenttäväyliä pitkin siirrettävän datan määrä on moninkertainen perinteisiin digitaalisignaaleihin verrattuna. Kenttäväylää hyödyntäviin taajuusmuuttajiin on esimerkiksi mahdollista ohjata etäältä tietokoneelle asennetun ohjelmiston kautta. Tällöin esimerkiksi virheitä voidaan ratkoa ilman, että taajuusmuuttajan luokse täytyy fyysisesti mennä. Tämä voi esimerkiksi kaivoksissa, missä etäisyydet voivat olla kilometriluokkaa, olla merkittävä etu.

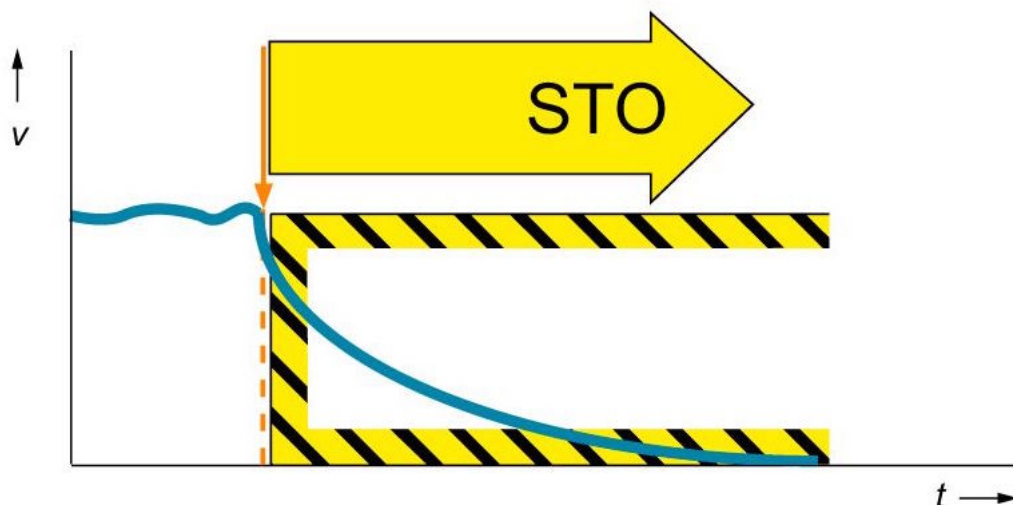
Yksinkertaisissa sovelluksissa taajuusmuuttajia voidaan myös kytkeä suoraan toisiinsa ilman hintavaa kenttäväyläratkaisua. Tämä tulee kyseeseen esimerkiksi useamman pumpun muodostamisissa pumppusysteemeissä, joissa yhden isäntälaitteen ohjaus halutaan saada aikaan kaikissa systeemin taajuusmuuttajissa. Tällöin voidaan käyttää niin sanottua master/slave topologiaa, jossa taajuusmuuttajat ovat kytketty ikään kuin yhdeksi yksiköksi. Tällöin master yksikön ohjaus välittyy suoraan samanlaisena yden tai useamman slave-yksikön ohjaukseksi. Lähes kaikki taajuusmuuttajavalmistajat sallivat master/slave, ratkaisun jotakin omaa kommunikointiväyläänsä hyödyntäen.

2.3 Turvallisuustoiminnot

Yhä tiukentuvat turvallisuusmääräykset eri teollisuuden aloilla ovat saaneet taajuusmuuttajavalmistajat kehittämään taajuusmuuttajiin sisäisiä turvallisuustoimintoja. Turvallisuustoiminnoilta vaaditaan erittäin korkeaa luotettavuutta ja ne ovatkin useiden standardien määrittelemiä. Jotta toiminta voidaan hyväksyä viralliseksi standardin määräämäksi turvallisuustoiminnoksi, täytyy se testata perinpohjaisesti. Turvallisuustoimintojen luotettavuus ilmoitetaan IEC EN 61508 standardin mukaisella SIL-tunnuksella (Safety Integrity Level). SIL kuvaa todennäköisyyttä, jolla turvallisuustoiminto lopettaa toimintansa vaaraa aiheuttaen. SIL1 on tasoista vähiten varma aiheuttaen vaarallisen toiminnon tunnin sisällä 10^{-3} - $10^{-5}\%$ todennäköisyydellä. SIL4 on vastaavasti luotettavin turvallisuustaso aiheuttaen vaarallisen toiminnon seuraavan tunnin sisällä 10^{-6} - $10^{-7}\%$ todennäköisyydellä.[Lähde IEC EN 61508]

