



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Eero Levo

ACSX80 -testilaitteiston suunnittelu ja rakentaminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

21.11.2019

Tekijä Otsikko	Eero Levo ACSX80 -testilaitteiston suunnittelu ja rakentaminen
Sivumäärä Aika	36 sivua + 3 liitettä 21.11.2019
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine	sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	Support Manager Vesa Metso lehtori Jukka Karppinen
<p>Insinööryön aiheena oli suunnitella ja rakentaa testilaitteisto ABB Drivesin taajuusmuuttajien teknisen tuen käyttöön. Tuella oli ollut tarvetta laitteistolle, jolla pystyttiin ajamaan erilaisia moottoreita erilaisilla taajuusmuuttajilla. Laitteisto suunniteltiin teknisen tuen tarpeisiin ja siihen sisällytettiin tuen yleisimmät taajuusmuuttajat, ACS880-01, ACS580-01 ja ACS380. Moottoreiksi valittiin perinteinen induktiomoottori ja uudempi SynRM-tahtireluktanssimoottori. Moottoreita haluttiin myös voida kuormittaa, joten kuormakoneeksi valittiin kestomagneettimoottori sen tasaisen momentin takia. Kuormakoneelle valittiin taajuusmuuttajaksi verkkovaihtosuuntaajalla varustettu ACS880-11. Kolmella muulla taajuusmuuttajalla pystyttiin ajamaan induktio- ja SynRM-moottoreita. Kolmen taajuusmuuttajan jännitevälipiirit liitettiin yhteen common DC-järjestelmäksi, jolloin moottorien jarruttamisesta syntynyt energia pystyttiin hyödyntämään muissa taajuusmuuttajissa ja moottoreissa. ACS580-01 ei ollut mahdollista liittää common DC-järjestelmään taajuusmuuttajan teknisten rajoitusten vuoksi.</p> <p>Työn alussa käytiin läpi erilaisten taajuusmuuttajien teoriaa, jonka jälkeen perehdyttiin vastaavanlaisen laitteiston suunnittelussa ja rakentamisessa huomioitaviin standardeihin ja direktiiveihin sähköturvallisuuden ja toiminnallisen turvallisuuden näkökulmasta. Standardien jälkeen tutustuttiin laitteistossa hyödynnettyyn common DC-järjestelmään ja sen mitoittamiseen. Työn lopuksi käytiin läpi laitteiston suunnittelu, rakentaminen ja taajuusmuuttajien parametointi.</p> <p>Joistakin suunnitelluista omaisuuksista jouduttiin luopumaan hankalan ja monimutkaisen toteuttamisen takia, mutta lopputuloksena saatiin laitteisto, joka täytti sille asetetut vaatimukset. Laitteistolla ei ole tarkoitus suorittaa rutiinomaisia testiajoja, vaan sitä tullaan käyttämään teknisen tuen apuna asiakkaiden ongelmatilanteiden toistamisessa ja ratkaisuissa. Laitteistolla voidaan myös demonstroida, kuinka erilaisten taajuusmuuttajien moottorinohjaus eroaa toisistaan.</p>	
Avainsanat	taajuusmuuttaja, common DC, moottori, testilaitteisto

Author Title	Eero Levo Designing and building of ACSX80 test rack
Number of Pages Date	36 pages + 3 appendices 21 November 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Professional Major	Electrical Power Engineering
Instructors	Vesa Metso, Support Manager Jukka Karppinen, Senior Lecturer
<p>The purpose of this study was to design and build a test rack for ABB Drives technical customer support team. The support team had a need for a test rack to drive various motors with different frequency converters. The test rack was designed to meet the needs of technical support and include the most common AC drives, ACS880-01, ACS580-01 and ACS380.</p> <p>The motors used were a traditional induction motor and a newer SynRM synchronous reluctance motor. The motors were also to be loaded, so a permanent magnet motor was chosen as a load machine because of its constant torque. ACS880-11 regenerative drive was chosen to run the load machine. The three other drives were used to run the induction and SynRM motors. Voltage intermediate circuits of ACS880-11, ACS880-01 and ACS380 were connected to a common DC bus, which enabled the energy generated by motor braking to be utilized in other frequency converters and motors. ACS580-01 could not be connected to the common DC bus due to technical limitations of the drive.</p> <p>At the beginning of this thesis, the theory of various frequency converters is reviewed, followed by the standards and directives to be considered in designing and building of similar test rack, from electrical safety and operational safety point of view. After the standards and directives, the common DC system used in the test rack and its dimensioning are introduced. Finally, the design and construction of the rack and parameterization of the drives are reviewed.</p> <p>Some of the planned features had to be abandoned due to cumbersome and complicated realization. Nevertheless, the finished test rack met the requirements set for it. The test rack is not intended to run routine test runs, but it will be used by technical support to repeat and solve customer issues. Hardware can also be used to demonstrate the difference in motor control of different drives.</p>	
Keywords	drive, common DC, motor, test rack

Sisällys

Lyhenteet ja käsitteet

1	Johdanto	1
2	Taajuusmuuttaja	2
2.1	Suorat taajuusmuuttajat	3
2.2	Välipiirilliset taajuusmuuttajat	4
3	Sähköturvallisuus	5
3.1	Sähköturvallisuuslaki	6
3.2	Standardit ja niiden vaatimukset	7
3.3	EMC-näkökohdat	8
3.4	Vaatimukset sähköisille testauslaitteistoille	10
4	Toiminnallinen turvallisuus	12
4.1	Yleistä	12
4.2	Standardit ja direktiivit	12
4.3	STO-turvallisuusfunktio	15
5	Common DC bus	16
5.1	Common DC yleisesti	16
5.2	Mitoitus	19
6	Laitteiston suunnittelu	21
6.1	Taajuusmuuttajat	23
6.2	Moottorit	25
6.3	Päävirtapiiri	25
6.4	Ohjausvirtapiiri	26
6.5	Turvallisuuspiiri	26
7	Laitteiston rakentaminen ja parametointi	27
7.1	Rakentaminen	27

7.2	Parametrien asettaminen	32
8	Yhteenveto	33
	Lähteet	35
	Liitteet	
	Liite 1. SIL- ja PL- turvallisuustasojen raportti	
	Liite 2. Päävirtakaavio	
	Liite 3. Moottoriletkan linjausraportti	

Lyhenteet ja käsitteet

AC *Alternating Current.* Vaihtosähkö.

AI *Analog input.* Analoginen sisääntulo.

Common DC Piiri, jossa taajuusmuuttajien tasajännitevälipiirit on yhdistetty toisiinsa.

DC *Direct Current.* Tasasähkö.

DI *Digital Input.* Digitaalinen sisääntulo.

DIO *Digital input/output.* Digitaalinen sisääntulo/ulostulo.

EMC *Electromagnetic Compatibility.* Sähkömagneettinen yhteensopivuus.

IGBT *Insulated Gate Bipolar Transistor.* Tehoelektroniikan komponentti.

LCI *Load commuted inverter.* Kuormakommutoitu taajuusmuuttaja.

PDS *Power Drive Systems.* Taajuusmuuttajakäytöt.

PL *Performance Level.* Toiminnallisen turvallisuuden taso.

PWM *Pulse width modulation.* Pulssinleveysmodulaatio.

RO *Relay output.* Relelähtö.

SIL *Safety Integrity Level.* Toiminnallisen turvallisuuden taso.

STO *Safe Torque Off.* Turvallisuusfunktio, joka poistaa momentin moottorin akselilta.

SynRM *Synchronous reluctance motor.* Tahtireluktanssimoottori.

1 Johdanto

Insinööriyön tarkoituksena oli suunnitella ja toteuttaa testilaitteisto ABB Oy:n Drives-yksikön taajuusmuuttajien teknisen tuen käyttöön. Laitteisto rakennettiin Drivesin Helsingin Pitäjänmäen yksikössä. ABB Oy on yksi maailman johtavista automaatioteknologiayhtymistä. Pitäjänmäellä ABB Oy:n Drives-yksikkö työllistää noin 1300 henkilöä, joista 450 työskentelee myynnissä ja tukitehtävissä, 450 tuotannossa ja noin 300 henkilöä työskentelee tuotekehityksen parissa.

