

Eero Santamala

## **Taajuusmuuttajien käyttö kaivoksissa**

**Sähkötekniikan korkeakoulu**

Kandidaatintyö  
Espoo 12.12.2014

Vastuuopettaja ja ohjaaja:

TkT Pekka Forsman



Tekijä: Eero Santamala

Työn nimi: Taajuusmuuttajien käyttö kaivoksissa

Päivämäärä: 12.12.2014

Kieli: Suomi

Sivumäärä: 4+31

Koulutusohjelma: Automaatio- ja systeemitekniikka

Vastuuopettaja ja ohjaaja: TkT Pekka Forsman

Tämä työ käsittelee kaivosteollisuuden asettamia vaatimuksia taajuusmuuttajien rakenteelle ja se selvittää millaisissa olosuhteissa taajuusmuuttajat joutuvat toimimaan ja mitä nämä olosuhteet vaativat niiden rakenteelta. Työssä selvitetään myös miten taajuusmuuttajien toiminnallisuutta on hyödynnetty tai voitaisiin hyödyntää kaivosteollisuuden prosesseissa.

Työ esittää taajuusmuuttajan toimintaperiaatteen ja tärkeimmät taajuusmuuttajan sisäisellä logiikalla toteutetut ominaisuudet. Lisäksi tutkitaan kaivosympäristön asettamia haasteita taajuusmuuttajien luotettavalle toiminnalle. Näistä selvityksistä kertyneen tiedon pohjalta käydään läpi kaivosteollisuuden prosesseja ja pohditaan, miten taajuusmuuttajia voitaisiin hyödyntää. Ympäristötekijöiden vaikutus kaivosympäristössä ja nykyaikaisten taajuusmuuttajien ominaisuudet selvitetään kattavalla kirjallisuuskatsauksella ja asiantuntijahaastatteluilla. Näitä tietoja ja haastatteluja hyödyntämällä selvitetään miten taajuusmuuttajia hyödynnetään kaivosteollisuudessa ja mitä rakenteellisia ja toiminnallisia ominaisuuksia niiltä vaaditaan.

Kaivosympäristö osoittautui erittäin vaativaksi toimintaympäristöksi taajuusmuuttajille. Suurimmat ympäristön aiheuttamat rasitteet aiheutuvat pölystää, kosteudesta ja korroosiota aiheuttavista aineista. Taajuusmuuttajia pystytään kuitenkin järkevällä sijoittelulla hyödyntämään myös maanalaisien kaivosten prosesseissa. Taajuusmuuttajista huomattiin löytyväni suuri määrä sovellusten tehokkuutta ja turvallisuutta lisäävää toiminnallisuutta, joka on vuosien aikana lisännyt niiden suosiota myös kaivoksissa.

Avainsanat: Taajuusmuuttaja, kaivosteollisuus, käyttöympäristö, kaivosautomatio

# Sisällysluettelo

<b>Tiivistelmä</b>	<b>ii</b>
<b>Sisällysluettelo</b>	<b>iii</b>
<b>Lyhenteet</b>	<b>iv</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2 Taajuusmuuttajien toiminnallisuus</b>	<b>3</b>
2.1 Toimintasyklit . . . . .	3
2.2 Ohjaus- ja valvontajärjestelmät . . . . .	4
2.3 Turvallisuustoiminnot . . . . .	6
2.4 Verkkoon jarruttavat taajuusmuuttajat ja jaettu välipiiri . . . . .	8
<b>3 Kaivosympäristön vaatimukset taajuusmuuttajalle</b>	<b>10</b>
3.1 Ympäristöolosuhteet . . . . .	10
3.1.1 Lämpö . . . . .	10
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
<b>4 Kaivosprosessi ja taajuusmuuttajien sovellukset</b>	<b>17</b>
4.1 Kaivosprosessi . . . . .	17
4.2 Sovellukset . . . . .	18
4.2.1 Kaivoskoneet . . . . .	18
4.2.2 Kuljettimet . . . . .	20
4.2.3 Murskaimet ja syöttimet . . . . .	22
4.2.4 Ilmanvaihto . . . . .	23
4.2.5 Pumput . . . . .	24
4.2.6 Kompressorit . . . . .	25
<b>5 Yhteenvetö</b>	<b>26</b>
<b>Viitteet</b>	<b>28</b>
<b>A Liite 1: Kotelointiluokitus standardin IEC 60529 mukaan</b>	<b>31</b>

## 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
LHD	Load Haul Dump

# 1 Johdanto

Taajuusmuuttajia käytetään yhä enenevissä määrin vaihtovirtasähkömoottoreiden ohjaukseen kaikilla teollisuudenaloilla ja erityisesti kaivosteollisuudessa [1, s. 262]. Erilaiset käyttöympäristöt ja -sovellukset vaikuttavat taajuusmuuttajalta vaadittuun toiminnallisuuteen ja fyysisiin ominaisuuksiin. Käyttökohteesta riippuvat ominaisuudet luovat taajuusmuuttajavalmistajille näin tarpeen kartoittaa eri teollisuudenalojen erityisvaatimuksia, jotta tuotteet pystytään kehittämään vastaamaan asiakkaiden tarpeita mahdollisimman hyvin.

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

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

Työn alussa esitellään millaista toiminnallisuutta taajuusmuuttajien sisäisillä logiikkapiireillä voidaan toteuttaa ja mitä hyötyjä näillä voidaan saavuttaa perinteisiin ohjaustapoihin verrattuna. Seuraavassa osassa kerrotaan kaivosympäristön erityisvaatimukset lähtien liikkeelle ympäristöolosuhteista. Tarkastelun alla on myös kaivoksen sähköverkon ominaisuudet ja luotettavuuteen ja kaivoksen toimintaikään liittyviä asioita. Luvun tarkoituksena on luoda kuva kaivoksen asettamista vaatimuksista siellä käytettävälle laitteistolle jotta voidaan ymmärtää mitä taajuusmuuttajilta vaaditaan.

Viimeisessä luvussa eritellään taajuusmuuttajien käyttökohteita kaivoksissa lähtien liikkeelle kaivosprosessista kokonaisuutena. Tämän luvun 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.

Työn keskiössä on taajuusmuuttajien hyödyntäminen ja niistä saatava lisäarvo kaivosteollisuuden asiakkaan näkökulmasta. Työ keskittyy taajuusmuuttajien sovel-luksiin ja niiden vaatimuksiin eikä niinkään taajuusmuuttajan tekniseen rakenteeseen.

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 jännitettä ja taajuutta, ja syöttävät muutetun vaihtovirran taajuusmuuttajaan kytkealle sähkömoottorille. Taajuusmuuttajia käytetään vaihtovirtasähkömoottoreiden tehokkaaseen ohjaamiseen kaikkialla niiden tuodessa merkittäviä kustannussäästöjä perinteisiin ohjausmenetelmiin verrattuna. Suoraan sähköverkkoon kytketyt sähkömoottorit pyörivät sähköverkon määräämällä vakiotaajuudella eli esimeriksi Suomessa käytössä olevalla 50Hz taajuudella, jolloin pyörimisnopeuden säätöön tarvitaan esimeriksi moottoriin kytketty vaihteisto tai jarru. Näillä tavoilla ohjatun moottorin pyörittämiseen syötetystä energiasta suuri osa kuluu jarrun ja muiden osien lämpenemiseen [2]. 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. Nykyaisissa taajuusmuuttajissa sisäänrakennettu mikroprosessori kytkee käsittelyään suuren määärän ohjaussignaaleja käyttäen perinteisiä digitaali- ja analogisia signaaleja sekä kenttäväyliä. Sisäiset funktiot kykenevät monimutkaisiin moottorinohjaussykleihin, mikä vähentää tarvetta ulkoisille logiikkaohjaimille. [3]

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 Toimintasykli

Olemnainen osa taajuusmuuttajan toiminnallisuutta ovat siihen ohjelmoitut toimintasykli eli automaattinen moottorinohjaus tietyn ohjelmoidun sarjan mukaan. Toimintasykli voidaan käynnistää käyttäjän toimesta mitä tahansa sisääntuloa esimerkiksi kenttäväylää hyödyntäen. [3]

Yleisimmät ja yksinkertaisimmat käytetyt toimintasykli lienevät ramppikäynnistys ja ramppipysäytys. Ramppikäynnistys kiihdyyttää moottorin rammppimaisesti haluttuun pyörimisnopeuteen halutussa ajassa huolimatta moottoriin kytketystä kuormasta. Ramppikäynnistys on moottorin ja siihen kytketyn laitteiston rasituksen kannalta edullinen hitaan kiihdyytyksen aiheuttaessa pienien rasituksen kytketylle laitteistolle ja moottorille. Kytkettäessä sähköverkkoon, ohjaamaton moottori alkaa pyöriä lähes välittömästi ominaistaajuudellaan aiheuttaen suuren rasituksen moottorille ja siihen kytketylle kuormalle. Myös sähköverkon ja energiankulutuksen kannalta taajuusmuuttaja on hyödyllinen laite ohjaamattoman moottorin vetäessä käynnistyessään hyvin suuren virran. Taajuusmuuttajalla on mahdollista jännitettä ja taajuutta säätelemällä saavuttaa käynnistyksessä 150 prosenttia moottorin ominaismomentista

käyttää vain 50 prosenttia ominaistehosta [3].

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 [3].

Taajuusmuuttajissa on myös edistyneempiä toimintoja kuten PID-säätimiä<sup>1</sup>, joilla voidaan pitää esimerkiksi vesisäiliön pinta halutulla tasolla taajuusmuuttajaohjatua pumppua käytäen. Tällöin taajuusmuuttaja saa ohjaussignaalina esimerkiksi säiliöön kytketyn korkeusanturin dataa ja sen perusteella ohjaa pumpun pyörimisnopeutta. Joihinkin taajuusmuuttajiin voidaan ohjelmoida myös toiminnallisuitta toimilohko-ohjelmoinnilla, esimerkiksi CodeSys-ohjelointiympäristössä [4]. Toimilohkoilla voidaan taajuusmuuttajaan toteuttaa esimerkiksi 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 kolmella eri tavalla: paneelia, I/O:ta tai kenttäväylää käytäen. Näistä tyypillisesti vain yhtä pystytään käyttämään kerrallaan. Paneeli on taajuusmuuttajaan kiinteästi asennettu tai johdolla yhdistetty yksikkö, jolla taajuusmuuttajan toimintoja pystytään ohjaamaan käsin. Nykyaisissa taajuusmuuttajissa paneeli sisältää yleensä painikkeiden lisäksi pieni LCD-näytön, joka helpottaa taajuusmuuttajan asetusten säättämistä ja toimii samalla myös valvontatyökaluna. Kuvassa 1 on esimerkkinä ABB:n valmistaman ACS880 taajuusmuuttajan ohjauspaneeli.

---

<sup>1</sup>Proportional-Integral-Derivative-säädin, lyhyemmin PID-säädin, on yksi säätötekniikan perussäätimistä.



Kuva 1: ABB:n valmistaman ACS880 taajuusmuuttajan ohjauspaneeli. [5]

Toinen tapa taajuusmuuttajan ohjaukseen on I/O eli Input/Output. I/O koostuu joukosta analogi- ja digitaalituloja, joilla taajuusmuuttajaa voidaan ohjata esimerkiksi ulkoisen logiikkaohjaimen, PLC:n (Programmable Logic Controller), avulla. Analogiliitännät käyttävät yleensä standardoitua 4-20mA virtasilmukkaa tai 0-10V jännitesilmukkaa. Digitaalituloissa on käytössä 24V jännitesilmukka, joissa alle 5V jännitetaso tarkoittaa tilaa 0 ja yli 15V tarkoittaa tilaa 1. Taajuusmuuttajan I/O:ssa on lisäksi analogi- ja digitaalilähtöjä, jotka pystytään taajuusmuuttajan sisäistä logiikkaa käyttäen ohjelmoimaan ohjaamaan järjestelmän muita komponentteja. Nykyään suuremmissa automaatiojärjestelmissä kenttäväylät ovat alkaneet korvata perinteisiä analogi- ja digitaaliliitintöitä mahdollistaen näin kattavamman ohjauksen ja kustannustehokkaamman järjestelmän [4].