Näistä yksinkertaisin ja yleisimmin toteutettu on STO-toiminto (Safe Torque Off). STO on EN 60204-1 -standardin määrittelemä turvallisuustoiminto, joka aktivoituaan katkaisee moottorin akselille momenttia aiheuttavan sähkövirran. Käytännössä STO on siis hätäpysäytystoiminto, jolla moottori saadaan lopettamaan momentin tuottaminen. STO ei kuitenkaan välttämättä pysäytä moottoria nopeasti, vaan kuorma kertynyt pyörimismäärä voi pitää kuorman liikkeessä vielä pitkään STO:n kytkeytymisen jälkeenkin. Kuva 2 esittää STO-funktion toiminnan kun se kytketään päälle moottorin pyöriessä. STO on erityisen hyödyllinen toiminto, koska hätäpysäytyksen toiminnallisuus pystytään toteuttamaan täysin ohjelmallisesti taajuusmuutta-

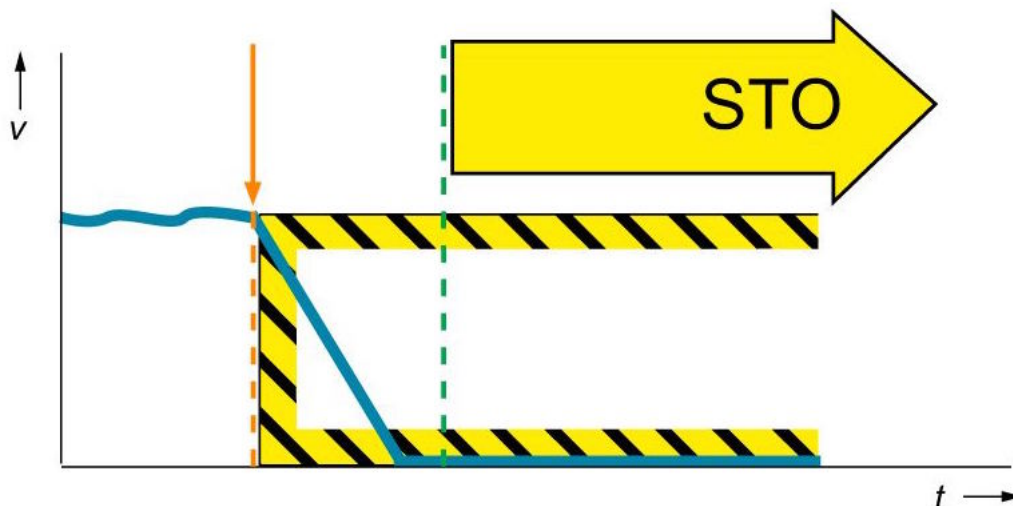
jan sisällä. Tämä poistaa hintavien kontaktorien² tarpeen tuoden kustannussäästöjä ja helpottaen asennustyötä.



Kuva 2: Moottorin pyörimisnopeus V esitettynä ajan t suhteen STO toiminnon kytkeytyessä. [21]

STO Toiminnon lisäksi EN 60204-1 -standardi määrittelee sarjan muita turvallisuus-toimintoja, jotka tekevät kytkeytyessään määritellyn toimintasyklin. Esimerkiksi SS1-toiminto (Safe Stop 1), joka on kuvattu kuvassa 3, hidastaa moottorin ramppi-maisesti pysähdyksiin ja aktivoi tämän jälkeen STO:n. Nämä toiminnot on yleensä toteutettu taajuusmuuttajaan lisäosana saatavassa turvamoduulissa. Moduuleissa voi olla turvatoiminnot laukaisevien tuloporttien lisäksi rele- tai analogilähtöjä. Lähdeöl-lä pystytään ohjaamaan laitteiston muita turvalaitteita kuten kuormaan kytkettyä mekaanista jarrua, joka voidaan ohjelmoida kytkeytymään samaan aikaan esimerkiksi STO-toiminnon kanssa[24].

²Kontaktori on sähköisesti ohjattava kytkin, joita on perinteisesti käytetty moottorille menevän virran katkaisemiseen.



Kuva 3: Moottorin pyörimisnopeus V esitettynä ajan t suhteen SS1 toiminnon kytkeytyessä. [22]