Taajuusmuuttajien teknisen tuen tehtävänä on auttaa asiakkaita teknisissä kysymyksissä ja antaa kattavaa tuote- ja sovellustukea. Joissakin tapauksissa ongelman ratkaisemiseksi täytyy olla mahdollista testata laitteen toimintaa. Tukitoiminnan avuksi teknisellä tuella on demolaitteita, joilla ongelmia voidaan yrittää toistaa ja korjata. Demolaitteet ovat tavallisesti pieniä, yhden taajuusmuuttajan ja moottorin kokonaisuuksia, joita on mahdollista käyttää toimistolla tavallisesta pistorasiasta saatavalla sähköllä. Tuella on ollut tarvetta laitteelle, jolla voidaan verrata tuen yleisimpien taajuusmuuttajien toimintaa erilaisilla moottoreilla. Laitteisto suunniteltiin ja toteutettiin teknisen tuen tarpeiden mukaan.

Työn tarkoituksena on suunnitella ja rakentaa laitteisto, joka sisältää taajuusmuuttajien teknisen tuen yleisimmät taajuusmuuttajat. Laitteiston rakentamisessa tärkeänä osa-alueena oli turvallisuus. Laitteistoon on tarkoitus laittaa neljä moottoria kahteen moottoriletkaan. Moottoreita on mahdollista kuormittaa, sillä moottoreiden akselit on mahdollista kytkeä yhteen magneettikytkimellä, jolloin letkan toinen moottori toimii kuormakoneena toiselle moottorille. Laitteiston taajuusmuuttajat on tarkoitus kytkeä common DC -järjestelmään, jolloin niiden jännitevälipiirit ovat yhdessä ja moottorien jarrutuksesta syntyvä energia on mahdollista hyödyntää piirin muissa taajuusmuuttajissa.

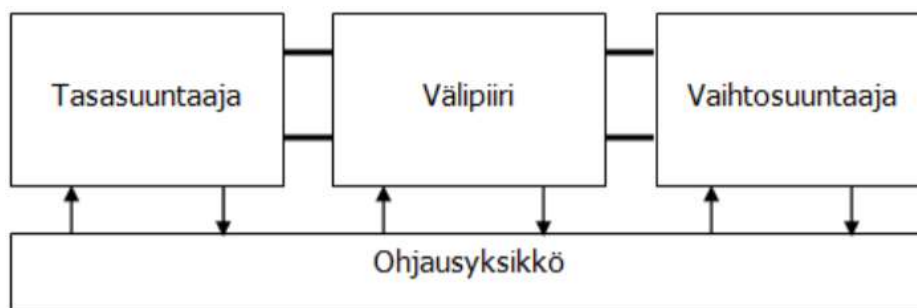
Laitteistoa on tarkoitus käyttää apuna teknisen tuen toiminnassa, joten sen käyttömahdollisuuksien täytyy olla monipuolisia. Laitteella ei ole tarkoitus suorittaa rutiininomaisia testejä vaan se on tarkoitettu pohjaksi tarpeen mukaisten testien suorittamiselle. Laitteella on mahdollista testata ja verrata taajuusmuuttajien toimintaa erilaisilla moottoreilla

tai moottorin käyttäytymistä erilaisten taajuusmuuttajien ohjauksessa. Tarvittaessa asiakkaalle voidaan demonstroida laitteiston avulla moottorin ohjausta erilaisilla taajuusmuuttajilla. Laitteiston rakentamisen tavoitteena on myös tilan säästäminen laboratoriossa, joten laitteistosta on tarkoitus rakentaa mahdollisimman kompakti.

Työn alussa esitellään taajuusmuuttaja laitteena, jonka jälkeen tarkastellaan vastaavanlaisen laitteiston suunnittelua ja rakentamista sähkö- ja toiminnallisen turvallisuuden kannalta ja tutustutaan oleellisiin standardeihin ja direktiiveihin. Tämän jälkeen perehdytään common DC -järjestelmään ja sen mitoitukseen ja työn lopussa käydään läpi laitteiston suunnittelu ja rakentaminen sekä valmiin laitteiston parametointi.

2 Taajuusmuuttaja

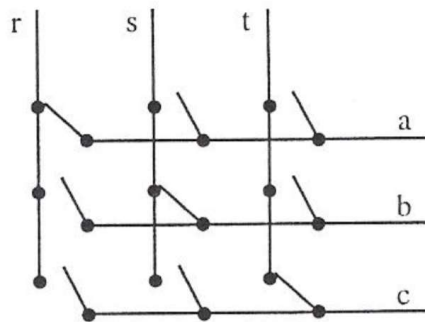
Taajuusmuuttaja on tehoelektronikan laite, jolla voidaan säätää sähkömoottorin nopeutta portaattomasti säätämällä moottorin syöttöjännitteen taajuutta. Taajuusmuuttajan etuna on se, että moottorikäytön nopeutta voidaan säätää prosessin mukaan, jolloin säästetään huomattavia energiansäästöjä. Samalla voidaan vähentää sähköverkon kuormitusta ja laitteiden mekaanista rasitusta moottorin käynnistyksen yhteydessä. Taajuusmuuttajia on olemassa kahta päätyyppiä, suorat taajuusmuuttajat ja välipiirilliset taajuusmuuttajat. Näistä yleisempiä ovat välipiirilliset taajuusmuuttajat. Taajuusmuuttajan toimintaa ohjataan ohjausyksiköllä. Ohjausyksikön tärkeimmät tehtävät ovat taajuusmuuttajan puolijohteiden ohjaaminen, tiedonsiirto taajuusmuuttajan komponenttien välillä, tiedon kerääminen ja sen raportointi sekä turvallisuustoimintojen valvonta ja suorittaminen. Kuvassa 1 nähdään välipiirillisen taajuusmuuttajan lohkokaavio. (1.)



Kuva 1. Välipiirillisen taajuusmuuttajan lohkokaavio.

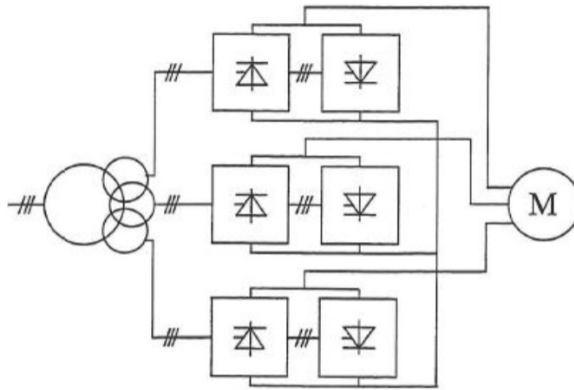
2.1 Suorat taajuusmuuttajat

Suorat taajuusmuuttajat jaetaan matriisimuuttajiin ja syklokonverttereihin. Matriisimuuttaja muodostuu yhdeksästä kytkimestä, joilla jokainen lähtövaihe voidaan kytkeä jokaiseen tulovaiheeseen. Matriisimuuttajan kytkinmalli nähdään kuvasta 2. Matriisimuuttajan lähtöjännitettä voidaan säätää valitsemalla kytkimillä tulovaiheiden jännitteistä paloja siten, että lähtöjännitteen keskiarvo ja syöttöverkon vaihevirran keskiarvo muuttuvat sinimuotoisesti. Matriisimuuttajalla tehon suunta voi olla kumpaankin suuntaan tahansa, joten sillä voidaan verkkoonjarruttaa. Matriisimuuttajia ei kuitenkaan juuri ole kaupallisesti saatavilla. Syynä ovat käytännön realiteetit, esimerkiksi lähtöjännite voi matriisimuuttajalla olla vain 86 % verkon syöttöjännitteestä, mistä johtuen normaalijännitteille tehtyjä moottoreita voidaan kuormittaa vain 86 % niiden nimellistehosta. (2, s.50–51.)