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

esimerkiksi PROFIBus ja PROFINet. Muita kenttäväyliä kuten BACnet ja LONworks voidaan yhdistää käyttäjän tarpeen mukaan erillisten lisäkorttien avulla [6].

Kenttäväylät ovat mahdollistaneet yhä kattavampien automaatiojärjestelmien luomisen. Kenttäväyliä pitkin siirrettävän datan määrä on moninkertainen perinteisiin digitaalisaaleihin verrattuna. Kenttäväylää hyödyntäviin taajuusmuuttajiin on esimerkiksi mahdollista ohjata etäältä tietokoneelle asennetun ohjelmiston kautta. Tällöin esimerkiksi virheitä voidaan ratkoaa ilman, että taajuusmuuttajan luokse täytyy fyysisesti mennä [4]. Tämä voi esimerkiksi kaivoksissa, missä etäisyydet voivat olla kilometriluokkaa, olla merkittävä etu.

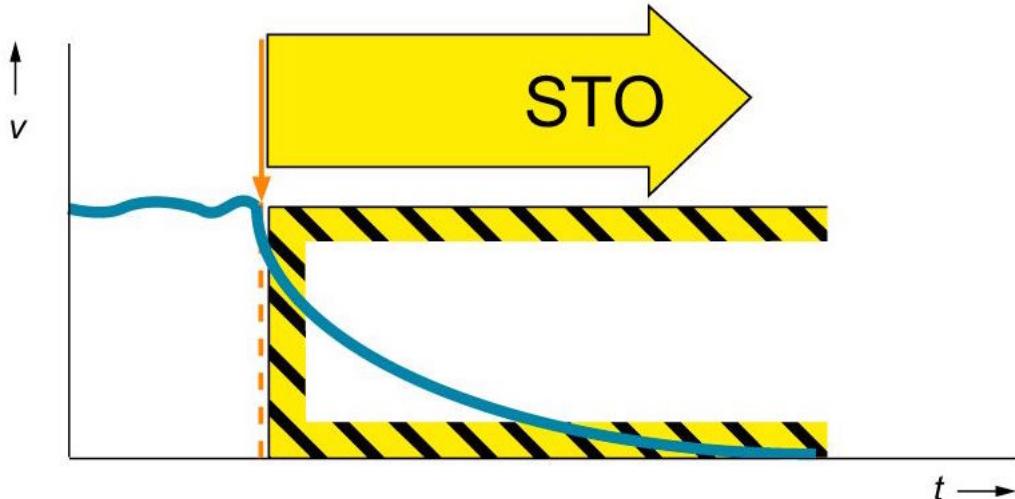
Yksinkertaisissa sovelluksissa taajuusmuuttajia voidaan myös kytkeä suoraan toisiinsa ilman hintavaaa kenttäväyläratkaisua. Tämä tulee kyseeseen esimerkiksi useamman pumpun muodostamissa pumppusysteemeissä, joissa yhden isäntälaitteen ohjaus halutaan saada aikaan kaikissa systeemin taajuusmuuttajissa. Tällöin voidaan käyttää niin sanottua master/slave-topologiaa, jossa taajuusmuuttajat ovat kytetty seuraamaan yhden taajuusmuuttajan ohjausta. Tällöin master-yksikön ohjaus välittyy suoraan samanlaisena yhden tai useaman slave-yksikön ohjaukseksi. Lähes kaikki taajuusmuuttajavalmistajat sallivat laitteidensa välisen master/slave-ratkaisun jotakin valmistajan omaa kommunikointiväylää hyödyntäen. Viime vuosina myös erilaiset sovellusohjelmistot ovat yleistyneet sallien useaman taajuusmuuttajan älykkään ohjaksen osana yhtä järjestelmää esimerkiksi pumppusovelluksessa. Näitä sovelluksia on avattu enemmän luvussa [4.2 Sovellukset](#). [6]

## 2.3 Turvallisuustoiminnot

Yhä tiukentuvat turvallisuusmääräykset eri teollisuuden aloilla ovat saaneet taajuusmuuttajavalmistajat kehittämään taajuusmuuttajiin sisäisiä turvallisuustoimintoja. Turvallisuustoiminoilta vaaditaan erittäin korkeaa luotettavuutta ja ne ovatkin useiden standardien määrittelemiä. Jotta toiminta voidaan hyväksyä viralliseksi standardin määräämäksi turvallisuustoiminnaksi, täytyy se testata perinpohjaisesti. Turvallisuustoimintojen luotettavuus ilmoitetaan IEC 61508 -standardin [7] mukaisella SIL-tunnuksella (Safety Integrity Level). SIL kuvailee 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.

Turvallisuustoiminoista yksinkertaisin ja yleisimmin toteutettu on STO-toiminto (Safe Torque Off). STO on IEC 60204 -standardin [8] määrittelemä turvallisuustoiminto, joka aktivoituessaan katkaisee moottorin akselille momenttia aiheuttavan sähkövirran. Käytännössä STO on siis hätipysäytystoiminto, jolla moottori saadaan lopettamaan momentin tuottaminen. STO ei kuitenkaan välttämättä pysäytä moottoria nopeasti, vaan kuormaan kertynyt pyörimismäärä voi pitää kuorman liikkeessä vielä pitkään STO:n kytkeytyksen jälkeenkin. Kuva [2](#) esittää STO-funktion toi-

minnan, kun se kytketään päälle moottorin pyöriessä. STO on erityisen hyödyllinen toiminto, koska hätäpysätyksen toiminnallisuus pystytään toteuttamaan täysin ohjelmallisesti taajuusmuuttajan sisällä. Tämä poistaa hintavien kontaktorien<sup>2</sup> tarpeen tuoden kustannussäästöjä ja helpottaa sen asennustyötä.

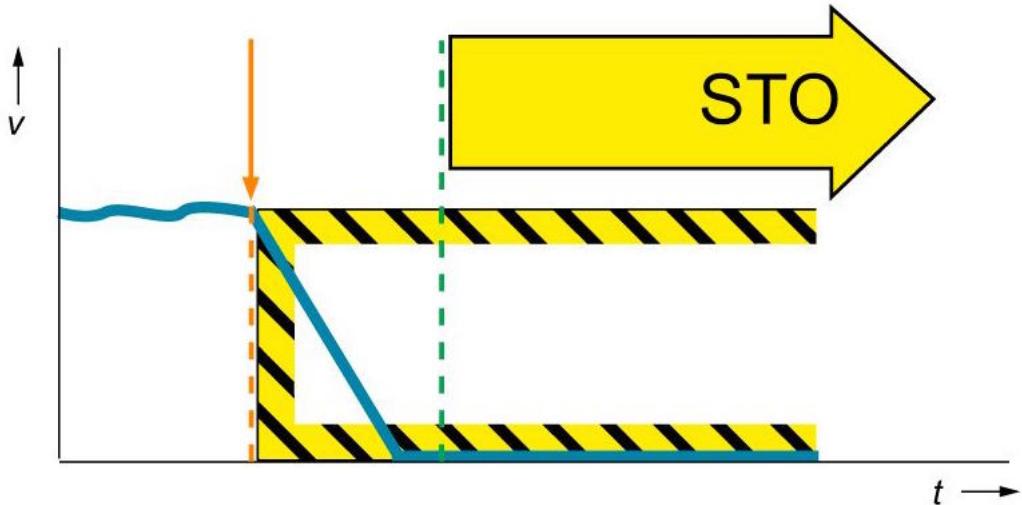


Kuva 2: Moottorin pyörimisnoopeus  $V$  esitetynä ajan  $t$  suhteeseen STO toiminnon kytkeytyessä. [9]

STO-toiminnon lisäksi EN 60204-1 -standardi määrittelee sarjan muita turvallisuustoimintoja, jotka tekevät kytkeytyessään määritellyn toimintasyklin. Esimerkiksi SS1-toiminto (Safe Stop 1), joka on kuvattu kuvassa 3, hidastaa moottorin ramppimaisesti 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. Lähdöillä pystytään ohjaamaan laitteiston muita turvalaitteita kuten kuormaan kytettyä mekaanista jarrua, joka voidaan ohjelmoida kytkeytyämään samaan aikaan esimerkiksi STO-toiminnon kanssa [10].

---

<sup>2</sup>Kontaktori on sähköisesti ohjattava kytkin, joita on perinteisesti käytetty moottorille menevän virran katkaisemiseen.



Kuva 3: Moottorin pyörimisnopeus V esitettyynä ajan t suhteeseen SS1 toiminnon kytkeytyessä. [11]

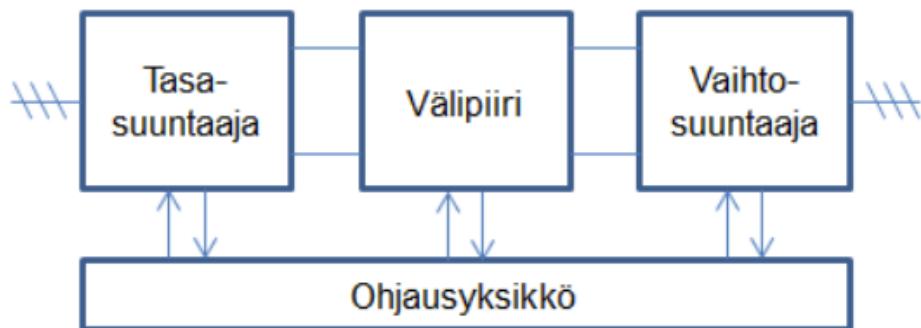
STO:n ja muiden turvallisuustoimintojen on standardin mukaan oltava eristettyjä järjestelmiä, tarkoittaen että muiden järjestelmien toiminta ei saa vaikuttaa turvallisuustoiminnon toimintaan. Tämä on järkevä turvallisuustoimintojen luotettavuuden kannalta, mutta epätehokasta, koska turvasignaalit vaativat oman signaaliväylänsä. Suuressa automaatiojärjestelmässä signaalijohdinten määrä voi kasvaa ongelmalliseksi. Nykyään turvasignaalit onkin mahdollista kuljettaa myös osana kenttäväylän prosessidataa esimerkiksi PROFIsafe-kommunikointiteknikkaa käyttäen. PROFIsafea pystytään käyttämään PROFIbus- tai PROFInet-kenttäväylän kanssa samassa kenttäväyläkaapelissa. Turvasignaalien yhdistäminen samaan kenttäväylään prosessidatan kanssa vähentää asennus- ja kaapeliointikuluja ja yksinkertaistaa automaatiojärjestelmää [4]. Kenttäväylien yleistyessä prosessiautomaatiossa myös turvatoiminnot toteutetaan yhä enenevässä määrin kenttäväyliä hyödyntäen [12].

## 2.4 Verkkoon jarruttavat taajuusmuuttajat ja jaettu välipiiri

Taajuusmuuttajateknikan kehityessä 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 syöttäväksi vaihtojännitteeksi vaihtosuuntaajalla. Ohjausyksikkö tarkkailee ja säätää kaikkia kolmea komponenttia siten, että ulos tulevan sähkön ominaisuudet ovat halutunlaiset. [3]



Kuva 4: Välipiirillisen (VSI) taajuusmuuttajan rakenne. [13, 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 kiihyttävässä. Kuten aikaisemmin todettiin, jarruttavat taajuusmuuttajat joutuvat purkamaan ylimääräisen energian välipiiristä esimerkiksi jarruvastukseen, jolloin energia menee hukkaan. Yhdistämällä useita taajuusmuuttajia välipiirin väilyksellä toisiinsa voidaan vähentää hukkaenergian määrää. Tällöin jarruttavan taajuusmuuttajan luoma ylimääräinen sähköenergia pystytään käyttämään toisessa samaan välipiiriin kytketyssä taajuusmuuttajassa moottorin kiihyttämiseen. [3]

Taajuusmuuttajista on myös saatavilla malleja, joita on mahdollista käyttää generaattoreina, eli laitteina, jotka muuttavat kuorman mekaanista energiota syöttöverkon sähköenergiaksi. Tällöin puhutaan niin sanotuista verkkoon jarruttavaista taajuusmuuttajista. Välipiiriin kertyvä ylimääräinen jännite on siis mahdollista purkaa jarruvastuksen sijasta takaisin sähköverkkoon. Verkkoon jarruttavat taajuusmuuttajat 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, jossa laitteet ovat ajoittain kiihyttävässä ja jarruttavassa liikkeessä. Tällöin hidastuksista aiheutuvaa energiota ei tarvitse purkaa hukkalämpöksi, vaan se voidaan syöttää takaisin laitoksen sähköverkkoon ja näin käyttää missä tahansa laitoksen prosessissa. [3]

### 3 Kaivosympäristön vaatimukset taajuusmuuttajalle

#### 3.1 Ympäristöolosuhteet

Kaivosympäristö on sähkölaitteille toimintaympäristöön erittäin rasittava [1, s. 251]. Sähkölaitteille kaivoksissa rasitusta aiheuttavia tekijöitä ovat lämpötila, kosteus, ilman epäpuhtaudet ja mekaaniset rasitukset.