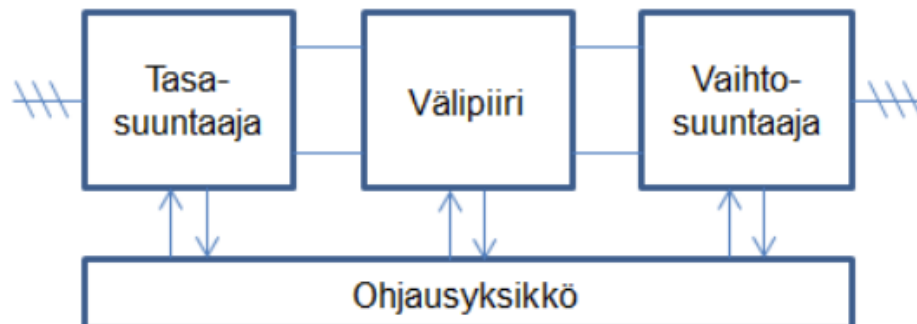
STO ja muiden turvallisustoimintojen on standardin mukaan oltava eristettyjä järjestelmiä, tarkoittaen että muiden järjestelmien toiminta ei saa vaikuttaa turvallisustoiminnon toimintaan. Tämä on järkevää turvallisustoimintojen luotettavuuden kannalta, mutta epätehokasta koska turvasignaalit vaativat oman signaaliväylänsä. Suuressa automaatiojärjestelmässä signaalijohdinten määrä voi kasvaa ongelmalliseksi. Nykyään turvasignaalit onkin mahdollista kuljettaa myös osana kenttäväylän prosessidataa esimerkiksi PROFIsafe kommunikointiteknologiaa käyttäen. PROFIsafe pystytään käyttämään PROFIBUS tai PROFINET kenttäväylän kanssa samassa kenttäväyläkaapelissa. Turvasignaalien yhdistäminen samaan kenttäväylään prosessidatan kanssa vähentää asennus- ja kaapelointikuluja ja yksinkertaistaa automaatiojärjestelmää[20]. Kenttäväyliä yleistyessä prosessiautomaatiossa, myös turvatoiminnot toteutetaan yhä enenemässä määrin kenttäväyliä hyödyntäen[23].

2.4 Verkkoon jarruttavat taajuusmuuttajat ja jaettu välipiiri

Taajuusmuuttajatekniikan kehittyessä ovat yhä monimutkaisemmat taajuusmuuttajajärjestelmät tulleet mahdollisiksi. Esimerkkeinä näistä tekniikoista ovat nykyään jo yleisesti käytössä olevat verkkoon jarruttavat taajuusmuuttajat ja välipiirin välityksellä toisiinsa kytketyt taajuusmuuttajat. Jotta nämä tekniikat voidaan ymmärtää täytyy tietää perusteet taajuusmuuttajan sisäisestä rakenteesta.

Yleisin käytössä oleva taajuusmuuttajarakenne on niin sanottu välipiirillinen taajuusmuuttaja (Voltage-Source Inverter, VSI). Kuvassa 4 nähdään VSI-taajuusmuuttajan kolme pääkomponenttia tasasuuntaaja, välipiiri ja vaihtosuuntaaja. Syöttöverkon

vaihtojännite muutetaan ensin tasasuuntaajalla välipiirin tasajännitteeksi ja sitten taas moottorille syötettäväksi vaihtojännitteeksi vaihtosuuntaajalla. Ohjausyksikkö tarkkailee ja säätää kaikkia kolmea komponenttia siten, että ulos tulevan sähkön ominaisuudet ovat halutunlaiset.



Kuva 4: Välipiirillisen (VSI) taajuusmuuttajan rakenne. [26, s. 2]

Välipiiriin varastoitu tasajännite toimii energiavarastona vaihtosuuntaajalle, jonka vaatima virta voi vaihdella suuresti kuorman muuttuessa. Useissa sovelluksissa, kuten liukuhihnoissa, tarvitaan useita moottoreita ohjaamaan samaa laitetta. Tällöin on mahdollista, että osa samaan laitteeseen kytketyistä moottoreista on jarruttavassa tilassa ja osa kiihdyttävässä. Kuten aikaisemmin todettiin, jarruttavat taajuusmuuttajat joutuvat purkamaan ylimääräisen energian välipiiristä esimerkiksi jarruvastukseen, jolloin energia menee hukkaan. Yhdistämällä useita taajuusmuuttajia välipiirin välityksellä toisiinsa voidaan vähentää hukkaenergian määrää. Tällöin jarruttavan taajuusmuuttajan luoma ylimääräinen tasavirta pystytään käyttämään toisessa samaan välipiiriin kytketyssä taajuusmuuttajassa moottorin kiihdyttämiseen.

Taajuusmuuttajista on myös saatavilla malleja, joita on mahdollista käyttää generaattoreina, eli laitteina, jotka muuttavat kuorman mekaanista energiaa verkon sähköenergiaksi. Tällöin puhutaan niin sanotuista verkkoon jarruttavaista taajuusmuuttajista. Välipiiriin kertyvä ylimääräinen jännite on siis mahdollista purkaa jarruvastuksen sijasta takaisin sähköverkkoon. Ne ovat rakenteeltaan samankaltaisia VSI-tyyppisiin taajuusmuuttajiin verrattuna, mutta tasasuuntaaja on korvattu toisella vaihtosuuntaajalla. Tällöin taajuusmuuttaja kykenee siis ottamaan välipiiristä energiaa kumpaa tahansa vaihtosuuntaajaa käyttäen ja syöttämään sitä moottorille tai sähköverkkoon. Ominaisuus on hyödyllinen esimerkiksi tuotantolaitoksen sisäisessä sähköverkossa, missä laitteet ovat ajoittain kiihdyttävässä ja jarruttavassa liikkeessä. Tällöin hidastuksista aiheutuvaa energiaa ei tarvitse purkaa hukkalämmöksi, vaan se voidaan syöttää takaisin laitoksen sähköverkkoon ja näin käyttää missä tahansa laitoksen prosessissa.