Kuva 2. Matriisimuuttajan kytkinmalli (2, s.51).

Syklokonvertteri sen sijaan on kaupallisesti hyödynnetty. Syklokonvertteri on rakennettu kolmesta vastarinnankytketystä tyristorisillasta, joita kutakin syötetään omasta muuttajan kolmivaiheisesta toisiosta. Kytkenämalli nähdään kuvassa 3. Syklokonvertteri on mahdollista rakentaa myös ilman muuntajaa, mutta moottorin käämien on tällöin oltava erillisiä oikosulun estämiseksi, eikä koneella tai syklokonvertterilla saa olla tähtipistettä. Syklokonvertterin tyristorisiltojen käytön haittapuolena on se, että lähtötaajuuden kasvessa jännitteen muoto poikkeamaa yhä enemmän sinimuodosta. Käytännössä käyttökelpoinen maksimilähtötaajuus on hieman vajaa puolet syöttöverkon taajuudesta. Syklokonverttereita käytetään yleisimmin suuritehoisten sähkökoneiden syöttöön, joilla tarvittava maksiminopeus on alle 1000...1500 1/min. (2, s.52.)



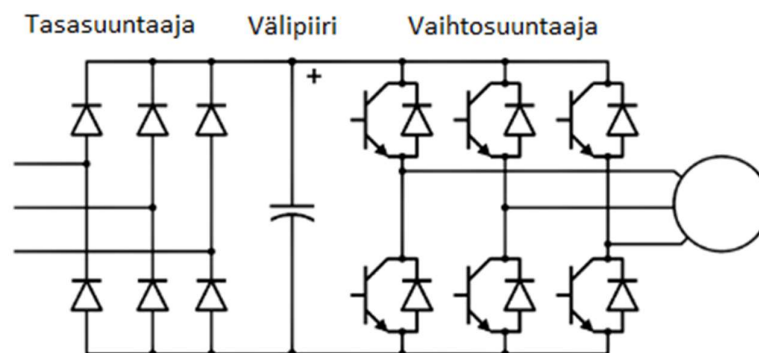
Kuva 3. Syklokonvertterin kytkentämalli (2, s.52).

2.2 Välipiirilliset taajuusmuuttajat

Välipiirilliset taajuusmuuttajat koostuvat kolmesta osasta, tasasuuntaajasta, tasajännite- tai tasavirtävälipiiristä ja vaihtosuuntaajasta. Taajuusmuuttajassa tasasuuntaaja muuttaa syötön vaihtosähkön ensin tasasähköksi välipiiriin ja vaihtosuuntaajalla välipiirin tasasähkö muutetaan takaisin vaihtosähköksi moottorille. Virtävälipiiri koostuu tasoituskuristimesta, joka pienentää tasavirran aaltoisuutta. Jännitevälipiirissä sen sijaan on kondensaattori, joka pienentää tasajännitteen aaltoisuutta. Kondensaattorin lisäksi jännitevälipiirissä saattaa myös olla tasoituskuristin tasasuuntaajan ja kondensaattorin välissä.

Yksinkertaisin virtävälipiirillinen taajuusmuuttaja on kuormakommutoitu taajuusmuuttaja, LCI (load commuted inverter). Se koostuu kahdesta tyristorisillasta, joista toinen on kytketty verkkoon ja toinen tahtikoneeseen. Siltojen välissä on välipiiri, jossa on kuristin. Verkonpuoleinen silta toimii tasasuuntaajana ja kuorman puoleinen vaihtosuuntaajana, mutta jarrutettaessa, jolloin kone toimii generaattorina, osat vaihtuvat jännitteen polariteetin muuttuessa. LCI:n ongelmana on kommutoinnin epäluotettavuus pienillä nopeuksilla ja siitä johtuva nykivä momentti, eikä se sovellu suuren vääntömomentin sovelluksiin pienellä nopeudella. Oikosulkumoottorille soveltuva virtävälipiiritajuusmuuttaja saadaan korvaamalla LCI:n kuorman puoleinen tyristorisilta pakko-ohjatuilla kytkimillä, esimerkiksi IGBT-komponenteilla. (2, s.49.)

Jännitevälipiiri-taajuusmuuttajilla käytetään yleisimmin diodisiltaa tuottamaan välipiiriin tasajännitettä. Kuvassa 4 nähdään jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja. Diodisiltaa ei voida ohjata, joten moottorin jännitettä säädetään pulssinleveysmodulointia, PWM (pulse width modulation), käyttäen. Pulssinleveysmoduloinnin etuna on lähes sinimuotoinen vaihevirta ja hyvä ja nopea säädettävyys. Diodisilta estää jarrutustehon vaihtosuuntauksen syöttöverkkoon päin, joten mikäli moottoria halutaan jarruttaa suuremmalla teholla kuin mitä välipiiriin kondensaattorit pystyvät vastaanottamaan, täytyy välipiiriin lisätä jarrukatkoja ja jarruvastus. Toinen vaihtoehto on korvata diodisilta verkkovaihtosuuntaajalla, joka on vastaava kuin moottoria syöttävä vaihtosuuntaaja. Tällöin molemmat suuntaajat toteutetaan todennäköisesti IGBT-komponenteilla. Tällöin moottorin toimiessa generaattorina moottorin pään vaihtosuuntaaja toimii tasasuuntaajana ja syöttöverkon suuntaaja vaihtosuuntaajana ja jarrutusteho voidaan syöttää takaisin verkkoon. Jännitevälipiirillisillä taajuusmuuttajilla voidaan syöttää sekä tahti- että oikosulkukoneita. Jännitevälipiiri-taajuusmuuttajat ovat yleisimmin käytetty taajuusmuuttajatyyppejä. (2;3.)



Kuva 4. Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja. Tasasuuntaajana on diodisilta ja vaihtosuuntaaja on toteutettu IGBT-komponenteilla (1).

3 Sähköturvallisuus

Suomessa kaikissa töissä täytyy noudattaa työturvallisuuslakia ja sen perusteella annettuja säädöksiä. Lisäksi sähköalan töissä täytyy noudattaa sähkötyöturvallisuutta koskevia säädöksiä, joita on annettu sähköturvallisuuslainsäädännössä. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes) valvoo sähköturvallisuuslain noudattamista ja Tukesin tehtävänä on

vahvistaa sähköturvallisuutta koskevien standardien ja julkaisujen luettelo (Tukes ohje S10). (4.)

3.1 Sähköturvallisuuslaki

Sähköturvallisuuslain tarkoituksena on varmistaa sähkölaitteiden ja -laitteistojen turvallinen käyttö ja estää sähkön käytöstä johtuvien sähkömagneettisten häiriöiden haitalliset vaikutukset sekä turvata sähkölaitteiden tai -laitteistojen sähkövirran tai magneettikentän aiheuttamista vahingoista kärsineen asema. Lakia sovelletaan sähkölaitteisiin ja -laitteistoihin, joita käytetään sähkön tuottamisessa, siirrossa, jakelussa tai käytössä ja joiden sähköisistä tai sähkömagneettisista ominaisuuksista voi aiheutua vahingon vaara tai häiriöitä. Laissa säädetään laitteiden tai laitteistojen vaatimuksista, vaatimustenmukaisuuden osoittamisesta ja valvonnasta, sähköalan töistä ja niiden valvonnasta sekä laitteen ja laitteiston haltijan vahingonkorvausvelvollisuudesta. Luvussa käytetään lähteenä sähköturvallisuuslakia. (5.)

Sähköturvallisuuslaki velvoittaa, että sähkölaitteet ja -laitteistot on suunniteltava, rakennettava, valmistettava ja korjattava sekä niitä on huollettava ja käytettävä tarkoituksen mukaisesti niin, että

- niistä ei aiheudu kenenkään hengelle, terveydelle tai omaisuudelle vaaraa
- niistä ei sähköisesti tai sähkömagneettisesti aiheudu kohtuutonta häiriötä
- niiden toiminta sähköisesti tai sähkömagneettisesti ei häiriydy helposti.