Suurin ympäristön aiheuttama vaara taajuusmuuttajien toiminnalle on ylikuumeneminen ja elektronisten komponenttien vaurioituminen kosteuden, ilman epäpuhtauksien, mekaanisten iskujen tai tärinän seurauksena [1, s. 251]. Jotta taajuusmuuttajan luotettava toiminta voidaan taata, täytyy taajuusmuuttajan koteloinnin olla soveltuva käyttöympäristöönsä. Lähes kaikki taajuusmuuttajavalmistajat valmistavatkin taajuusmuuttajia eri suojausluokissa vastaamaan eri sovellusten vaatimuksia.

Euroopassa yleisesti käytössä oleva luokitus sähkölaitteen vesi- ja pölytiiveydelle on kansainväisen sähköalan standardointitoimiston IEC:n IP-luokitus. Luokitus on kaksiosainen ja se yltää täysin suojaamattomasta IP00-luokasta täysin vesi- ja pölytiiviiseen IP69-luokitukseen. [14] Liite A kuvaa eri tasoisten IP-luokitusten mukaiset suojaustasot. Pohjois-Amerikassa on käytössä vastaava NEMA-tiiviysluokitus.

Markkinoilla olevat taajuusmuuttajat ulottuvat suojaamattomista IP00-laitteista aina lähes vesitiiviisiin IP66-laitteisiin. IP00 taajuusmuuttajat asennetaan poikkeuksetta ulkoisiin koteloihin, sillä jännitteelliset komponentit ovat niissä täysin esillä. IP21 on yleinen käytössä oleva luokka taajuusmuuttajille, jotka tulevat kuivaan tilaan, esimerkiksi tehtaan seinälle. Märkiin tai muuten erityistä suojausta vaativiin sovelluksiin tarkoitettut IP66-laitteet kestävät sitä vastoin suoran painevesiruiskun kaikista suunnista ja ovat täysin pölysuojattuja [14]. Suuremman suojausluokituksen laitteet ovat luonnollisesti fyysisesti suurempia ja jäähdytyksen ongelmallisuuden vuoksi mekaanisesti haastavampia rakentaa.

Seuraavissa kappaleissa eritellään eri ympäristötekijöiden piirteet kaivosympäristössä. Tarkastelun alla ovat myös näiden olosuhteiden vaikutukset taajuusmuuttajien toiminnalle, sekä se, miten nämä asiat on otettu huomioon taajuusmuuttajien suunnitelussa. Käsittely koskee pääosin maanalaisia kaivoksia, sillä avolouhosten olosuhteet ovat tavallista ulkoilmakäytööä vastaavat.

##### 3.1.1 Lämpö

Maanalaisissa kaivoksissa lämpöolosuhteet eroavat huomattavasti maanpäällisistä. Kaivoksessa lämpöä aiheuttaa kallioperän lämpö, ilman puristuminen, lämpimät pohjavesivuodot, koneet, valaistus ja räjäytykset [1, s. 305].

Syvissä kaivoksissa kallioperän lämpö on suurimpia kaivoksen sisäilman lämmittäjiä. Kallioperän lämpötila kasvaa syvemmälle mentäessä noin 25–30 °C/km, joten jo kilometrin syvyisessä kaivoksessa lämpötila voi yltää 30–40 °C:seen riippuen pa-

kallisesta ilmastosta [15, s. 62]. Esimerkiksi Suomen syvin metallikaivos Pyhäsalmissa on 1400 metriä syvä ja siellä lämpötila ilman ilmanvaihtoa kohoaa yli 30 °C:seen [16]. Mikäli kaivos on suunniteltu hyvin, kaivoksen sisälämpötila on harvoin kuitenkaan liian korkea laitteiden toiminnalle. Olennaista on, että lämpö pystytään johtamaan ulos sitä tuottavista laitteista ja ilmaa lämmittävästä kallioperästä. Ilmanvaihtojärjestelmän suunnittelun tärkeys tulee tässä vahvasti esille. Taajuusmuuttajien käyttöä osana kaivoksen ilmanvaihtojärjestelmää käsitellään tarkemmin luvussa *4.2.5 Ilmanvaihto*. Kaivoksen lämpötilan noustessa esimerkiksi tuuletusjärjestelmän häiriön takia taajuusmuuttajien sisäinen lämpötilan tarkkailu osaa automaattisesti alentaa tuottua sähkövirtaa ja näin komponenteissa syntyvää lämpömäärää. Tämä estää laitteen vioittumisen ylikuumenemisen takia.

Taajuusmuuttajat ovat hyvin energiatehokkaita laitteita, sillä ne pystyvät siirtämään noin 98 prosenttia vastaanottamastaan energiasta moottorille [2]. Energiasta 2 prosenttia muuttuu taajuusmuuttajan sisäisenä häviönä lämpöenergiaksi. Tämä tarkoittaa, että esimerkiksi 500kW taajuusmuuttaaja vaatii noin 10kW jäähdytystehon toimiakseen jatkuvasti. Tämä lämpöenergia poistetaan taajuusmuuttajasta ilma- tai nestejäähdityksen avulla ympäristöön.

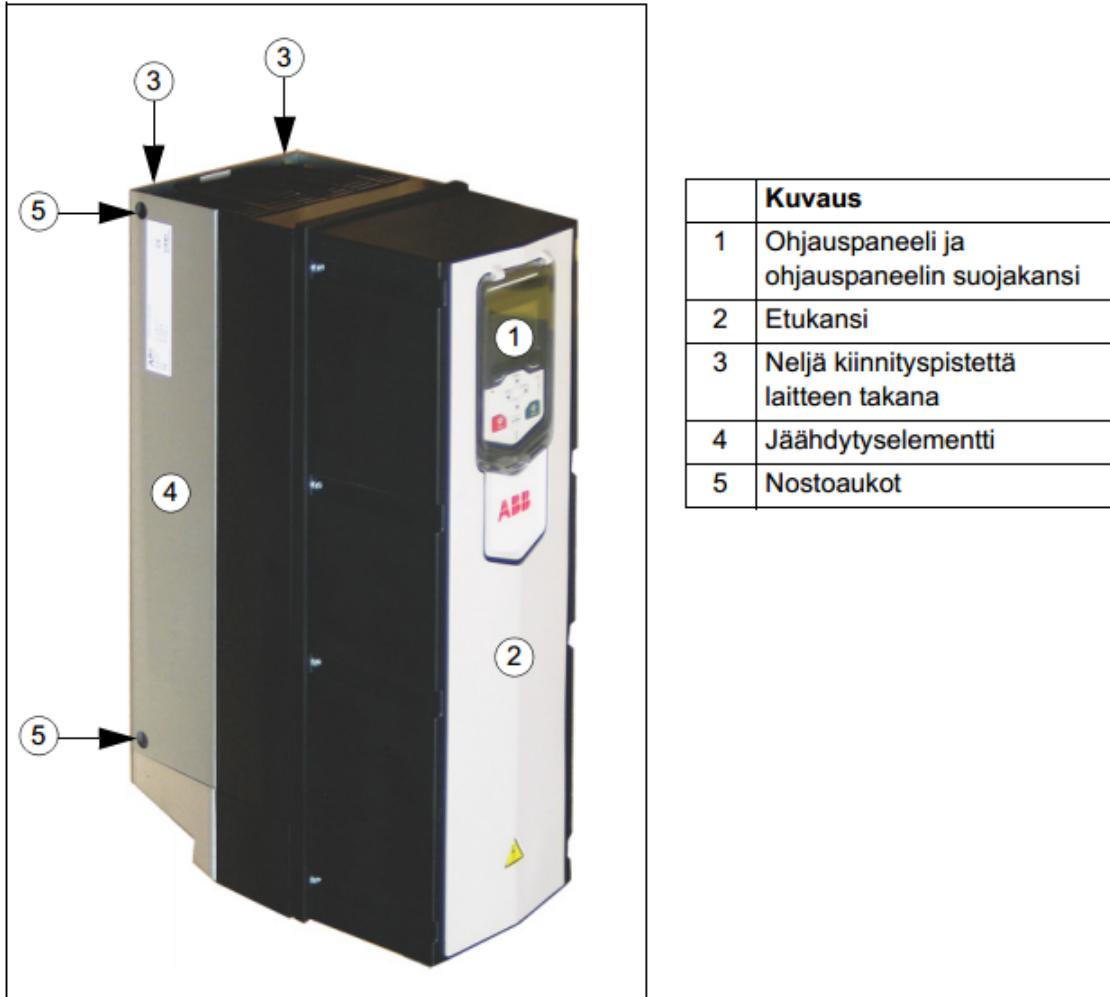
### 3.1.2 Kosteus

Kosteus ilmenee kaivoksissa kahtena ilmiönä: ilmankosteutena ja nestemäisenä vedenä. Suurimman uhan sähkölaitteen toiminnalle aiheuttaa nestemäinen vesi, jota kondensoituu kosteasta ilmasta. Kaivoksissa suhteellinen ilmankosteus saattaa noussta hyvinkin korkeaksi, koska suljettu tila sitoo kostean ilmamassan. Syvimmässä kaivoksissa voidaan saavuttaa jopa yli 95 prosentin suhteellinen ilmankosteus [17]. Kondensoituvan veden lisäksi kaivoksissa täytyy ottaa huomion myös katosta mahdollisesti tikuva vesi.

Kaivoksen tekniikkaa suunniteltaessa on otettava huomioon sähkölaitteiden kosteudensieto ja sijoitettava laitteet joko eristettyyn sähkötilaan tai hankittava laitteita, joilla on riittävä suojausluokitus. Ilmajäähdytteisten laitteiden haasteena on yleisesti niiden pienempi IP-luokitus, mikä sallii veden kondensoitumisen laitteen sisälle [18]. Vesijäähdys tarjoaa yleisesti paremman tiiveysluokituksen, sillä laitetta viilentää ilman sijasta suljettu nestejärjestelmä, jolloin ilmalla ei ole lainkaan pääsyä kosketuksiin elektroniikan kanssa. Kaivoksen tilapäisen ja muuttuvan luonteen vuoksi nestejärjestelmät voivat kuitenkin osoittautua epäkannattaviksi.