3 Kaivosympäristön vaatimukset taajuusmuuttajalle

3.1 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 ylikuumeneminen 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 A kuvaa eri tasoisten IP-luokitusten mukaiset suojaustasot. 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. Märkiin tai muuten erityistä suojausta vaativiin sovelluksiin tarkoitetut IP66 laitteet kestävät suoran painevesiruiskun kaikista suunnista ja ovat täysin pölysuojattuja. Suuremman suojausluokituksen omaavat laitteet ovat luonnollisesti fyysisesti suurempia ja mekaanisesti haastavampia rakentaa jäähdytyksen ongelmallisuuden vuoksi.

Seuraavissa kappaleissa eritellään eri ympäristötekijöiden merkitsevyys kaivosympäristössä. Tarkastelun alla ovat myös vaikutukset mitä 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.

3.1.1 Lämpö

Maanalaisissa kaivoksissa lämpöolosuhteet eroavat huomattavasti maanpäällisistä. Kaivoksessa lämpöä aiheuttaa itse kallioperän lämpö, ilman puristuminen, lämpimät pohjavesivuodot, koneet, valaistus ja räjäytykset[2, s.305].

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 syvyydessä kaivoksessa lämpötila voi yltää $30\text{--}40^\circ\text{C}$ riippuen paikallisesta ilmastosta [1, s. 62]. Esimerkkinä todettakoon Suomen syvin metallikaivos Pyhäsalmeella 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. Taajuusmuuttajien käyttöä osana kaivoksen ilmanvaihtojärjestelmää käsitellään tarkemmin luvussa *4.2.5 Tuulettimet ja ilmanvaihto*. Kaivoksen lämpötilan noustessa esimerkiksi tuuletusjärjestelmän häiriön takia taajuusmuuttajien sisäinen lämpötilan tarkkailu osaa automaattisesti alentaa tuotettua sähkövirtaa ja näin komponenteissa syntyvää lämpö määrää. Tämä estää laitteen vioittumisen ylikuumenemisen takia.

Taajuusmuuttajat ovat hyvin energiatehokkaita laitteita siirtäen noin 98% vastaanottamastaan 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.

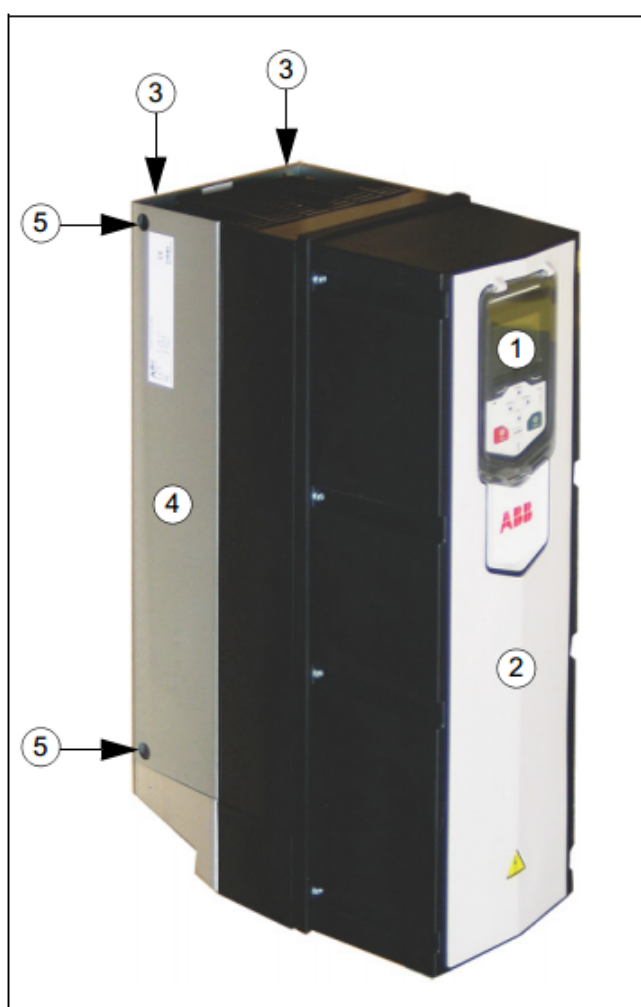
3.1.2 Kosteus

Kosteus ilmenee kaivoksissa kahtena ilmiönä: ilmankosteutena ja nestemäisenä vedenä. Suurimman uhan sähkölaitteen toiminnalle aiheuttaa nestemäinen vesi, jota kondensoituu kosteasta ilmasta. Kaivoksissa suhteellinen ilmankosteus saattaa nousta hyvinkin korkeaksi 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, jolloin ilmalla ei ole lainkaan pääsyä kosketuksiin elektroniikan kanssa. Kaivoksen tilapäisen luonteen vuoksi nestejärjes-

telmät 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 ilmalta eristettyyn 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 [8]. Kuva 5 esittää IP55 luokitellun taajuusmuuttajan, jossa jäähdytysilma ohjataan jäähdytyslementin kautta sen pääsemättä kosketuksiin elektroniikan kanssa.