Sähköturvallisuuslaissa määritellään myös sähkötöille ja käyttötöitä koskevat vaatimukset. Perusvaatimuksena sähkötöille ja käyttötöille on, että sähkötöitä tai käyttötöitä tekevän henkilön tulee olla tehtävään ja sen sähköturvallisuutta koskeviin vaatimuksiin perehtynyt tai opastettu. Lisäksi sähkölaitteiden korjaus ja huoltotöitä sekä sähkölaitteistojen rakennus-, korjaus-, huolto- ja käyttötöitä tekeville on määritelty seuraavat edellytykset:

- Töitä johtamaan on nimetty henkilö, jolla on riittävä kelpoisuus (sähkötöiden johtaja).

- Itsenäisesti töitä suorittavalla ja valvovalla henkilöllä on riittävä kelpoisuus tai muuten riittävä ammattitaito.
- Toiminnanharjoittajan käytössä on töiden tekemisen kannalta tarpeelliset työvälineet sekä sähköturvallisuutta koskevat säädökset.

3.2 Standardit ja niiden vaatimukset

Suomessa lainsäädännön asettamat sähköturvallisuusvaatimukset on helpoin toteuttaa noudattamalla kulloinkin voimassa olevaa sähköturvallisuusstandardia *SFS 6002*. Standardia *SFS 6002* sovelletaan kaikkeen sähkölaitteistojen käyttö- ja ohjaustoimintaan sekä sähkölaitteistoissa tai niiden lähellä tapahtuvaan työntekoon. Sovellettavat sähkölaitteistot toimivat kaikilla jännitealueilla pienoisjännitteistä suurjännitteisiin. (4.)

Laitteistossa käytetyille taajuusmuuttajakäyttöille on kolme tuotestandardia, jotka perustuvat EU-direktiivien mukaisuuteen. Ensimmäinen niistä on *EN 61800-3 Adjustable speed electrical power drive systems – Part 3: EMC requirements and specific test methods*, joka perustuu EMC-direktiiviin. Se asettaa vaatimuksia taajuusmuuttajien sähkömagneettisille ominaisuuksille. Siitä kerrotaan seuraavassa luvussa tarkemmin.

Toinen tuotestandardi on *EN 61800-5-1 Adjustable speed electrical power drive systems – Part 5-1: Safety requirements- Electrical, thermal and energy*. Standardi perustuu Eurooppalaiseen pienjännitedirektiiviin ja se asettaa vaatimuksia taajuusmuuttajille koskien niiden turvallisuutta sähköisten ominaisuuksien ja lämpö- ja energiaominaisuuksien kannalta. Työssä käytettyjen taajuusmuuttajien Eurooppalaisen pienjännitedirektiivin (European Low Voltage Directive) mukaisuus on vahvistettu tämän standardin mukaan.

Kolmas tuotestandardi on *EN 61800-5-2 Adjustable speed electrical power drive systems – Part 5-1 : Safety requirements – Functional safety*, joka käsittelee taajuusmuuttajakäyttöjen toiminnallista turvallisuutta. Toiminnallisesta turvallisuudesta kerrotaan myöhemmässä luvussa lisää.

Näiden standardien lisäksi on olemassa muitakin standardeja, jotka täytyy ottaa huomioon. *EN 60204-1 Electrical Equipment of Machines* esimerkiksi on pienjännitedirektiivin

standardi kaikille sähköisille laitteille ja sen lisäksi se on konedirektiivin sähköturvallisuusstandardi. (6, s. 91.)

Sähköisille testauslaitteistoille on olemassa oma standardi, *SFS-EN 50191 Sähköisten testauslaitteistojen asennus ja käyttö*, joka soveltuu pysyvien ja tilapäisten sähköisten testauslaitteistojen asentamiseen ja käyttöön. Näitä vaatimuksia käsitellään myöhemässä luvussa.

3.3 EMC-näkökohdat

EMC (Electromagnetic Compatibility) tarkoittaa elektronisten laitteiden kykyä toimia ilman ongelmia sähkömagneettisissa ympäristöissä. Laitteet eivät myöskään saa aiheuttaa häiriötä ympäristössään oleville muille laitteille. EMC-vaatimuksia laitteille asettaa Eurooppalainen EMC-direktiivi ja Suomessa standardi *SFS 6000-4-44*.

EMC-direktiivi 2014/30/EU

EMC-direktiivi määrittää vaatimukset sähköisten laitteiden sähkömagneettisten häiriöiden kestolle ja aiheuttamiselle Euroopan Unionin alueella. EMC-tuotestandardit *EN 61800-3:2004 + A1:2012* määrittävät vaatimukset taajuusmuuttajille. (6, s.122.)

Standardissa taajuusmuuttajat jaetaan kategorioihin C1, C2, C3 ja C4.

Kategorian C1 taajuusmuuttajien nimellisjännite on alle 1000 V ja ne on tarkoitettu käytettäväksi rajoittamattoman jakelun pienjänniteverkossa. Käytetyillä taajuusmuuttajilla kategorian C1 säteilyrajat saavutetaan seuraavilla toimenpiteillä:

- 1) Valitaan valinnainen EMC-suodatin ja se asennetaan suotimen manuaalien mukaisesti.
- 2) Moottori- ja ohjauskaapelit valitaan valmistajan ohjeiden mukaisesti
- 3) Taajuusmuuttaja asennetaan valmistajan ohjeiden mukaisesti
- 4) Moottorikaapelin pituus ei ylitä ohjeiden mukaista maksimipituutta. (6, s.122.)

Kategorian C2 taajuusmuuttajien nimellisjännite on alle 1000 V, ja ne saa asentaa ja niitä saa käyttää vain valtuutettu ammattilainen, kun niitä käytetään rajoittamattoman jakelun pienjänniteverkossa. Käytetyillä taajuusmuuttajilla kategorian C2 säteilyrajat saavutetaan seuraavilla toimenpiteillä:

- 1) Moottori- ja ohjauskaapelit valitaan valmistajan ohjeiden mukaisesti
- 2) Taajuusmuuttaja asennetaan valmistajan ohjeiden mukaisesti
- 3) Moottorikaapelin pituus ei ylitä ohjeiden mukaista maksimipituutta. (6, s.122.)

Kategorian C3 taajuusmuuttajien nimellisjännite on alle 1000 V, ja ne on tarkoitettu käytettäväksi rajoitetun jakelun sähköverkoissa eikä niitä ole tarkoitettu käytettäväksi rajoittamattoman jakelun pienjänniteverkoissa. Käytetyillä taajuusmuuttajilla kategorian C3 säteilyrajat saavutetaan seuraavilla toimenpiteillä:

- 1) Moottori- ja ohjauskaapelit valitaan valmistajan ohjeiden mukaisesti
- 2) Taajuusmuuttaja asennetaan valmistajan ohjeiden mukaisesti
- 3) Moottorikaapelin pituus ei ylitä ohjeiden mukaista maksimipituutta. (6, s.123.)

Kategorian C4 taajuusmuuttajien nimellisjännite on tasan tai yli 1000 V tai nimellisvirta on tasan tai yli 400 A tai ne on tarkoitettu käytettäväksi monimutkaisissa laitteistoissa rajoitetun jakelun pienjänniteverkoissa. Jos kategorian C3 toimenpiteillä ei päästä riittäviin säteilyrajoihin, standardin vaatimukset voidaan täyttää seuraavilla toimenpiteillä:

- 1) Varmistetaan, että liiallista säteilyä ei välity läheisiin pienjänniteverkkoihin. Joissain tapauksissa muuntajien ja kaapeleiden luontainen rajoitus riittää. Jos asiasta on epäilyksiä, voidaan käyttää syöttömuuntajaa, jonka käämien välillä on häiriösuoja.
- 2) Asennusta varten tehdään EMC-suunnitelma häiriöiden estämiseksi
- 3) Taajuusmuuttaja asennetaan valmistajan ohjeiden mukaisesti
- 4) Moottorikaapelin pituus ei ylitä ohjeiden mukaista maksimipituutta. (6, s.123.)