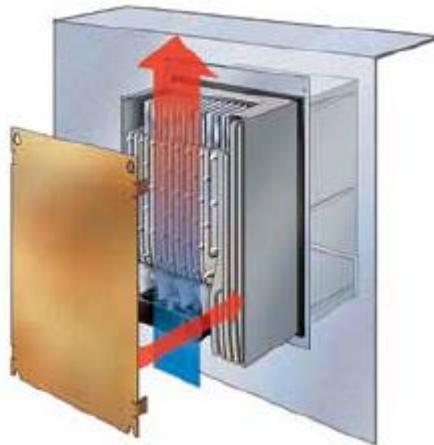
Jotta myös ilmajäähdytteisiä laitteita pystytään käyttämään vaativissa olosuhteissa, täytyy jäähdysilma korkeaman suojausluokan laitteissa johtaa laitteen läpi niin, että se ei pääse kosketuksiin elektroniikan kanssa. Tämä on usein toteutettu jakamalla laite sisäisesti kahteen osioon: ilmalta eristettyyn osioon, joka sisältää kosteudelle herkän elektroniikan, ja jäähdysosioon, jossa jäähdyyselementti sijaitsee. Lämpö johtuu komponenteista jäähdyyselementin säleikköön, josta se johtuu edelleen säleikön läpi kulkevaan ilmaan. Ilma kierrätetään laitteen läpi tuulettimilla,

joiden täytyy kestää ympäristön olosuhteet. Tuuletin onkin yksi ilmajäähdytteisen taajuusmuuttajan herkimmin hajoavia komponentteja [19]. Kuva 5 esittää IP55 luokitellun taajuusmuuttajan, jossa jäähdytysilma ohjataan jäähdytyselementin kautta sen pääsemättä kosketuksiin elektroniikan kanssa.



Kuva 5: ACS880-01 taajuusmuuttaja IP55-koteloinnilla. [6, s. 28]

Toinen mahdollisuus on sijoittaa jäähdytyselementti laitteen ulkopuolelle, jolloin yleisesti puhutaan niin sanotusta laippa-asennuksesta (flange-installation). Tällä teknikalla taajuusmuuttaja pysytää upottamaan ulkoiseen koteloon ja kierrätetään jäähdytysilma kotelon ulkopuolella esimerkiksi tuuletuskanavassa. Tämä eristää taajuusmuuttajan täysin tuuletusilmasta ja sallii tehokkaan lämmönpoiston tuuletuskanavan välityksellä. Kuvassa 6 esitetään hahmotelma laippa-asennetusta taajuusmuuttajasta, jossa jäähdytyselementti on eristetty omaan tilaansa.



Kuva 6: Hahmotelma laippa-asennetusta taajuusmuuttajasta. [20, s. 6]

Kaivoksen kiinteissä asennuksissa on mahdollista rakentaa myös kokonaisia kosteuden- ja pölykestäviä sähköhuoneita, joissa pystytään käyttämään normaalilta IP21- tai IP20-tiiveysluokituksen sähkölaitteita [1, s. 253]. Jos taajuusmuuttaja sijoitetaan näihin keskitettyihin sähköhuoneisiin, korostuu taajuusmuuttajan valinnassa sen kyky tarkasti ohjata pitkien moottorikaapelien päässä olevia moottoreita. Kaivosissa esimerkiksi puhaltimia täytyy sijoittaa kaukaismalliin tunneleihin riittävän ilmanvaihdon takaamiseksi. Taajuusmuuttajavalmistajat ilmoittavat tyypillisesti suurimman sallitun moottorikaapelin pituuden, jonka jälkeen erilaisia suotimia on otettava käyttöön [6].

### 3.1.3 Pienpartikkelimet

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 haitallisuus sähkölaitteiden toiminnalle määräytyy paljolti ympäröivän kosteuden ja maaperän laadun seurauksena. Kaivosympäristössä pölyn joukossa on kaivoksen luonteesta riippuen vaihtelevat määärät yhdisteitä, jotka kosteuden kanssa voivat aiheuttaa korroosiota. [1, s. 290]

Korroosio on tietyissä olosuhteissa merkittävä sähkölaitteita rasittava tekijä. Korroosiota tapahtuu varauksellisen hiukkasen joutuessa kosketuksiin sähkölaitteen metallisen pinnan kanssa elektrolyytin, esimerkiksi veden, välityksellä. Voimakas korroosiota aiheuttava ioni on esimerkiksi kloridi-ioni ( $\text{Cl}^-$ ), jota esiintyy kaikissa suolaisissa ympäristöissä. Lisäksi voimakkaasti korroosiota aiheuttavia ioneja ovat myös dieselkoneiden pakokaasuuista vapautuvat rikin ( $\text{SO}^x$ ) ja typen oksidit( $\text{NO}^x$ ) [1, s. 290]. Sähkölaitetta suunniteltaessa käyttöympäristön mahdolliset korroosiovaikutukset täytyy ottaa huomioon laitteen materiaalivalinnoissa. Esimerkiksi muovit ja

alumiini ovat korroosionkestoltaan hyviä materiaaleja ja ne 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 ilmajäähytteen sähkölaitteen jäähytyselementin peittymisen pölyllä ja muilla epäpuhtauksilla alentaen jäähytyselementin lämmönsiirtokykyä. Ilman epäpuhtaudet voivat vaikuttaa haitallisesti myös ilmaa jäähytyselementin läpi puhaltavaan puhaltimeen. Epäpuhtaudet voivat pahimmassa tapauksessa estää puhaltimen toiminnan. [18] Puhaltimen vikaantuminen aiheuttaa nopeasti laiteen ylikuumenemisen ja sammumisen vikajärjestelmien kytkeytyessä. Joissakin taajuusmuuttajissa on vakio-ominaisuutena redundanttiset, puhaltimet tarkoittaen, että yhden puhaltimen vikaantuminen ei estä koko laitteen toimintaa.

Hienorakeinen pöly voi helposti kulkeutua kosketuksiin myös sähkölaitteen elektronisten osien kanssa. Yhdistettyynä kosteuden kanssa elektroniikan päälle kertynyt pöly voi muuttua johtavaksi aiheuttaen pahimmassa tapauksessa vuotovirtoja tai läpilyönnin. [18] Pölyn ja muiden hiukkasten aiheuttamien sähkö-, lämpö-, ja korroosio-ongelmien takia on tärkeää huolehtia sähkölaitteiden asianmukaisesta huollossa. Sähkölaitteen kotelo tulisi säännöllisesti puhdistaa kertyneestä liasta ja tarkistaa ettei korroosiota ole päässyt syntymään. Kaivossuunnittelussa tulisi ottaa huomioon kaivoksen ilmalaatu ja mitoitata laitteiden suojausluokitus sitä vastaavaksi. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää muita tapoja, kuten eristettyä sähköhuonetta tai aikaisemmin mainittua laippa-asennusta. Tiettyyppisissä kaivoksissa, kuten Kittilän kultakaivoksessa, edes suurimmalla kotelointiluokalla koteloidut laitteet eivät kestä kaivoksen korroosiota aiheuttavia tekijöitä, minkä vuoksi taajuusmuuttajien sijoittaminen sähköhuoneeseen jää ainoaksi vaihtoehdoksi [4].

### 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 laitteiden toiminnan ovat useat taajuusmuuttajavalmistajat määritelleet suurimmat tärinän ja iskujen arvot, joita taajuusmuuttaja luotettavasti kestää. IEC 60068-2-6 -standardi [21] määrittelee tavat sähkölaitteiden tärinän- ja iskunkeston mittamiselle. Standardissa tärinä ilmaistaan sen amplitudin, taajuuden ja kiihyvyyden summana ja iskut kiihyvyytenä.

Kaivosympäristössä taajuusmuuttajaan kohdistuvat mekaaniset rasitukset riippuvat paljolti laitteen asennuspaikasta. Kaivoksen kiinteissä järjestelmissä, kuten ilmanvaihdossa, taajuusmuuttajat ovat tyypillisesti asennettuna 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 [4]. Jos kaivoksessa louhitaan malmia käyttäen räjähteitä, tätyy laitteiden sijoittelussa ottaa huomioon etäisyys räjäytyspaikkaan tärinän kulkeutuessa kallioperässä pitkiäkin matkoja [22]. Jos laitteita ei pystytä sijoittamaan tarpeeksi kauas, voidaan käyttää tärinänvaimentimia, jotka asennetaan taajuusmuuttajan ja asennuskoteen väliin. Tärinänvaimentimet muuttavat tärinän liike-energian kitkan avulla lämmöksi. Kumi on tyypillinen 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 ja niitä käsitellään asianmukaisella huolellisuudella. Kestäväällä 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 jatkuva jaksollista tärinää mikä voi aiheuttaa resonointia laitteen komponenteissa. Haitallisen resonanssin kannalta olennaisimpia ovat matalat värähtelytaajuudet, jotka aiheuttavat suurimmat siirtymät ja siten myös jännitykset sähkölaitteen komponenteissa [23]. Laitteen kuori ja komponentit tulisi suunnitella siten, että matalia resonanssitaajuuksia ei olisi moottorin kierroslukualueella [23].

### 3.2 Kaivoksen sähköverkko

Kaivokset ovat suuria sähkökuluttajia. Kaivosalueella sähköä kuluttavat kaivanto, rikastamo, toimistotilat ja joskus myös asuinrakennukset. Jos sähkö tilataan ulkoiselta toimittajalta, toimitetaan se yleensä 110 kilovoltin suurjännitelinja pitkin ja muunnetaan kaivosalueella jakelujänniteeksi. Suomessa suurin sallittu jakeluverkon jännite on 20 kilovolttia. Suuren jakelujännitteen etuna ovat pienemmät häviöt pitkillä etäisyyksillä ja mahdollisuus käyttää poikkipinta-alaltaan pienempiä siirto-kaapeleita. [1, s. 251-253]

Jakelujännite muunnetaan edelleen käyttöjänniteeksi jakelumuuntajilla. Kaivosalueilla on yleisesti käytössä 400 voltin kolmivaihejärjestelmä. 400 voltin järjestelmän etuna on, että tavallista 230 voltin vaihtovirtaa saadaan suoraan samasta järjestelmästä yhden vaihe- ja nollajohtimen väliltä. Toinen standardisoitu jännite on 690 voltin käyttöjännite, jota käytettäessä päästään pitempin kaapelietäisyyksiin ja pienempiin johtimien poikkipinta-aloihin. [1, 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 sähkönlakelussa ovat alueella yleisiä, voi voimantuotanto paikanpääällä olla kannattavampi vaihtoehto suuremmista kustannuksista huolimatta. Voimantuotanto paikanpääällä toteutetaan yleensä dieselloimalaitoksella, jossa dieselmoottorit tuottavat sähköenergiaa generaattoreiden välityksellä. Kompromissi näiden kahden väliltä on varavoimalaitos, joka tuottaa vaaditun energian paikanpääällä sähkökatkoksen aikana. [1, s. 251-253]

Ilman taajuusmuuttajaa ohjatut sähkömoottorit vaativat käynnistyksessä moninkertaisen virran normaalialajoon 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 kynnyskysymyksiksi alueilla, joissa siirtoverkko ei kestä suuria virtapiikkejä. [4]

### 3.3 Käyttöikä ja luotettavuus

Luontestaan johtuen kaivokset ovat tilapäisiä rakennelmia eliniän riippuessa monista seikoista kuten esiintymän suuruudesta, esiintymän syvyydestä ja louhittavan malmin markkinahinnan kehityksestä. Rajatusta käyttöajasta ja suuresta alkuviestoinnista 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. [4]

Kaivosteollisuuden vaatiman huomattavan suuren alkuviestoinnin seurauksena lähes kaikki kaivosteollisuuden toimijat ovat suurikokoisia yrityksiä, joilla on näin resurssit suunnitella kaivosten automaatiojärjestelmä itse aina logiikkaohjainten ohjelmistoja myöten. Yrityksen oman logiikkasuunnittelun ansiosta tarve taajuusmuuttajavalmistajien omille automatisovelluksille vähenee [4]. Oman automaatiojärjestelmän käyttö on yrityksen kannalta järkevä, sillä korjaus ja päivitys voidaan näin hoitaa oman henkilöstön avulla ilman tarvetta ulkoisille toimijoille. [4] Taajuusmuuttajavalmistajat ovat lähestyneet tästä ongelmaa tarjoamalla omia avoimen rajapinnan kehitysympäristöjä taajuusmuuttajille esimerkiksi CodeSys-kieltä käytäen [6].