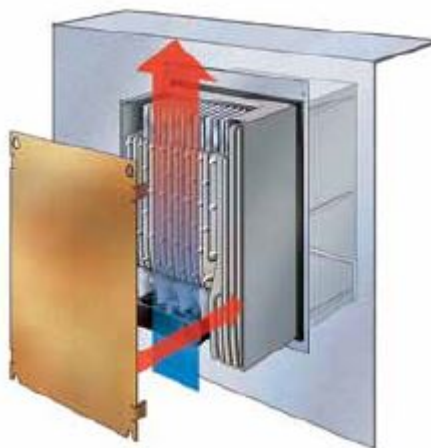


	Kuvaus
1	Ohjauspaneeli ja ohjauspaneelin suojakansi
2	Etukansi
3	Neljä kiinnityspistettä laitteen takana
4	Jäähdytyslementti
5	Nostoukot

Kuva 5: ACS880-01 taajuusmuuttaja IP55-koteloinnilla [14, s.28]

Toinen mahdollisuus on sijoittaa jäähdytyslementti laitteen ulkopuolelle, jolloin

yleisesti puhutaan niin sanotusta laippa-asennuksesta (flange-installation). 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. Kuvassa 2 esitetään hahmotelma laippa-asennetusta taajuusmuuttajasta, jossa jäähdytyslementti on eristetty omaan tilaansa.



Kuva 6: Hahmotelma laippa-asennetusta taajuusmuuttajasta [18, s.6]

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 moottorikaapelien pituuksien kasvaessa kohtuuttoman pitkiksi.

3.1.3 Pienpartikkelit

Kaivoksen ilmassa on kosteuden lisäksi pölyä ja muita kemikaaleja, joita muodostuu työkoneiden toiminnan ja räjäytysten seurauksena. Samoista seikoista johtuen myös hiekkaa voi kulkeutua kosketuksiin sähkölaitteiden kanssa. Hiekkaa ja pölyä esiintyy kaikissa ulkoympäristöissä, mutta niiden laatu haitallisuus sähkölaitteiden toiminnalle määräytyy paljolti ympäröivän kosteuden ja maaperän laadun seurauksena. Kaivosympäristössä pölyn joukossa on kaivoksen luonteesta riippuen vaihtelevat määrät yhdisteitä, jotka kosteuden kanssa voivat aiheuttaa korroosiota.

Korroosio on tietyissä olosuhteissa merkittävä sähkölaitteita rasittava tekijä. Korroosiota tapahtuu varuksellisen hiukkasen joutuessa kosketuksiin sähkölaitteen metallisen pinnan kanssa elektrolyytin, esimerkiksi veden, välityksellä. Voimakas korroosiota aiheuttava ioni on esimerkiksi kloridi (Cl^-), jota esiintyy kaikissa suolaisissa ympäristöissä. Lisäksi voimakkaasti korrosoivia ioneja ovat myös dieselkoneiden pakokaasuista vapautuvat rikin (SO^x) ja typen oksidit (NO^x). Sähkölaitetta suunniteltaessa

käyttöympäristön mahdolliset korroosiovaikutukset täytyy ottaa huomioon laitteen materiaalivalinnoissa. Esimerkiksi muovit ja alumiini ovat korroosionkestoltaan hyviä materiaaleja ja ovatkin yleisesti käytössä taajuusmuuttajien kuorissa.

Korroosion lisäksi pöly ja hiekka voivat aiheuttaa sähkölaitteen ylikuumenemisen tai sähkövian. Pölyisissä ympäristöissä on pidettävä huoli että pöly ja muu hienorakeinen aines kuten hiekka ei pääse tukkimaan sähkölaitteiden mekaanisia tai sähköisiä osia. Yleisin pölyn aiheuttama ongelma lienee ilmajäähdytteisen sähkölaitteen jäähdytys-elementin peittyminen pölyllä ja muilla epäpuhtauksilla alentaen jäähdytys-elementin lämmönsiirtokykyä. Ilman epäpuhtaudet voivat vaikuttaa haitallisesti myös ilmaa jäähdytys-elementin läpi puhaltavaan puhaltimeen, mikä voi pahimmassa tapauksessa estää puhaltimen toiminnan.[15]

Hienorakeinen pöly voi helposti kulkeutua kosketuksiin myös sähkölaitteen elektronisten osien kanssa. Yhdistettynä kosteuden kanssa elektroniikan päälle kertynyt pöly voi muuttua johtavaksi aiheuttaen pahimmassa tapauksessa vuotovirtoja tai läpilyönnin. [15] Pölyn ja muiden hiukkasten aiheuttamien sähkö-, lämpö-, ja korroosio-ongelmien takia on tärkeää huolehtia sähkölaitteiden asianmukaisesta huollosta. Sähkölaitteen kotelo tulisi säännöllisesti puhdistaa kertyneestä liasta ja tarkistaa ettei korroosiota ole päässyt syntymään. Kaivossuunnittelussa tulisi ottaa huomioon kaivoksen ilmanlaatu ja mitoittaa laitteiden suojausluokitus sitä vastaavaksi. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää muita tapoja kuten ulkoista sähköhuonetta tai aikaisemmin mainittua laippa-asennusta.