Tämän insinööriyön laitteistossa käytetyt taajuusmuuttajat ovat kategorian C2 mukaisia.

SFS 6000-4-44

Standardissa SFS 6000-4-44 (7) ohjeistetaan, että sähkömagneettisille häiriöille herkkiä laitteita ei suositella asennettavaksi lähelle todennäköisiä sähkömagneettisten häiriöiden lähteitä, joita tässä laitteistossa ovat:

- sähkömoottorit
- taajuusmuuttajat
- muuntajat
- keskuskeskukset.

Sähkömagneettisten häiriöiden vähentämiseksi voidaan tällaisessa sovelluksessa käyttää seuraavia toimenpiteitä:

- Kaapelien johtavat metallivaipat yhdistetään yhteiseen potentiaalintasausverkkoon
- vältetään induktiivisia silmukoita käyttämällä voima- ja tietoliikennekaapeleille omia reittejä
- voima- ja tietoliikennekaapeleiden risteykset tehdään mahdollisuuksien mukaan suorassa kulmassa
- käytetään konsentrisella suojauksella varustettuja kaapeleita, joilla vähennetään suojajohtimeen indusoituvia virtoja
- taajuusmuuttajien ja moottorien välillä käytetään valmistajan ohjeen mukaisia kaapeleita ja suodattimia.

Laitteistoa suunnitellessa ja rakentaessa otettiin huomioon näitä seikkoja ja EMC-vaikutukset pyrittiin saamaan mahdollisimman pieniksi.

3.4 Vaatimukset sähköisille testauslaitteistoille

Standardi *SFS-EN 50191 Sähköisten testauslaitteistojen asennus ja käyttö* asettaa vaatimuksia testauslaitteistoille. Standardin mukaan testauslaitteistot pitää rakentaa ja toteuttaa testauspaikkana, testauslaboratoriona tai tutkimuslaitoksena, tai tilapäisenä testauslaitteistona (8, s.14).

Sähköiskulta suojaus on varmistettava siten, että testausrakennelma rakennetaan niin, että suojaus kosketukselta on varmistettu jännitteisten osien eristämällä, kansilla, koteloinnilla, puomeilla tai turvaetäisyyksillä. Kosketuksen estämiseksi riittävän suojausluokan on oltava vähintään IP3X. Käytetyillä testauskoettimilla on oltava testausjännitteeseen nähden riittävä eristystaso. Suojauksen vikatapausten varalta on oltava tehokas vikasuojaus. Laitteiston mekaanisen suojauksen on myös oltava riittävän vahva. (8, s.14–16.)

Testattavan kappaleen tulee olla erotettu maasta. Mikäli tämä ei ole mahdollista, on testirakennelman oltava suunniteltu ja toteutettu siten, että jännitteen siirtyminen muihin johtaviin osiin on estetty. Testauspöytien kansien on oltava eristävää materiaalia. (8, s.14–16.)

Laitteistolle saatetaan määrittää kiellettyjä alueita testausjännitteestä riippuen. Kuitenkin jännitteiden ollessa enintään 1000 V, pidetään jännitteisten osien pintoja kielletyn alueen rajoina. Jännitteiden ylittäessä 1000 V kielletylle alueelle ulottumista pidetään samanarvoisena kuin jännitteisten osien koskettamista. (8, s.14–16.)

Testauslaitteistossa on oltava laitteet, jotka ilmoittavat toimintatilanteen ja käyttötilanteen. Tämä on toteutettavissa esimerkiksi merkki- ja varoitusvaloilla. Testilaitteiston ohjaus- ja testauspiirien on oltava selkeästi tunnistettavissa ja laitteisto on selkeästi merkittävä varoituskilvillä. Testauslaitteisto on myös varustettava hätäkytkentälaitteilla, joilla voidaan katkaista kaikki vaaraa aiheuttava sähköenergia. Jännitteen asiattoman ja tarkoituksettoman kytkennän estäminen on varmistettava. Testauspiirit eivät myöskään saa tulla uudelleen automaattisesti jännitteisiksi sähkökatkon jälkeen. (8, s.16–18.)

Testauslaitteiston käytölle on myös asetettu vaatimuksia. Testauslaitteiston kanssa saavat työskennellä vain ammattihenkilöt tai opastetut henkilöt. Laitteisto on varustettava käyttöohjeilla, jotka sisältävät riittävät tiedot turvalliseen toimintaan. Laitteisto on tarkastettava ulkoisesti näkyvien vaurioiden varalta aina ennen käyttöä eikä sitä saa käyttää mikäli vaurioita tai vikoja havaitaan. Testauslaitteiston kunnossapitoon saa käyttää vain ammattitaitoisia henkilöitä. Kunto ja toiminta on myös tarkastettava ammattilaisen toimesta sopivin aikaväleihin. Tarkastusten tulokset on myös kirjattava muistiin. (8, s.18–20.)

4 Toiminnallinen turvallisuus

4.1 Yleistä

Turvallisuusmääräysten tarkoituksena on suojata ihmisiä ja ympäristöä koneiden aiheuttamilta vahingoilta ja riskeiltä. Toiminnalliseen turvallisuuteen liittyvät systeemit vähentävät vaaratilanteiden mahdollisuutta, jotta koneiden käytämisestä johtuvat vahingot saadaan minimoitua. Turvallisuusstandardit määrittelevät turvallisuuden kestävämmien riskien poistamisella. Hyväksyttävät riskien tasot on määritelty koneturvallisuusstandardeissa tietyillä riskinpoiston menetelmien määrillä. (6. s.414).

Tehokkain tapa poistaa riskejä on suunnitella laitteet luonnostaan turvallisiksi. Mikäli riskien poisto laitetta suunniteltaessa ei ole mahdollista tai järkevää, suojaaminen kiinteillä suojilla tai turvallisuustoiminnoilla on usein järkevintä. Koneturvallisuustoiminnoilla voidaan vähentää laitteen liikkuvien osien aiheuttamia riskejä, saavuttaa lakien velvoitteet ja taata ihmisten ja ympäristön turvallisuus. (6. s.414.)

Toiminnallinen turvallisuus koneiden yhteydessä usein tarkoittaa järjestelmää, joka valvoo ja tarvittaessa ohjaa laitetta, jotta turvallinen käyttö on mahdollista. Yleensä koneissa valvotaan nopeutta, pysähtymistä, pyörimissuuntaa ja paikallaan pysymistä. Kun turvallisuusjärjestelmä huomaa poikkeaman se aktiivisesti saattaa laitteen takaisin turvalliseen tilaan esimerkiksi pysäyttämällä sen turvallisesti tai poistamalla momentin moottorin akselilta. Turvajärjestelmä ei kuulu koneen normaaliin toimintaan, ja sen toimimattomuus aiheuttaa välittömän riskin koneen käytössä, vaikka kone muuten toimisi normaalista, mutta vaaratilanteessa suojaus ei toimitakaan. (6. s.414.)

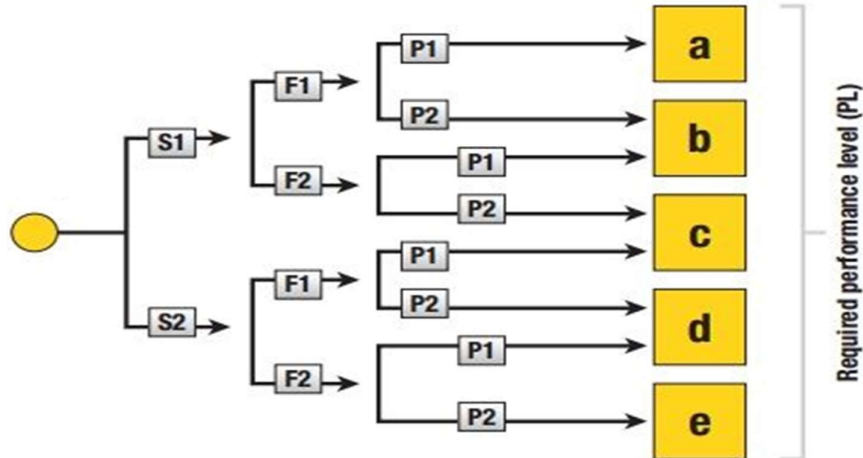
4.2 Standardit ja direktiivit

Toiminnallista turvallisuutta koskee standardi *EN ISO 12100:2010*. Standardi käsittelee aiheen peruskäsitteet, terminologian ja riskien määrittämisen. PDS-käyttöjen toiminnallista turvallisuutta koskee myös tuotestandardi *EN/IEC 61800-5-2:2007*.