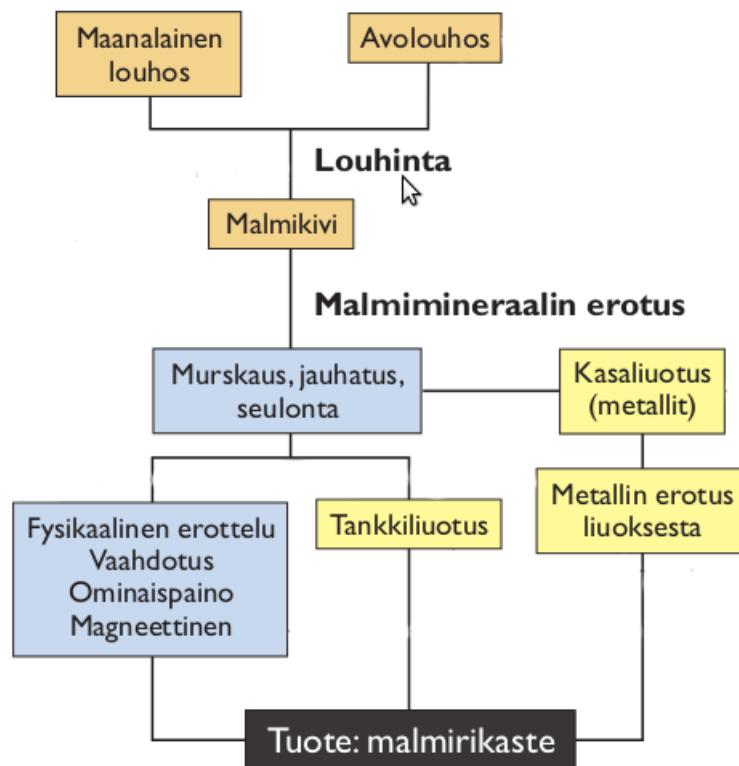
Käyttökatkoilla tarkoitetaan kaivostoiminnan pysähtymistä tai hidastumista tietyn järjestelmän komponentin, kuten taajuusmuuttajan rikkoutumisen seurauksena. Kaivostoiminnassa käyttökatkot ovat merkittävä kaivoksen kannattavuuteen vaikuttava tekijä, koska kaivoksen kiinteät kulut ovat suuret tuotannon määrästä huolimatta. Lisäksi taajuusmuuttajia käytetään turvallisuuden kannalta kriittisissä toiminnoissa kuten ilmanvaihdossa. Tämän takia taajuusmuuttajilta edellytetään ensisijaisesti korkeaa luotettavuutta ja hyviä tukitoimintoja. [4]

## 4 Kaivosprosessi ja taajuusmuuttajien sovellukset

Tämä luku käsittelee kaivosta prosessina ja niitä sovelluksia, joissa tämän tutkimuksen perusteella koetaan, että taajuusmuuttajien käytöstä voisi olla hyötyä. Kaivos sisältää useita toisiinsa kytkeytyviä aliprosesseja ja sen takia onkin tärkeä ymmärtää kaivos kokonaisuutena ennen aliprosessien tarkasteluun siirtymistä. Luku käsittelee ensiksi kaivosprosessin vaiheita kokonaisuutena ja siirtyy sen jälkeen sovelluskohtaiseen tarkasteluun, joissa taajuusmuuttajien käyttö on otettu huomioon.

### 4.1 Kaivosprosessi

Kaivosteollisuus käsittää laajan joukon aliprosesseja, joissa kussakin käytetään siihen suunniteltuja koneita. Näitä kaivosalueella tapahtuvia malmin rikastamisen väli-vaiheita ovat louhiminen räjäytämällä tai poraamalla, louheen siirto, murskaus ja rikastus. Kuvassa 7 nähdään kaivosprosessin päävaiheet. Polttoaineen hinnan kasvaessa kaivoksissa on siirrytty pääosin sähköä voimanaan käyttäviin koneisiin, mikä on luonut tarpeen sähkömoottorien tehokkaalle ohjaukselle taajuusmuuttajilla. Nykyään dieselkoneita käytetään lähinnä vain liikkuvassa kalustossa, mihin sähkönsiirto johdinta pitkin tai akiston avulla voi olla hankalaa tai epäkannattavaa [24].



Kuva 7: Kaivosprosessin päävaiheet. [25]

Louhe saadaan irti maaperästä räjäyttämällä tai louhimalla. Louhinnassa voidaan käyttää useita eri menetelmiä, jotka riippuvat paljolti maaperän laadusta ja louhittavasta mineraalista. Irrotettu louhe täytyy ennen rikastusprosessia hienontaa murskaamalla. Murskaus tapahtuu yleensä kahdessa tai kolmessa osassa, esi-, väli- ja hienomurskauksessa, jossa kussakin raekoko pienenee noin kuudennekseen alkuperäisestä [1, s. 198]. Esimurskaus voidaan suorittaa jo kaivoksen sisällä, jolloin murskattu malmi on helppo siirtää kaivoksesta esimerkiksi kuljetinta käytäen. Suurirakeinen malmi täytyy kuljettaa dumppereilla eli kaivoskäyttöön suunnitelluilla siirkoneilla murskattavaksi.

Murskauksessa louhe murskataan pienempään muotoon puristamalla tai iskemällä. Louhe syötetään murskaimeen syöttimellä, jonka tyyppi riippuu siirrettävän louheen luonteesta. Ennen murskaimia louhe voidaan syöttää seulaan, joka erottlee suuren ja pienen aineksen toisistaan niin, ettei seuraavaan murskausvaiheeseen päädy tarpeettomasti sille liian pientä ainesta. Hienonnusprosessin jälkeen malmi rikastetaan. Rikastuksessa malmista erotetaan tarpeeton sivuaines, jotta halutun mineraalin pitoisuus nousee. Tämä voidaan tehdä malmista riippuen usealla tavalla. [1, s. 197-199]

Tämä kappale käsittelee mainittujen prosessivaiheiden suorittamiseen tarvittavien laitteiden toimintaa. Tarkastelun alla ovat koneet, joissa erityisesti käytetään taajuusmuuttajia tai niille olisi potentiaalisia käyttömahdollisuksia. Tarkastelussa on myös taajuusmuuttajien yleinen teholuokka kyseissä sovelluksissa ja niiden sijoittelu kaivosympäristöön.

## 4.2 Sovellukset

Tässä osiossa käsitellään kaivoksen koneita ja prosesseja, joissa taajuusmuuttajat ovat jo yleisesti käytössä tai niiden käyttöönnotolla voitaisiin tämän tutkimuksen perusteella saavuttaa huomattavia etuja nykyisiin ratkaisuihin verrattuna.

### 4.2.1 Kaivoskoneet

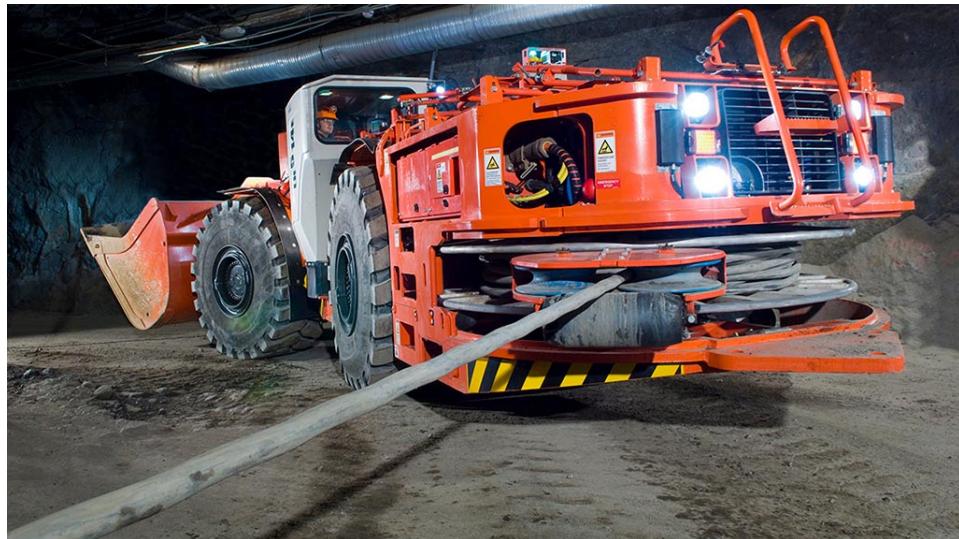
Kaivoksissa käytetään joukkoa erilaisia liikkuvia työkoneita. Niitä käytetään pääasiassa räjähteiden asentamiseen ja poraamiseen sekä malmin liikuttamiseen ja käsittelyyn. Näitä ovat esimerkiksi kaivinkoneet, louhosautot, kauhakuormaajat, porausvaunut ja LHD:t (Load Haul Dump)<sup>3</sup>. Sähkökäyttöisten ajoneuvojen käyttö on yleistynyt kaivoksissa polttoainekustannusten nostessa ja sähkövoimatekniikan kehittyessä. Myös dieseliä ja sähköä vuorotellen käyttäviä hybridiajoneuvoja esiintyy [26].

Liikkuvissa ajoneuvoissa taajuusmuuttajien tärkein käyttökohde on laitteen liikkumiseen käytettyihin pyöriin liitetyn sähkömoottorin ohjaaminen [26]. Liikkuvissa koneissa hyötykuorma ja liittäväys sähköverkkoon ovat taajuusmuuttajien suurimmat edut verrattuna perinteiseen polttomoottoriin [26]. Taajuusmuuttajilla vaihto-

<sup>3</sup>"LHD:t ovat tehokkaita ja suurikauhaisia lastauskoneita, jotka on suunniteltu työskentelemään maanalaisissa kaivoksissa ja ahtaissa tiloissa." [1, s. 192]

virtasähkömoottoria pystytään ajamaan jatkuvasti sen optimialueella toisin kuin polttomoottoreissa, joissa paras hyötyuhde saavutetaan vain tietyllä kierrosalueella [26]. Myös esimerkiksi moottorista erillinen jäähdytysjärjestelmä säästää energiota kun jäähdytyspuhalmia ei tarvitse tarpeettomasti pyörittää moottorin tahdissa kuten polttomoottorikoneissa [26].

Sähköverkkoon liitettävyydellä tarkoitetaan kaivoskoneen kytkemistä osaksi kaivoksen sähköverkkoa niin että kone saa käyttövoimansa suoraan verkosta. Tällöin liikkuvassa koneessa on esimerkiksi kaapelikela, joka koneen liikuessa syöttää sähköjohdinta koneen taakse ja vastaavasti kerää sen takaisin koneen peruuttaessa. Tämä luonnollisesti rajoittaa koneen liikealuetta, mutta on käyttökelpoinen esimerkiksi LHD-koneissa (kuva 8) niiden valmiaksi rajoittuneesta työympäristöstä johtuen. Toinen yleisesti dumpperien eli suurten louhosautojen kanssa käytettävä liitäntäratkaisu on kannatinjohto [26]. Kannatinjohto on ripustettuna dumpperien ajovalylän yläpuolelle ja dumpperit kytkeytyvät siihen junien tapaan koskettimella. Sähköverkkoon kytketyt kaivoskoneet tuovat energiansäästön lisäksi muita etuja etenkin maanalaisissa kaivoksissa. Maanalaisissa kaivoksissa dieselkoneiden käyttö luo pakokaasupäästöjä ja huomattavat määrität lämpöä, joka täytyy tuulettaa ulos. Sähkökäyttöisissä koneissa hiukkapäästöjä ei ole ja korkean hyötysuhteen ansiosta hukkalämmön määriä on mitätön.