3.1.4 Mekaaniset rasitukset

Sähkölaitteet voivat kuljetuksen, asennuksen ja käytön aikana altistua tärinälle ja iskuille. Tärinä ja iskut rasittavat laitteen komponentteja lyhentäen sen elinikää. Turvatakseen toimintansa ovat useat taajuusmuuttajavalmistajat määritelleet suurimmat tärinän ja iskujen arvot, joita taajuusmuuttaja luotettavasti kestää. IEC 60082-2 standardi määrittelee tavat sähkölaitteiden tärinän- ja iskunkeston mittamiselle. Standardissa tärinä ilmaistaan sen amplitudin, taajuuden ja kiihtyvyyden summana ja iskut kiihtyvyytenä.[19]

Kaivosympäristössä taajuusmuuttajaan kohdistuvat mekaaniset rasitukset riippuvat paljolti laitteen asennuspaikasta. Kaivoksen kiinteissä järjestelmissä kuten ilmanvaihdossa taajuusmuuttajat on tyypillisesti asennettu seinälle tai lattialle sähkötiloihin. Suuremmissa laitteissa kuten murskaimissa ja työkoneissa taajuusmuuttajat ovat asennettuna osaksi koneen rakennetta ja liikkuvat koneen mukana altistuen täten vaihteleville olosuhteille.

Kaivoksen kiinteät taajuusmuuttajat on tyypillisesti asennettu eristettyyn sähkötilaan. Jos kaivoksessa louhitaan malmia käyttäen räjähteitä täytyy laitteiden sijoittelussa ottaa huomioon etäisyys räjäytyspaikkaan tärinän kulkeutuessa kallioperässä pitkiäkin matkoja. Jos laitteita ei pystytä sijoittamaan tarpeeksi kauas, voidaan

käyttää tärinänvaimentimia, jotka asennetaan taajuusmuuttajan ja asennuskohteen väliin. Tärinänvaimentimet muuttavat tärinän liike-energian kitkan avulla lämmöksi. Kumi on tyyppillinen tärinänvaimentimissa käytetty materiaali sen elastisten ominaisuuksien vuoksi.

Hyvin tärinäsuojatun taajuusmuuttajan suurimmat mekaaniset rasitukset aiheutuvat kuljetuksesta ja asennuksesta. Vaikkakin mahdollista, on laitteen vaurioituminen kuljetuksen tai asennuksen aikana epätodennäköistä. Sijoitetun pääoman suuruudesta johtuen kaivosteollisuuden taajuusmuuttajat asennetaan pääosin ammattilaisten toimesta. Kestävällä pakkauksella voidaan varmistaa laitteen päätyminen ehjänä sovelluskohteeseen saakka.

Työkoneisiin kuten murskaimiin asennetut taajuusmuuttajat altistuvat vaihtelevalle tärinälle laitteen sovelluskohteesta riippuen. Kiinteästä asennuksesta poiketen työkoneissa voi esiintyä jatkuvaa jaksollista tärinää mikä voi aiheuttaa resonointia³ laitteen komponenteissa. Haitallisen resonanssin kannalta olennaisimpia ovat matalat värähtelytaajuuudet, jotka aiheuttavat suurimmat siirtymät ja siten myös jännitykset sähkölaitteen komponenteissa.[Lähde]. Laitteen kuori ja komponentit tulisi suunnitella siten, että matalia resonanssitaajuuksia ei olisi käytettävän moottorin käyttöalueella.[Lähde?]

3.2 Kaivoksen sähköverkko

Kaivokset ovat suuria sähkönkuluttajia. Kaivosalueella sähköä kuluttavat itse kaivanto, rikastamo, toimistotilat ja joskus myös asuinrakennukset. Jos sähkö tilataan ulkoiselta toimittajalta, toimitetaan se yleensä 110kV suurjännitelinjaa pitkin ja muunnetaan kaivosalueella jakelujännitteeksi. Suomessa suurin sallittu jakeluverkon jännite on 20kV. Suuren jakelujännitteen etuna ovat pienemmät häviöt pitkillä etäisyyksillä ja mahdollisuus käyttää poikkipinta-alaltaan pienempiä siirtokaapeleita. [2, s. 251-253]