Toiminnallisen turvallisuuden toteutusta käsittelee kaksi kansainvälistä standardia, *EN ISO 13849-1* ja *EN/IEC 62061*. *EN ISO 13849-1* -standardissa laitteelle määritetään PL (Performance Level) -taso, kun taas *EN/IEC 62061* -standardissa laitteelle määritetään SIL (Safety Integrity Level) -taso. Tuloksena saadun tason mukaan määritetään tarvittavat turvallisuusfunktiot. Molemmilla standardeilla suunniteltaessa koneen turvallisuus johtaa samaan lopputulokseen. Laitetta suunniteltaessa on valittava, kumpaa standardia seurataan. Samaa standardia on noudatettava laitetta suunniteltaessa alusta loppuun. (6.)

Performance Level

PL-tasoa määritettäessä voidaan käyttää kuvan 5 mukaista kaaviota. Ensin määritetään vaara, jonka torjumiseksi tasoa lähdetään määrittämään. Kohdassa S (Severity) määritetään vaarasta aiheutuvan vamman vakavuus. S1 on vähäinen, palautuva vamma ja S2 on vakava, peruuttamaton vamma. Kohdan S jälkeen edetään kohtaan F (Frequency), jossa määritetään, kuinka usein vaaralle altistutaan ja/tai kuinka pitkä altistusaika on. F1 on harvoin ja/tai altistusaika on lyhyt ja F2 on usein tai jatkuvasti ja/tai altistusaika on pitkä. Kohdan F jälkeen siirrytään kohtaan P (Possibility), jossa määritetään mahdollisuudet välttää tai vähentää vaaraa. P1 tarkoittaa, että välttäminen on mahdollista tietyissä olosuhteissa, ja P2 tarkoittaa, että vaaran välttäminen on hädin tuskin mahdollista. Tämän jälkeen saadaan PL-taso, jossa a on pienin vaaditun riskinpoiston taso ja e on suurin. (6.)



Kuva 5. PL-tason määrittämiseen käytetty kaavio.

Safety Integrity Level

SIL-tason määrittäminen on hieman monimutkaisempaa kuin PL-tason. SIL-taso voidaan määrittää kuvan 6 taulukon avulla. Ensimmäisenä määritetään vaaran vakavuuden luokitus S. Vakavuuden luokitus S määrittää, mitä saraketta viimeisessä taulukossa luetaan, kun vaadittua SIL-tasoa määritetään. Vakavuuden luokituksen jälkeen määritetään vaaralle altistumisen taajuus F (Frequency), eli kuinka usein vaaralle altistutaan. Taajuuden F jälkeen määritetään vaaran todennäköisyys P (Probability), jonka jälkeen määritetään vaaran välttämisen mahdollisuus A (Avoidance). Kohdat F, P ja A lasketaan yhteen, jolloin saadaan riskiluokka K. Riskiluokan K ja vaaran vakavuuden S perusteella määritetään tarvittava SIL-taso. Taulukon kohta MT tarkoittaa muita toimenpiteitä. Tyhjät kohdat eivät vaadi toimenpiteitä turvallisuuden suhteen. (6.)

F Altistumisen taajuus		P Todennäköisyys		A Välttämismahdollisuus	
<= 1h	5	erittäin korkea	5		
>1h - <= 1d	5	todennäköinen	4		
>1h - <= 2w	4	mahdollinen	3	mahdoton	5
>2w - <= 1a	3	harvinainen	2	harvinainen	3
>1a	2	ei merkittävä	1	todennäköinen	1

S Vakavuuden luokitus	
peruuttamaton: kuolema, silmän tai käsien menetys	4
peruuttamaton: murtuneet raajat, sormien menetys	3
peruuntuva: vaatii lääkärin hoitoa	2
peruuntuva: vaatii ensiapua	1

$$F + P + A = K$$

Vakavuus (S)	Luokka (K) 3 - 4	Luokka (K) 5 - 7	Luokka (K) 8 - 10	Luokka (K) 11 - 13	Luokka (K) 14 - 15
4	SIL 2	SIL 2	SIL 2	SIL 3	SIL 3
3		MT	SIL 1	SIL 2	SIL 3
2			MT	SIL 1	SIL 2
1				MT	SIL 1

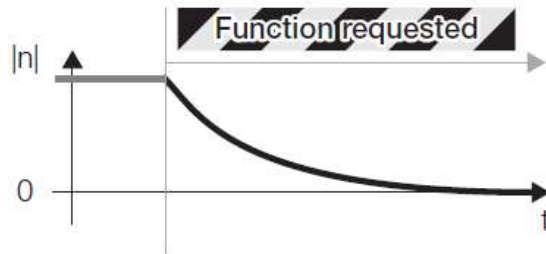
Kuva 6. SIL-tason määrittämiseen käytetty taulukko.

Laitteistolle laskettiin rakentamisen lopuksi molempien standardien mukaisesti SIL ja PL -tasot. Laskenta tehtiin ABB:n Functional safety design toolin avulla. Laitteistolle saadut tasot olivat SIL1 ja PLa. Raportit tuloksista on liitetty liitteeksi työn loppuun (liite 1).

4.3 STO-turvallisuusfunktio

Standardissa *EN/IEC 61800-5-2* määritellään taajuusmuuttajien turvallisuusfunktiot. Työssä käytetyissä taajuusmuuttajissa on kaikissa vakiovarusteena STO (Safe torque off) -ominaisuus. STO-funktio toimii siten, että aktivoitaessa funktio poistaa moottorin akseliilta momentin, ja moottori pysähtyy kitkan avulla. STO-funktio estää myös moottorin

uudelleen käynnistämisen vahingossa. STO ei kuitenkaan suojaa elektronisilta vaaratilanteilta, sillä se vain estää momenttia tuottavan energian. Kuvassa 7 näkyy funktion toimintamalli.



Kuva 7. STO-funktion toiminta (6, s.423).

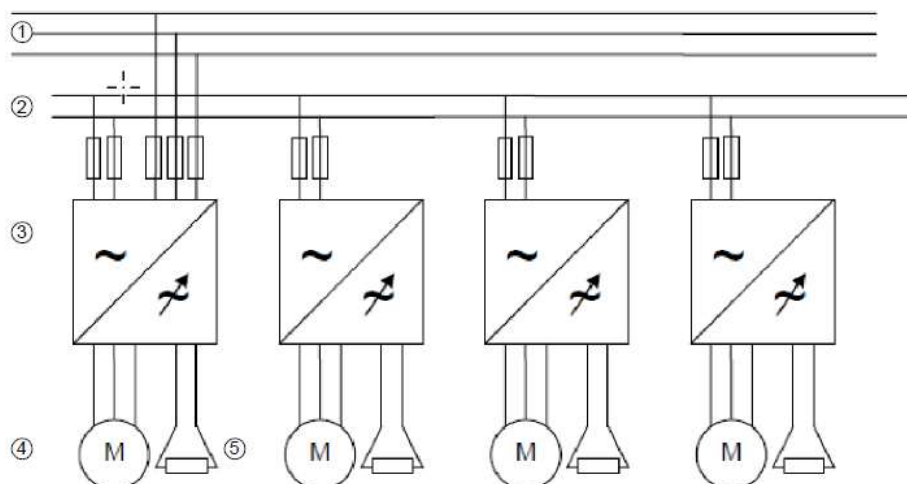
ABB:n taajuusmuuttajissa STO-funktio toteutetaan kahdella piirillä. Funktio aktivoituu, mikäli toinen tai molemmat piireistä aukeavat. Tässä laitteistossa STO:ta käytetään moottorien hätäpysäytyspainikkeena. STO täyttää SIL3- ja PLe -tason vaatimukset.