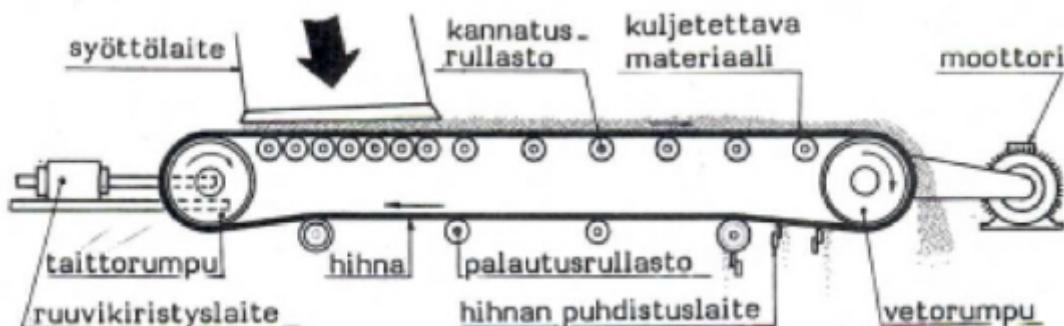
Kuva 8: Sähkökäyttöinen LHD. [27]

Suunniteltaessa taajuusmuuttajia kaivoskoneisiin, täytyy ottaa huomioon useita seikkoja. Taajuusmuuttajat joutuvat koneen osana alittiaksi erittäin rankoille ympäristööille ja tärinälle, joten vankka ja tiivis kotelointi on tärkeä. Samalla tarvittavasta jäähdytyksestä on huolehdittava esimerkiksi erottamalla jäähdytysrivasto elektronikasta. Kaivoskoneet on yleensä ahtaan toimintaympäristön vuoksi rakennettu myös

hyvin kompakteiksi. Tämä asettaa vaatimukset taajuusmuuttajien fyysiselle koolle ja tehotiheydelle. Taajuusmuuttajavalmistajat ovat ottaneet koneenrakentajat huomioon tarjoamalla koteloinniltaan hyvin riisuttuja ja kompakteja moduulilaitteita, jotka on tarkoitettu asiakkaiden itse valmistaman kotelon sisään rakennettavaksi. [4]

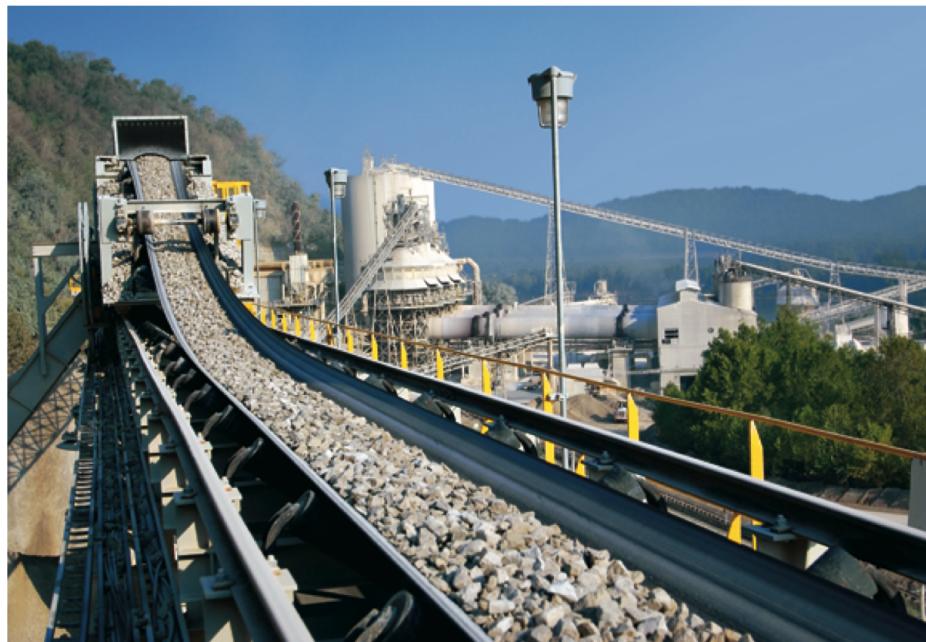
#### 4.2.2 Kuljettimet

Kuljettimet ovat yleinen ratkaisu kaivoksissa murskatun malmin kuljettamiseen paikasta toiseen. Yleisin käytetty kuljetintyyppi on hihnakuljetin, jossa kannatusrullaston pääällä kulkee tekstiili- tai vajjerivahvisteinen hihna. Hihnaa liikuttaa hihnaston toisessa päässä oleva vetorumpu, jonka akselille on kytketty sitä pyörittävä sähkömoottori. Toisessa päässä sijaitsee kääntrulla, joka on yleensä vapaasti pyörivä. Kuva 9 esittää perinteisen hihnakuljettimen rakenteen. Hihnan kireyttä säädetään ruuvikirityslaitteella, jolla rumpujen etäisyyttä pystytään säättämään. Pidemmissä, jopa kilometrien mittaisissa kuljettimissa vetorullia voi olla useampia kuljettimen varrella. [1]



Kuva 9: Hihnakuljettimen perusrakenne. [28]

Hihnakuljettimien alkuinvestointi on melko suuri, mutta käyttökustannukset ovat pienet ja toimintavarmuus hyvä [1]. Hihnakuljetuksen etuja ovat myös tasainen malmivirta jatkokäsittelyyn ja täysi sähkökäyttöisyys, mikä vähentää tuuletuksen tarvetta maanalaisissa kaivoksissa verrattuna dieselkäyttöiseen malminsiirtoon. Hihnakuljetinta pyörättäviltä sähkömoottoreilta vaaditaan tasaista momentin ja pyörimisnopeuden säilyttämistä, jotta hihna ja muut järjestelmän komponentit kuluват mahdollisimman vähän [4]. Tuotannon vaihtelusta johtuen moottorille aiheutuva kokonaiskuorma voi vaihdella ajoittain, mutta äkillisiä kuormanvaihteluita ei pääse juuri syntymään hihnan rajallisen syöttökapasiteetin vuoksi. Kuvassa 10 nähdään kalkkikivikaivoksella malmin siirtoon käytetty hihnakuljetin.



Kuva 10: Hihnakuljetin. [29]

Hihnakuljettimet on perinteisesti varustettu sähkömoottorilla, joka on vaihteiston ja kytkimen välityksellä kytketty vеторумпуun. Tällöin kuljetin pystytään ainoastaan kytkemään päälle ja pois, ja sen päällä ollessa ajamaan vain vakionopeudella. Ohjaamattoman sähkömoottorin kytkeminen suureen kuormaan, kuten valmiiksi täyteen kuljettimeen, aiheuttaa suuret niin mekaaniset kuin sähköiset rasituukset kuljettimen rakenteelle. Kuljettimen vaatima momentti liikkeelle lähtiessä on lisäksi lepokitkan vaikutuksen takia huomattavan suuri, mikä aiheuttaa moottorissa hyvin suuren virrantarpeen. Tämä voi kaivoksesta riippuen aiheuttaa häiriötä koko sähköverkon toiminnassa. [4]

Tätä käynnistysprosessia voidaan tehdä tehokkaammaksi ja laitteiston kannalta ystäväillisemmäksi käyttämällä taajuusmuuttajaa. Kuten aikaisemmin kappaleessa *2.1 Toimintasykli* todettiin, taajuusmuuttajalla pystytään tuottamaan huomattavasti moottorin ominaismomenttia suurempi väentö hitailla nopeuksilla. Tämän lisäksi taajuusmuuttajalla on mahdollista käyttää hyvinkin pitkää ramppikäynnistysaikaa, joka kiihdyttää kuljettimen hitaasti haluttuun nopeuteen. Myös turvallisuusjärjestelmä on edullisempi toteuttaa, kun hintavien kontaktoreiden sijaan voidaan käyttää STO-toimintoa.

Hihnakuljettimiin yhdistetyillä taajuusmuuttajilla voidaan lisäksi saavuttaa säästöjä ja tuottaa sähköä, jos käytetään verkkoon jarruttavia taajuusmuuttajia. Jos malmin siirto on alamäkeen, joudutaan hihnan pyörimistä hidastamaan. Tämä on perinteisesti tehty mekaanisen jarrun avulla, jolloin malmin potentiaalienergia on mennyt hukkaan. Verkkoon jarruttavalla taajuusmuuttajalla voidaan kaivoksen sähköverkkoon tuottaa energiota malmin potentiaalienergiasta. Espanjassa on toteutettu

liukuhihnan jarrutusenergian talteen ottava järjestelmä, joka nyt tuottaa kaivoksen sähköverkkoon 15 megawatin tehon [30].

Taajuusmuuttajien käyttö kuljettimien ohjaukseen on yksinkertaista toteuttaa ja niiden käyttö tuo useita hyötyjä. Tapauksesta riippuen niiden vaatimat investoinnit voivat kuitenkin rajoittaa käyttöönnottoa. Yksikertaisissa sovelluksissa, missä kuljettimen pituus on pieni, voi taajuusmuuttajan lisäämisestä saatava hyöty olla liian pieni tarvittavaan investointiin verrattuna.

#### **4.2.3 Murskaimet ja syöttimet**

Murskaimet ovat laitteita, joilla louheen raekokoa pienennetään rikastusta varten. Louheen murskaus tapahtuu yleensä useassa osassa, raekoon pienentyessä noin kuudenkseen murskausvaiheiden välillä. Murskaamo koostuu itse murskaimesta ja siihen louhetta syöttävästä syöttimestä. Murskaimet ovat suuria, paljon energiaa käyttäviä laitteita, jotka saavat voimansa surista sähkömoottoreista. Syöttimen tehtävä on annostella murskaimaan sopiva määrä louhetta kerrallaan, jotta murskain ei tukkeudu. [1, s. 198-199]

Murskaus voi perustua iskuun tai puristukseen. Molemmille tyypeille on ominaista, että sähkömoottoreista saatavalla pyörivällä liikkeellä kiviainesta joko puristetaan murskaimen osien välissä tai kiviin kohdistetaan voimakas isku pyörivän terän avulla. Leuka-, kierto-, heiluri-, ja karamurskaimet ovat esimerkkejä puristavasta murskaimesta ja iskupalkkimurskaimet iskuperiaatteella toimivasta. [1, s. 200-203]

Taajuusmuuttajalla murskaimen pyörimisnopeutta voidaan reaalialkaiseksi säätää, mikä vaikuttaa suoraan syntyvän kiviaineksen ominaisuuksiin [31]. Aikaisemmin jos pyörimisnopeutta on haluttu muuttaa, on murskain täytynyt pysäyttää ja välitystää moottorin ja murskainosan välillä vaihtaa [24]. Myös murskainosien kulumisesta aiheutuu muutoksia murskatun kiviaineksen laatuun, mitä täytyy kompensoida pyörimisnopeutta tai murskaimen halkaisijaa muuttamalla. Taajuusmuuttajalla tämä kompensointi voidaan tehdä reaalialkaiseksi. Hulthenin tutkimuksessa [31] taajuusmuuttajalla ohjatun kartiomurskaimen pyörimisnopeutta säädettiin automaattisesti perustuen massavirta-antureilta saatuun dataan. Tällä menetelmällä saavutettiin 15% kasvu murskaimen kapasiteetissa perinteiseen ohjaamattomaan ratkaisuun verrattuna.

Itse murskaimen lisäksi murskaamoon kuuluu joukko murskaimelle louhetta syöttäviä laitteita. Näihin kuuluvat kuljettimet ja syöttimet. Moderneissa murskaimissa kaikkia toimintoja ohjataan keskitetysti ohjaamosta. Käynnistystyykli on yleensä automaattinen logiikan hoitaessa koneen komponenttien oikean käynnistysjärjestyksen. Taajuusmuuttajilla moottoreiden ohjaaminen helpottuu ja esimerkiksi ramppikäynnistykset voidaan käyttää vähentämään mekaanista rasitusta. [24]

#### 4.2.4 Ilmanvaihto

Maanalaisissa kaivoksissa koneellinen tuuletus on välttämätöntä. Tuuletuksen tarpeen luovat koneiden pakokaasut, räjähdykskaasut, pöly, kallioperästä tulevat kaasut kuten radon ja eri työvaiheet kuten poraus [1, s. 290]. Näistä merkittävin ilmanlaatua huonontava tekijä on dieselkoneiden aiheuttamat pakokaasut ja pienpartikkelit [1, s. 290]. Jotta työntekijöiden hyvinvointi ja turvallisuus voidaan taata, on laissa määritelty kaivoksen tuuletussuunnittelua ja ilmanlaatumittauksia koskevia asioita [1, s. 285].