Jakelujännite muunnetaan edelleen käyttöjännitteeksi jakelumuuntajilla. Kaivosalueilla on yleisesti käytössä 400V:n kolmivaihejärjestelmä. 400V järjestelmän etuna, on että tavallista 230V vaihtovirtaa saadaan suoraan samasta järjestelmästä yhden vaihe- ja nollajohtimen väliltä. Toinen standardisoitu jännite on 690V käyttöjännite, jota käytettäessä päästään pitempiin kaapelietäisyyksiin tai pienempiin poikkipinta-aloihin. [2, s. 251-253]

Joissakin tapauksissa voi myös olla kannattavaa tuottaa kaivosalueen tarvitsema sähköenergia paikanpäällä. Syrjäisillä alueilla voi olla mahdollista että tarpeeksi vahvaa verkkoa ei ole saatavilla tai että verkkoa ei ole ollenkaan. Tämä tulee harvoin kysymykseen Suomessa vahvan ja kattavan sähköverkon ansiosta. Myös sähköverkon luotettavuus pitää olla korkea. Jos katkokset sähkönjakelussa ovat alueella yleisiä voi voimantuotanto paikanpäällä olla kannattavampi vaihtoehto suuremmista

³resonanssi on ebin

kustannuksista huolimatta. Voimantuotanto paikanpäällä toteutetaan yleensä dieselvoimalaitoksella, jossa dieselmoottorit tuottavat sähköenergiaa generaattoreiden välityksellä. Kompromissi näiden kahden väliltä on varavoimalaitos, joka tuottaa vaaditun energian paikanpäällä sähkökatkoksen aikana. [2, s. 251-253]

Ilman taajuusmuuttajaa ohjatut sähkömoottorit vaativat käynnistyksessä moninkertaisen virran normaaliajoon verrattuna. Tämä voi heikon kantaverkon alueella muodostua ongelmaksi suurten sähkömoottoreiden aiheuttaessa käynnistyksessä suuren heilahduksen sähköverkon virtaan. Taajuusmuuttajalla ohjattu moottori ottaa verkosta kohtuullisen tasaista virtaa, jolloin suuria verkon heilahteluita ei pääse muodostumaan. Tämä voi muodostua kynnyskysymykseksi alueilla, joissa siirtoverkko ei kestä suuria virtapiikkejä. [20]

3.3 Käyttöikä ja luotettavuus

Luonteestaan johtuen kaivokset ovat tilapäisiä rakennelmia eliniän riippuessa monista seikoista kuten esiintymän suuruudesta, esiintymän syvyydestä ja louhittavan malmin markkinahinnan kehityksestä. Rajatusta käyttöajasta ja suuresta alkuinvestoinnista johtuen laitteiden halutaan ensiasennuksen jälkeen lähtökohtaisesti toimivan koko kaivoksen elinkaaren ajan. Toisin sanoen luotettavaksi osoittautuneita järjestelmiä harvoin lähdetään vaihtamaan kesken kaivoksen toiminnan vaikka uusia mahdollisesti parempia olisi saatavilla. Tässä korostuvat asiakkaan kokemukset taajuusmuuttajien luotettavuudesta. Teknisesti kehittyneempi ratkaisu voi hävitä tarjouskilpailun asiakkaan kokemusten perusteella luotettavammalle laitteelle. [20]

Kaivosteollisuuden vaatiman huomattavan suuren alkuinvestoinnin seurauksena lähes kaikki kaivosteollisuuden toimijat ovat suurikokoisia yrityksiä, joilla on näin resurssit suunnitella kaivostensa automaatiojärjestelmä itse aina logiikkaohjainten (PLC, Programmable Logic Controller) ohjelmistoja myöten. Yrityksen oman logiikkasuunnittelun ansiosta taajuusmuuttajan sisäisen älyn tarve vähenee. Oman automaatiojärjestelmän käyttö on yrityksen kannalta järkevää, sillä korjaus ja päivitys voidaan näin hoitaa oman henkilöstön avulla ilman tarvetta ulkoisille toimijoille. [20]

Kaivostoiminnassa käyttökatkot eli kaivostoiminnan pysähtyminen tai hidastuminen tietyn järjestelmän komponentin kuten taajuusmuuttajan rikkoutumisen seurauksena on merkittävä kaivoksen kannattavuuteen vaikuttava tekijä kiinteiden kulujen ollessa suuret tuotannon määrästä huolimatta. Lisäksi taajuusmuuttajia käytetään turvallisuuden kannalta kriittisissä toiminnoissa kuten ilmanvaihdossa. Tämän takia taajuusmuuttajilta edellytetään ensisijaisesti korkeaa luotettavuutta ja hyviä tukitoimintoja. [20]

4 Taajuusmuuttajien sovellukset kaivoksissa

Mitä kaikkea tapahtuu (louhinta,murskaus, rikastus, siirto, ym). Sähkönkäyttö. Teollisuuden laajuus, kehittyminen, automaation taso

4.1 Kokoluokat ja sijoittelu

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

4.2 Sovellukset

4.2.1 Kaivoskoneet

- 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 ja sekoittimet

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

4.2.4 Hissit

- Henkilöhissit, junat, karryt. Millä ihmiset liikkuu?