5 Common DC bus

5.1 Common DC yleisesti

Taajuusmuuttajan pääpiiri koostuu tasasuuntaajasta, DC-välipiiristä sekä vaihtosuuntaajasta. Tasasuuntaaja muuttaa vaihtojännitteen ja -virran tasajännitteeksi ja -virraksi DC-välipiiriin. DC-välipiirissä kondensaattorit tasaavat rippelin ja tuottavat tasaisen energialähteen vaihtosuuntaajalle. Vaihtosuuntaaja muuttaa välipiirin tasajännitteen vaihtojännitteeksi moottorille. (9, s.12.)

Common DC -järjestelmä koostuu kahdesta tai useammasta taajuusmuuttajasta, joiden DC-välipiirit on liitetty yhteen. Tämä mahdollistaa energian vapaan liikkumisen taajuusmuuttajien välillä. Vähintään yhden taajuusmuuttajista on oltava kytkettynä syöttävään AC-verkkoon. (10, s.9.) Kuvassa 8 on esimerkki common DC -kytkennästä.



Kuva 8. Esimerkkikuva common DC -järjestelmästä, jossa 1 on AC-syöttölinja, 2 on common DC -piiri, 3 on taajuusmuuttaja, 4 on moottori ja 5 on jarruvastus (9, s.13).

DC-piirissä energia on koko ajan tasapainossa ja energiaa tulee ja menee piiristä saman verran, mukaan lukien DC-kondensaattoreiden varastoima pieni energiamäärä mikäli DC-jännite nousee tilapäisesti.

Taajuusmuuttajat common DC -järjestelmässä syöttävät moottoreita. Moottorit voivat toimia joko moottoreina, jolloin energia liikkuu DC-piiristä moottoriin päin, tai generaattoreina, jolloin energia liikkuu moottorista DC-piiriin (10, s.9). Moottori toimii generaattorina, kun jokin ulkoinen voima liikuttaa moottoria. Pitääkseen pyörimisliikkeen tasaisena moottori jarruttaa. Jarrutuksen aikana moottori tuottaa sähköä takaisin vaihtosuuntaajalle, joka muuntaa sen takaisin energiaksi DC-välipiiriin. (9. s.12.)

Moottorin toimiessa generaattorina vaihtosuuntaaja lataa DC-välipiirin kondensaattoreita ja välipiirin jännite alkaa nousta. Liiallisen jännitteen nousun välttämiseksi taajuusmuuttajan täytyy johtaa energia pois DC-välipiiristä. Energian pois johtamiseksi on kolme eri vaihtoehtoa: muuttaa energia takaisin vaihtojännitteeksi syöttävään verkkoon, johtaa energia jarruvastukselle tai johtaa energia toiselle taajuusmuuttajalle. Ensimmäinen vaihtoehto vaatii taajuusmuuttajan, jossa on verkkovaihtosuuntaaja. Tavallisessa taajuusmuuttajassa energian muuttaminen takaisin vaihtojännitteeksi ei ole mahdollista. Toinen vaihtoehto on liittää DC-välipiiriin jarrukatkoja ja jarruvastus. Jarruvastukselle johdettu energia poistuu vastukselta lämpönä. Huonona puolena tässä on se, että energia

menee täysin hukkaan. Kolmantena vaihtoehtona on yhdistää taajuusmuuttajan DC-välipiiri yhteen toisen taajuusmuuttajan välipiirin kanssa, jolloin ylimääräinen energia voidaan käyttää toisen taajuusmuuttajan DC-kondensaattoreiden lataamiseen ja moottorin pyörittämiseen. Tätä vaihtoehtoa kutsutaan common DC -järjestelmäksi. (9, s.12.)

Common DC -järjestelmällä on seuraavanlaisia etuja:

- Energiaa säästyy, kun muut taajuusmuuttajat hyödyntävät jarrutettaessa syntyvän energian. Syöttävästä verkosta tarvitaan vähemmän energiaa.
- Taajuusmuuttajien DC-kondensaattorit muodostavat energiavaraston, joka pystyy imemään itseensä lyhyiden jarrutuksien tuottaman energian ilman tarvetta ulkoiselle jarruvastukselle.
- Jos jarruvastuksia ja -katkoja tarvitaan, ne voidaan optimoida koko järjestelmälle eikä jokainen taajuusmuuttaja tarvitse omaa jarruvastusta.
- Kaikkia taajuusmuuttajia ei tarvitse yhdistää syöttävään AC-verkkoon. (9, s.14.)

5.2 Mitoitus

Common DC -järjestelmän mitoituksessa seurattiin taulukon 1 mukaista toimintamallia. (11, s.15.)

Taulukko 1. Common DC järjestelmän mitoitus.

Vaihe	Tehtävä	Toteutus
1.	Valitse moottorit ja taajuusmuuttajat	Moottorit valittiin olemassa olevien moottoreiden perusteella. Moottorit ovat teholuokiltaan samankokoisia. Kuormamoottorit ovat hieman isompia kuin kuormitettavat moottorit. Taajuusmuuttajat valittiin moottoreiden mukaan.
2.	Piirrä järjestelmän tehokäyrä/aika diagrammi	Tätä vaihetta ei tehty, sillä testikäytössä moottoreita ei ajeta millään tietyllä syklillä.
3.	Valitse syöttävän laitteen tyyppi ja kuinka hallita ylimääräinen jarrutusenergia	Syöttäväksi taajuusmuuttajaksi valittiin isoin taajuusmuuttaja, joka mitoitettiin riittävän suureksi syöttämään muita taajuusmuuttajia. Pienemmät taajuusmuuttajat yhdistettiin vain common DC piiriin. Kuorman taajuusmuuttajalla voidaan myös jarruttaa suoraan verkkoon, joten jarruvastuksia ei tarvita.
4.	Valitse sulakkeet	Syöttävän taajuusmuuttajan AC sulakkeet mitoitettiin 16 A kokoisiksi käyttökohteen sulakkeiden rajoitusten mukaan. DC piirin sulakkeet mitoitettiin 10 A kokoisiksi taajuusmuuttajien ottaman virran mukaan.
5.	Huomioi erikoistilanteet	Testilaitteistolla ei ole huomattavia erikoistilanteita. Moottorien kuormaa voidaan säätää halutulla tavalla.
6.	Huomioi mahdolliset vikatapaukset	Ei huomattavia vikatapauksia. Testauksien luonteen takia yhden taajuusmuuttajan vika ei aseta muita taajuusmuuttajia vikatilaan. STO painike on johdotettu siten, että kaikki taajuusmuuttajat pysähtyvät nappia painettaessa.
7.	Suunnittele yhtenäisyys ja turvallisuus	STO painike aktivoi kaikkien taajuusmuuttajien STO funktion.
8.	Toista kaikki vaiheet.	

AC-verkkoon liitettävää taajuusmuuttajaa valittaessa täytyi kiinnittää huomiota taajuusmuuttajan tasasuuntaajan tehokapasiteettiin, jotta sen teho riitti syöttämään kaikkia common DC-piiriin tulevia taajuusmuuttajia. Tehon tarpeen selvittämiseksi kaikille liitettäville taajuusmuuttajille ja moottoreille täytyi laskea DC-piiristä otettu kokonaisteho, joka koostui yhteenlasketuista tehoista moottorin teho, moottorin häviöt ja invertterin häviöt. Kokonaisteho P_{mot} saatiin laskettua kaavalla 1.

$$P_{mot} = k_{eff} * P_m \quad (1)$$

P_{mot} on moottorin ottama teho DC-piiristä, k_{eff} on moottorin hyötysuhde, P_m on moottorin akseliteho

P_m saadaan laskettua kaavalla 2.

$$P_m [kW] = \frac{T * n}{9550} \quad (2)$$

T on moottorin akselin momentti [Nm], n on moottorin nimellinopeus [rpm].