Kaivoksen tuuletusjärjestelmä perustuu joko alipaineiseen, ylipaineiseen tai molempia käyttäään ratkaisuun [1, s. 290]. Ali- tai ylipaine luodaan kaivokseen suurilla maanpäällisiällä pääpuuhaltimilla, jotka joko imevät ilmaa kaivoksesta tai puhaltavat ilmaa sisään. Imevässä tapauksessa korvausilma tulee kaivokseen erikseen louhitusta tai muuten avointa reittiä pitkin. Pääpuuhaltimien lisäksi paikallistuuletuksella ilmaa ohjataan esimerkiksi louhittaviin periin, joissa ilman läpiveto ei ole mahdollista [1, s. 293]. Lisäksi pääpuuhaltimilta tuleva ilma täytyy ohjata tehokkaasti kaivoksen sisällä, jotta estetään likaisen ja puhtaan ilman sekoittuminen matkan varrella. Tämä saadaan aikaan puhaltimilla, seinillä, säleiköillä tai kylmäilmaverhoilla.

Puhaltimien liikuttamaa ilmamäärää on perinteisesti ohjattu rajoittamalla ilman kulku tai mekaanisesti puhallinlapojen kulmaa sääätämällä. Lisäksi kaivoksessa elevat ilmanohjaimet, kuten seinät ja säleiköt, ovat mekaanisesti säädettyviä, jotta kaivoksen tuuletusta pystytään sääätämään olosuhteiden muuttuessa. Automaation yleistysesä on alettu ottaa käyttöön automaatiojärjestelmiä tuulettimien ohjauskessä [1, s. 300-301]. Näin on mahdollista luoda reaalialajassa säätyvä tuuletusjärjestelmä, joka mittaa kaivoksen ilmanlaatua ja säättää tuuletuksen tehoa sen mukaan. Kaivosilmasta voidaan mitata esimerkiksi kosteutta, lämpötilaa ja pölypitoisuutta.

Kuten luvun 2 alussa mainittiin, moottorinohjaus kuristamalla on energiankulutuksen kannalta hyvin epätehokasta. Taajuusmuuttajalla ohjattua puhallinta pystytään reaalialajassa sääätämään, niin että haluttu ilmamäärä saavutetaan. Taajuusmuuttaja on oivallinen työkalu paikalliseen tuuletuksen automatisointiin, jossa taajuusmuuttaja ohjaa yhtä tuuletinta esimerkiksi lämpöanturilta saatavan datan mukaan. Taajuusmuuttaja on hyödyllinen myös osana laajempaa automaatiojärjestelmää, jossa PLC lähettää puhaltimen ohjaussignaalin taajuusmuuttajalle esimerkiksi kenttäväylää hyödyntäen. Kenttäväyliä hyödyntämällä kaapeloinnin määrä vähenee huomattavasti ja etenkin kaivoksissa, joissa vetomatkat voivat olla kilometrejä, tuovat huomattavia säästöjä. Myös turvallisuuslogiikan integrointi kenttäväylään esimerkiksi PROFIsafella vähentää tarvittavan kaapeloinnin määrää.

Kittilän kultakaivoksella puhallinautomaatio on rakennettu käyttäen ABB:n ACS880-taajuusmuuttajia yhdistettynä ABB:n valmistamaan logiikkaohjaimeen. Sen tuomat hyödyt liittyvät saatuihin kustannusetuihin, jotka on saatu käyttämällä vain yhtä kenttäväyläkaapelia ohjaus- ja monitorointitiedon siirtämiseen. [4] Kenttäväylää hyö-

dyntämällä on mahdollista päästää etäältä käsiksi yksittäisten taajuusmuuttajien parametreihin. Tämä vähentää myös henkilöstökuluja, koska yksi operaattori voi säättää koko järjestelmää ilman tarvetta mennä itse toimilaitteen luokse.

#### 4.2.5 Pumput

Kaivoksiin kertyy vettä ympäristön asettamista syistä kuten pohjavesien valumista ja paikallisista sääolosuhteista johtuen. Lisäksi kaivosprosessin eri vaiheet, kuten pölyn sidonta ja poraaminen, vaativat vettä, joka tuodaan kaivokseen putkistoa pitkin vesijohtoverkosta tai esimerkiksi läheisestä järvestä. Tätä kaivokseen kertyvää vesi-massaa täytyy jatkuvasti pumpata ylös kaivoksesta, jotta kaivos ei tulvi. Kaivoksessa erityisen haasteen pumppaamiselle aiheuttaa veden seassa oleva kiinteä aines. Kiinteä aines täytyy saostaa pois vedestä kaivoksen sisällä ennen pumpaaamista, jotta nestemäiselle aineelle tarkoitettut pumput eivät tukkiudu tai vaurioidu. Pumpaus on myös mahdollista tehdä siihen suunnitellulla lietepumpuilla, jolloin saostusta ei tarvita. Saostus tapahtuu sillle rakennetuissa saostusaltaissa, joista pumput pumpaavat puhdistunutta vettä pois. [1, s. 307]

Pumpuilla ohjataan pääsääntöisesti painetta, virtausnopeutta tai säiliön pinnankorkeutta. Pumpujen ohjaus on perinteisesti toteutettu anturilla, joka kytkee pumpun päälle kun tietty raja-arvo ylitetään ja pois kun se taas alitetaan. [1, s. 315]. Ratkaisu on hyvin yksinkertainen, mutta energiankulutus on suurta, sillä pumpua käytetään yleensä kaukana optimaaliselta toiminta-alueelta. Kaksiarvoinen pumpun ohjaus aiheuttaa myös äkillisiä paineenvaihteluita putkistoon, mikä aiheuttaa rasituksia itse pumpulle ja putkistolle.

Taajuusmuuttajilla pumppuja pystytään muiden sovellusten tapaan ohjaamaan portaattomasti. Painetta, virtausnopeutta tai pinnankorkeutta voidaan ohjata takaisinkytkennällä käyttäen PID-säätöä, jolloin prosessiarvon, esimerkiksi paineen, heilahtelut pienenevät huomattavasti. Sovelluskohtaisella ohjelmistolla varustetut ABB:n ACQ810-taajuusmuuttajat pystyvät arvioimaan virtausta myös ilman virtaus- tai painesensoreita, mikä vähentää käyttöönottokuluja tilanteissa, joissa suurta tarkkuutta ei tarvita [32]. Ohjelmistossa on myös automaattisia toimintoja, kuten pumpun puhdistus, joka puhdistaa pumpun nopeilla suunnanvaihdoksilla käyttäjän käskystä tai määräjoin [32]. Kuten luvussa 1 mainittiin, taajuusmuuttaja mahdollistaa helpon prosessiarvon etäohjauksen ja -valvonnan, sekä turvallisuustoiminnot esimerkiksi kenttäväylää hyödyntäen.

Taajuusmuuttajien tuoma uusi pumpusovellus on rinnankytkettyjen pumppujen ohjaaminen energiatehokkaalla ja pumppuja vähiten rasittavalla tavalla. Useampi taajuusmuuttaja kommunikoi tällöin keskenään säätäen jokaisen pumpun toiminnan mahdollisimman lähelle optimaalista toimintapistettä, pitäen samalla ohjatun prosessiarvon halutulla tasolla. Pumppuvian ilmetessä taajuusmuuttajat automaatisesti kytkevät kyseisen pumpun pois päältä ja jatkavat toimintaa jäljellä olevilla pumpuilla. [32]

Kaivoksissa pumpun toiminta perustuu useimmiten pinnankorkeuden säätyyyn, pumppujen tarkoitukseen ollessa vain veden poistaminen kaivoksen sisältä esimerkiksi saostusaltaasta. Tällöin pumpulta vaaditaan kestävyyttä pumpattavan nesteen ollessa usein kiintoaineepitoista ja mahdollisesti hapanta. Tällöin taajuusmuuttajalla ohjattu pumpu on hyödyksi seurattaessa pumpun tilaa etenkin lietepumppauksessa, jossa pumput joutuvat hyvin kovalle rasitukselle. Taajuusmuuttajalla pumppua kyetään valvomaan etäältä ja tarvittaessa voidaan tehdä esimerkiksi puhdistustoiminto, jos pumpun tehon huomataan laskeneen. Pumpattaessa puhdasta vettä esimerkiksi porausyksiköille on ohjattavana suureena porausyksikön vedenpaine, jonka halutaan pysyvän vakiona. Tällöin vaaditaan jatkuvaa takaisinkytettyä ohjausta, johon vaaditaan nopeasti paineen vaihteluun reagoiva pumpu. Taajuusmuuttajalla tämä pystytään toteuttamaan yksinkertaisesti taajuusmuuttajan PID-säätimellä.

#### 4.2.6 Kompressorit

Moderneissa kalliorakoneissa hydrauliset järjestelmät ovat pääosin korvanneet paineilmaa voimanlähteenään käyttäneet koneet [1, s. 143]. Paineilmalla on kuitenkin edelleen rooli joissakin porasovelliukseissa, ruiskubetonioinnissa ja räjähdyssaineen pannostuksessa. Paineilmaa varten kaivoksiin on yleensä rakennettu ruostumattomasta teräksestä valmistettu paineilmaverkosto, johon syöttävä ilmaa omaan tilaansa asennetut kompressorit [1, s. 269].

Pumppujen tapaan paineilmaa voidaan tuottaa kompressorilla, joka siirtyy kevennettylle käynnille kun saavutetaan tietty painetaso putkistossa. Toinen vaihtoehto on käyttää taajuusmuuttajaohjattua muuttuvanopeuksista kompressoria, joka säätää pyörimisnopeuttansa jatkuvasti vastaten sen hetkiseen painetarpeeseen putkistossa. [1, s. 269] Sovelluksesta riippuen muuttuvanopeuksinen kompressor voi säätää paljon energiaa, mutta esimerkiksi tapauksissa joissa paineen tarve on lähes vakio, on tavallinen kompressorri hyötysuhteeltaan yleensä parempi.

Kuten pumpusovelliukseissa, useita kompressoreita käsittävä järjestelmä on myös mahdollinen. Tällöin ulkoinen teollisuus-PC tai keskenään kommunikoivat taajuusmuuttajat ohjaavat samaan putkistoon kytkettyjä kompressoreita. Tämä mahdollistaa myös erilaisten kompressorien käytön samassa systeemissä. Paineilmasovelliukseissa onkin yleistä, että yhden suuritehoisen kompressorin sijaan käytetään muutamaa suurta peruskuormituskonetta ja muutamaa pienempää huippukuormituskonetta, jotka aktivoidaan vain painetarpeen vaatiessa [1, s. 269].

## 5 Yhteenveton

Tutkimuksen aiheina olivat taajuusmuuttajien sisäisen toiminnallisuuden nykytilanne, niiden rakenne ja kestävyys kaivosolosuheteissa sekä taajuusmuuttajista saatava hyöty kaivosten prosesseissa. Toiminnallisuuden tarkastelussa huomattiin, että taajuusmuuttajat ovat viime vuosina kehittyneet yhä enemmän itsenäisiksi prosessilaitteikseen, joissa kyettää suorittamaan laskentaa ja ohjaamaan moottorin lisäksi myös muita laitteita I/O:ta tai kenttäväylää käytäen. Kenttäväylien tuomat edut verrattuna perinteisiin analogi- tai digitaalisaaleihin ovat saaneet myös kaivosteollisuuden toimijat toteuttamaan kenttäväyliä käyttäviä automaatiojärjestelmiä kaivosympäristöön. Työntekijöiden hyvinvointi ja yhä tiukkenevat turvallisuusmääräykset ovat saaneet taajuusmuuttajavalmistajat toteuttamaan turvallisuustoimintoja taajuusmuuttajiin, mikä laskee turvallisuuslaitteiston kuluja ja on näin houkutteleva ominaisuus teollisuuden toimijoille.