4.2.5 ilmanvaihto

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

4.2.6 Pumput

- mutapumput, vesipumput.
- puhdistus
- mittaukset

4.2.7 Paineilma

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/$file/FI_ACS880-01_0_55to250kW_HW_E_plus_update_notice_screen.pdf). Päivitetty 29.6.2012. Viitattu 9.10.2014.
- [15] Pallasmaa, A. *Ulkokäyttöön Tarkoitettun Tehoelektroniikkalaitteen Konseptisuunnittelu*. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Espoo. 2009.
- [16] Hartman, H. Mutmanský, J. Ramani, R. Wang, Y. *Mine Ventilation and Air Conditioning*. New York, Yhdysvallat. John Wiley & Sons Inc. 1997.
- [17] Louhintatyöstä syntyvän tärinän riskiarviointi. Saatavissa: <http://www.theseus.fi/handle/10024/42462>
- [18] Saatavissa: http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/2270DF18-D4AD-4808-824E-4942B247F078/0/2011_AutomationDrive_176R0571_Web.pdf
- [19] IEC 60082-2. *Environmental testing - Part 2-6: Tests - Test Fc: Vibration (sinusoidal)*. 7.painos. Geneve, Sveitsi. IEC. 2007. 86 s.
- [20] Antti Hedman. Myyntipäällikkö. ABB Oy. Haastattelu. 17.10.2014. Pitäjänmäki, Helsinki.
- [21] Siemens AG. *Safe Torque Off (STO)*. Saatavissa: <http://www.industry.siemens.com/topics/global/en/safety-integrated/machine-safety/product-portfolio/drive-technology/safety-functions/pages/safe-torque-off.aspx>. Päivitetty 10.3.2014. Viitattu 27.10.2014.
- [22] Siemens AG. *Safe Stop 1 (SS1)*. Saatavissa: <http://www.industry.siemens.com/topics/global/en/safety-integrated/machine-safety/product-portfolio/drive-technology/safety-functions/Pages/safe-stop1.aspx>. Päivitetty 10.3.2014. Viitattu 27.10.2014.
- [23] PROFIBUS & PROFINET International (PI). *PROFIsafe*. <http://www.profibus.com/technology/profisafe/> Päivitetty 10.3.2014. Viitattu 27.10.2014.
- [24] ABB Oy. *User's manual: FSO-12 Safety functions module*. [http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/80fd1fe025d402d7c1257d0000408aa6/\\$file/EN_FSO_12_UM_A_A5.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/80fd1fe025d402d7c1257d0000408aa6/$file/EN_FSO_12_UM_A_A5.pdf). Päivitetty 26.3.2014. Viitattu 27.10.2014.
- [25] ABB Oy. *ACS880 Control Panel*. Kuva. Saatavissa: [http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/2996a31f6d99e961c1257864004ae0c1/\\$file/HM2011-02b.jpg](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/2996a31f6d99e961c1257864004ae0c1/$file/HM2011-02b.jpg). Viitattu 28.10.2014

- [26] Joensuu, T. Eronen, T. *Taajuusmuuttajan ohjauksen suunnittelu*. Insinööritö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. 2013. Saatavissa: http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/67121/Taajuusmuuttajan_ohjauksen_suunnittelu.pdf?sequence=1.

A Liite 1: Kotelointiluokitus standardin SFS-EN 60529 mukaan

EN 60529 -standardin mukaisen IP-koodin ensimmäisen tunnusnumeron merkitys

Ensimmäinen tunnusnumero	Suojaus vaarallisten osien kosketukselta	Suojaus vierailta esineiltä ja pölyltä
0	Suojaamaton	Suojaamaton
1	Kosketussuojattu nyrkiltä	Halkaisijaltaan yli 50 mm esineiltä
2	Sormelta	Halkaisijaltaan yli 12,5 mm esineiltä
3	Työkalulta	Halkaisijaltaan yli 2,5 mm esineiltä
4	Langalta	Halkaisijaltaan yli 1 mm esineiltä
5	Langalta	Pölysuojattu
6	Langalta	Pölytiivis

EN 60529 -standardin mukaisen IP-koodin toisen tunnusnumeron merkitys

Toinen tunnusnumero	Vesisuojaus
0	Suojaamaton
1	Suojattu pystysuoraan tippuvalta vedeltä
2	Suojattu korkeintaan 15 asteen kulmassa tippuvalta vedeltä
3	Suojattu korkeintaan 60 asteen kulmassa satavalta vedeltä
4	Suojattu kaikista suunnista roiskuvalta vedeltä
5	Suojattu kaikista suunnista tulevalta vesisuihkulta
6	Suojattu kaikista suunnista tulevalta voimakkaalta vesisuihkulta
7	Suojattu lyhytaikaisen veteen upottamisen hättävaiikutuksilta
8	Suojattu jatkuvan veteen upottamisen hättävaiikutuksilta