Kaivos on haastava ympäristö kaikille koneille, mutta erityisesti elektroniikkalaitteille, koska ne ovat herkkiä niin kosteudelle kuin pölylle. Kaivosympäristössä kosteus, tärinä, pöly ja muut korroosiota aiheuttavat tekijät aiheuttavat taajuusmuuttajan jäähdystysjärjestelmän tehon heikkenemistä ja pahimmassa tapauksessa myös sähköisiä vikoja ja jopa läpilyönnin piirilevyllä. Haastavia ympäristöoloja vastaan taajuusmuuttajavalmistajat ovat tuoneet markkinoille erilaisilla kotelointiratkaisuilla varustettuja taajuusmuuttajia. Niiden kestävyys vaihtelee sisäkäyttöön suunnitelluista avoimista laitteista lähes vesitiiviisiin. Kaivoksen ominaisuuksista riippuen erilaisia kotelointejä käytetään, mutta tutkimuksessa selvisi, että edes suurimmalta kotelointiluokalla varustetut taajuusmuuttajat eivät välittämättä selviydy tietyn tyypisten kaivosten syövyttävistä ja kosteista ympäristöoloista. Näissä tapauksissa herkkä teholelektronikka on asennettuna omaan eristettyyn sähkötilaansa, joiden ilman ominaisuudet ovat sisätiloja vastaavat. Koska sähkötilat ovat keskitettyjä, voivat moottorikaapelien pituudet olla kaivoksissa huomattavan pitkiä. Tämä tulee ottaa huomioon taajuusmuuttajan ominaisuuksia suunniteltaessa.

Taajuusmuuttajien potentiaaliset sovellukset ulottuvat kaivosteollisuudessa kaikille, missä sähkömoottoreita käytetään. Tällöin taajuusmuuttajien käyttö perustellaan joko energiansäästöllä tai parantuneella kyyllä ohjata kyseessä olevaa prosessia. Energiansäästö perustuu taajuusmuuttajan kykyyn ohjata suoraan sähkömoottorin tehoa pyörimisnopeuden ja momentin avulla. Tämä on sovelluksesta riippuen huomattavasti energiatehokkaampaa kuin esimerkiksi nopeuden säätäminen jarrun avulla. Etenkin prosesseissa, joissa nopeutta joudutaan jatkuvasti muuttamaan tuovat taajuusmuuttajat suuria energiasäästöjä perinteiseen ratkaisuun verrattuna. Energiasäästöjen lisäksi taajuusmuuttajat voivat investointikustannuksestaan huolimatta tuoda säästöjä myös asennuksessa, kun vaihteistojen, kontaktoreiden ja turvalogikoiden tarve vähenee. Taajuusmuuttajilla saavutetut parannukset prosessin ohjauksessa voivat myös olla ratkaiseva syy niiden käyttöönnotossa. Esimerkiksi pumppujärjestelmien älykäs ohjaus ja kuljettimien ramppikäynnistys ovat sovelluksia, joissa älykkääällä toiminnallisuudella saavutetaan epäsuoria säästöjä esimerkiksi vähentyneenä laitteis-

ton kulumana ja parantuneena prosessin tehokkuutena.

Kirjallisten lähteiden, haastatteluiden ja yritysvierailun perusteella on ilmeistä, että taajuusmuuttajilla on lukuisia käyttömahdollisuuksia kaivosteollisuuden alalla. Tekniikan kehitys ja tietoisuus energiankulutuksesta ja ympäristöasioista kiihdyyttää perinteisten ohjausmenetelmien korvaamista taajuusmuuttajilla. Kaivosteollisuus on pitkään ollut automaatioasteeltaan jäljessä muita suuria teollisuudenaloja, mutta älykkäiden hajautettujen automaatiojärjestelmien kehittyessä on automaation taso, ja samalla taajuusmuuttajien käyttö kaivoksissa kasvanut. Tulevaisuudessa sähkömoottoreiden yhä enenevissä määrin korvatessa polttomoottorit, on taajuusmuuttajille yhä suurempi tarve, kun tarvitaan tehokasta ja tarkkaa moottorisäätiöä.

## Viitteet

- [1] Hakapää, A. ja Lappalainen, P. *Kaivos- ja louhintateknika*. 2. painos. Helsinki: Vammalan kirjapaino Oy, 2007.
- [2] ABB Oy. *ABB drives in mining*. 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/$file/Mining%20brochure_EN_lowres.pdf). Päivitetty 2012. Viitattu 6.10.2014.
- [3] ABB Drives. *Technical guide book*. Helsinki, 2008.
- [4] Antti Hedman, Myyntipäällikkö. ABB Oy. Haastattelu, 17.10.2014. Pitäjänmäki, Helsinki.
- [5] ABB Oy. *ACS880 Control Panel*. Kuva. Saatavissa: [http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/2996a31f6d99e961c1257864004ae0c1/\\$file/HM2011-02b.jpg](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/2996a31f6d99e961c1257864004ae0c1/$file/HM2011-02b.jpg). Viitattu 28.10.2014.
- [6] ABB Oy. *Laiteopas, ACS880-01-taajuusmuuttajat, versio E*. Saatavissa: [http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/71ce8071e2a7ae2bc1257bd70046ade1/\\$file/FI\\_ACS880-01\\_0\\_55to250kW\\_HW\\_E\\_plus\\_update\\_notice\\_screen.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/71ce8071e2a7ae2bc1257bd70046ade1/$file/FI_ACS880-01_0_55to250kW_HW_E_plus_update_notice_screen.pdf). Päivitetty 29.6.2012. Viitattu 9.10.2014.
- [7] IEC EN 61508-5. *Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems - Part 5: Examples of methods for the determination of safety integrity levels*. Versio 2. Geneve, Sveitsi: International Electrotechnical Commission, 2010. 97 s.
- [8] IEC 60204-1. *Safety of machinery - Electrical equipment of machines - Part 1: General requirements*. Versio 5.1. Geneve, Sveitsi: International Electrotechnical Commission, 2009. 248 s.
- [9] Siemens AG. *Safe Torque Off (STO)*. Saatavissa: <http://www.industry.siemens.com/topics/global/en/safety-integrated/machine-safety/product-portfolio/drive-technology/safety-functions/pages/safe-torque-off.aspx>. Päivitetty 10.3.2014. Viitattu 27.10.2014.
- [10] ABB Oy. *User's manual: FSO-12 Safety functions module*. Saatavissa: [http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/80fd1fe025d402d7c1257d0000408aa6/\\$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.
- [11] 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.

- [12] PROFIBUS & PROFINET International (PI). *PROFIsafe*. Saatavissa: <http://www.profibus.com/technology/profisafe/>. Päivitetty 10.3.2014. Viitattu 27.10.2014.
- [13] Joensuu, T. Eronen, T. *Taajuusmuuttajan ohjauksen suunnittelu*. Insinöörityö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. 2013.
- [14] IEC 60529. *Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)*. Versio 2.2. Geneve, Sveitsi: International Electrotechnical Commission, 2013. 214 s.
- [15] Fridleifsson, I. Bertani, R. Huenges, E. Lund, J. Rybach, L. *The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change*. IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources. Luebeck, Saksa, 2008. Saatavissa: <http://www.ipcc.ch/pdf/supporting-material/proc-renewables-lubeck.pdf>.
- [16] CUPP. *Pyhäsalmen kaivos*. Saatavissa: [http://www.cupp.fi/index.php?option=com\\_content&view=article&id=3&Itemid=41&lang=fi](http://www.cupp.fi/index.php?option=com_content&view=article&id=3&Itemid=41&lang=fi). Päivitetty 26.3.2013. Viitattu 6.10.2014.
- [17] Man-chao, H. *Application of HEMS cooling technology in deep mine heat hazard control*. Mining Science and Technology (China), 19. Painos, Numero 3. S. 269-275. 2009. Saatavissa: [http://dx.doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60051-X](http://dx.doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60051-X).
- [18] Pallasmaa, A. *Ulkokäyttöön Tarkoitetun Tehoelektroniikkalaitteen Konseptisuunnittelu*. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Espoo. 2009.
- [19] Muttilainen, A. *Lifetime and Reliability of a Frequency Converter's Fan*. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Sähkötekniikan korkeakoulu. Espoo. 2013.
- [20] Danfoss Drives. *VLT AutomationDrive Series*. Saatavissa: [http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/2270DF18-D4AD-4808-824E-4942B247F078/0/2011\\_AutomationDrive\\_176R0571\\_Web.pdf](http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/2270DF18-D4AD-4808-824E-4942B247F078/0/2011_AutomationDrive_176R0571_Web.pdf). Päivitetty: 8/2011. Viitattu: 26.11.2014.
- [21] IEC 60068-2-6. *Environmental testing - Part 2-6: Tests - Test Fc: Vibration (sinusoidal)*. Versio 7. Geneve, Sveitsi: International Electrotechnical Commission, 2007. 86 s.
- [22] Sirkko, T. *Louhintatyöstä syntyvän tärinän riskiarvionti*. Opinnäytettyö. Savonia-Ammattikorkeakoulu. 2012.
- [23] Steinberg, S. *Vibration analysis for electronic equipment*. New York, Yhdysvallat: Wiley, 2000.
- [24] Veijo Väyrynen, sähkösuunnittelija. Juha Kenttälä, kehityspäällikkö. Metso Oy. Haastattelu, 5.12.2014. Tampere.

- [25] opasnet.org. Kuva. Saatavissa: <http://fi.opasnet.org/fi/Tiedosto:Kaivostointiminnayleisprosessi.png>. Päivitetty 11.2.2012. Viitattu 12.11.2014.
- [26] Brown, G. Elbacher, B. Koellner, W. *Increased productivity with AC drives for mining excavators and haul trucks*. Industry Applications Conference. Conference Record of the 2000 IEEE, 1. painos, s.28,37. 2000. Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=880962>.
- [27] Sandvik Oy. *Ground-breaking Electricity*. Saatavissa: [minestories.com/ground-breaking-electricity](http://minestories.com/ground-breaking-electricity). Päivitetty: 2014. Viitattu: 12.11.2014.
- [28] Ruokolainen, P. *Louheensiirtomenetelmät suurella louhoksella*. Kandidaatintyö. Aalto-yliopisto, Kemian tekniikan korkeakoulu. Espoo. 2011.
- [29] Carmeuse Lime & Rock. Kuva. Saatavissa: <http://www.carmeuseky.com/wp-content/uploads/2012/07/conveyor.png>. Viitattu 9.11.2014.
- [30] Rodriguez, J. Pontt, J. Becker, N. Weinstein, A. *Regenerative drives in the megawatt range for high-performance downhill belt conveyors*. Industry Applications. IEEE Transactions, 38. painos, numero 1. S. 203-210. 2002. Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/abstractKeywords.jsp?tp=&arnumber=980377>.
- [31] Erik Hulthén, C. Evertsson, M. *Real-time algorithm for cone crusher control with two variables*. Minerals Engineering, 24. Painos, numero 9. S. 987-994. 2011. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2011.04.007>.
- [32] ABB Oy. *ABB drives for water and wastewater*. Saatavissa: [http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/a572a4ae2cc86f8ac1257c6e005094de/\\$file/EN\\_ACQ810forwaterandwastewaterREVF\\_13.5.2014.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/a572a4ae2cc86f8ac1257c6e005094de/$file/EN_ACQ810forwaterandwastewaterREVF_13.5.2014.pdf). Päivitetty 13.5.2014. Viitattu 26.11.2014.

## A Liite 1: Koteloointiluokitus standardin IEC 60529 mukaan

IEC 60529 -standardin mukaisen IP-koodin ensimmäisen tunnusnumeron merkitys [14].

<b>Ensimmäinen tunnusnumero</b>	<b>Suojaus vaarallisiin osiin pääsyltä</b>	<b>Suojaus vierailta esineiltä</b>
0	Suojaamaton	Suojaamaton
1	Kosketussuojattu kämmeneltä	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	Pölyssuojattu
6	Langalta	Pölytiivis

IEC 60529 -standardin mukaisen IP-koodin toisen tunnusnumeron merkitys [14].

<b>Toinen tunnusnumero</b>	<b>Suojaus veden haitalliselta pääsyltä.</b>
0	Suojaamaton
1	Suojattu pystysuoraan tippuvalta vedeltä
2	Suojattu korkeintaan 15 asteen kulmassa tippuvalta vedeltä
3	Suojattu korkeintaan 60 asteen kulmassa roiskuvalta 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 haittavaikutuksilta
8	Suojattu jatkuvan veteen upottamisen haittavaikutuksilta