Kun kaikkien moottoreiden DC-piiristä ottama teho oli selvillä, ne summattiin yhteen ja niitä verrattiin AC-syöttöön liitetyn taajuusmuuttajan tasasuuntaajan tehokapasiteettiin, jolloin $P_{rec} > P_{mot}$. P_{rec} saatiin valmistajan manuaalista. P_m avulla saatiin myös laskettua kunkin taajuusmuuttajan tarvitsemat tasavirtapiiriin sulakkeet. Virta I_m saatiin laskettua kaavalla 3.

$$I_m = \frac{P_m}{\sqrt{3} * U_{ac} * 0.95} \quad (3)$$

I_m on moottorin virta ja U_{ac} on syöttävän AC-verkon jännite.

Sen jälkeen varmistettiin järjestelmän lataustehon riittävyys. Sitä varten laskettiin latausresistanssin riittävyys, jolloin rinnakkain liitettyjen taajuusmuuttajien kokonaisresistanssin täytyi olla enemmän, kuin syöttävän taajuusmuuttajan latauspiirin minimiresistanssi, eli $R_{tot} > R_{min}$. Kokonaisresistanssi saatiin laskettua kaavalla 4.

$$R_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_c}} \quad (4)$$

R_{tot} on latauspiirin kokonaisresistanssi, R_a on ensimmäisen taajuusmuuttajan latausresistanssi, R_b on toisen taajuusmuuttajan latausresistanssi ja R_c on kolmannen taajuusmuuttajan latausresistanssi.

Tämän jälkeen laskettiin latauksen aikainen huippuvirta, jotta tiedettiin, ettei virta ylitä muiden piirin komponenttien virrankestoisuutta. Latauksen aikainen huippuvirta laskettiin kaavalla 5.

$$I_{ac,peak} = \frac{\sqrt{2} * U_{ac}}{R_{tot}} \quad (5)$$

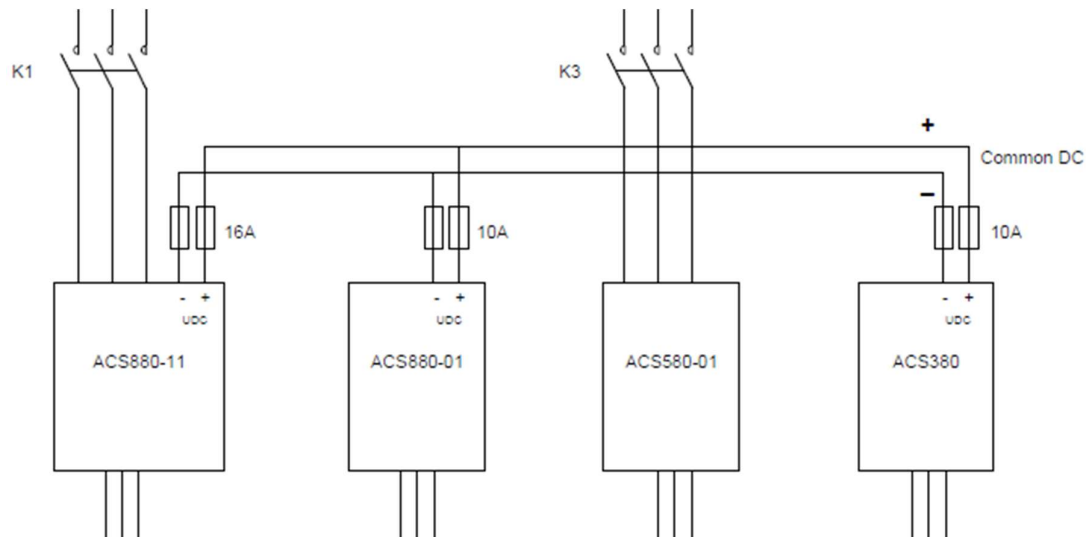
$I_{ac,peak}$ on huippuvirta AC-verkosta latauksen aikana, U_{ac} on AC-verkon jännite ja R_{tot} on latauspiirin kokonaisresistanssi.

Taajuusmuuttajien välipiirin sulakkeet mitoitettiin taulukon mukaan niiden verkosta otettavan virran mukaan, sillä moottorien jarrutuksesta syntyvä maksimiteho oli paljon pienempi, kuin taajuusmuuttajan maksimiteho.

6 Laitteiston suunnittelu

Laitteiston suunnittelu aloitettiin hahmottelemalla rakennetta ja etsimällä sopivaa runkoa, johon laitteisto voitaisiin rakentaa. Laitteiston runkona päädyttiin käyttämään vanhaa ACS880 testiräkkiä. Rakentaminen aloitettiin samoihin aikoihin kuin suunnittelu ja suuri osa suunnittelusta tapahtui samaan aikaan kun laitteistoa jo rakennettiin ja suunnitelma muuttui rakentamisen aikana. Laitteiston rakentamisessa päätettiin hyödyntää mahdollisimman paljon jo olemassa olevia materiaaleja.

Uuteen laitteistoon päätettiin sisällyttää tukitiimin keskeisimmät taajuusmuuttajat ACS880-01, ACS580-01 ja ACS380. Taajuusmuuttajia haluttiin myös pystyä kuormittamaan, joten laitteistoon lisättiin kuormalle taajuusmuuttajaksi ACS880-11 verkkovaihtosuuntaajalla. Verkkovaihtosuuntaajalla pystytään jarrutettaessa syntyvä energia syöttämään takaisin syöttävään sähköverkkoon. Samalla muiden taajuusmuuttajien syöttö päätettiin ottaa suoraan ACS880-11:n tasajännitevälipiiristä, jolloin jarrutuksessa syntynyt energia voitaisiin hyödyntää. Myöhemmin huomattiin, että ACS580:nen pienempiä runkokokoja ei pysty kytkemään suoraan tasajännitevälipiiriin, mutta sen keskeisen osan takia se päätettiin pitää laitteistossa ja sille päätettiin laittaa oma vaihtovirtasyöttö. Kuvassa 9 on osa päävirtakaaviosta (liite 2), jossa nähdään, kuinka taajuusmuuttajat kytetään.



Kuva 9. Taajuusmuuttajien suunniteltu kytkentä.

Vanhaan runkoon päätettiin lisätä toinen kytkentäkotelo takapuolelle. Kytkentäkoteloon sijoitettaisiin tasavirtasulakkeet ja se mitoitettiin riittävän isoksi, jotta sinne mahtuisi rivi-liittimiä mahdollisia muitakin laajennuksia varten.

Moottoreiksi laitteistoon päätettiin asentaa kaksi erillistä moottoriletkaa, joissa molemmissa olisi kuormakoneena kestopagneettimoottori. Toiseen letkaan kuormitettavaksi moottoriksi valittiin perinteinen induktimoottori ja toiseen SynRM-tahtireluktanssimoot-

tori. Jotta moottoreita pystyttiin ajamaan mahdollisimman monipuolisesti eri taajuusmuuttajilla, päätettiin moottorien syöttöjohtoihin laittaa pistoliitin, jolla moottori pystyttiin helposti vaihtamaan toiseen taajuusmuuttajaan.

Suunnittelussa huomioitiin myös turvallisuusseikat ja sähkömagneettinen yhteensopi- vuus. Moottorikaapelit valittiin ABB:n omien suositusten mukaisesti ja liittimissä otettiin huomioon suojausten jatkuvuus.

6.1 Taajuusmuuttajat

Laitteistoon valittiin neljä erilaista taajuusmuuttajaa, jotka näkyvät kuvassa 10. ACS880-11 ja ACS880-01 taajuusmuuttajat on suunniteltu teollisuuden tarpeisiin. ACS580-01:tä markkinoidaan vakiotajuusmuuttajana ja ACS380 on laiterakennukseen soveltuva taajuusmuuttaja.



Kuva 10. Työssä käytetyt taajuusmuuttajat vasemmalta oikealle: ACS880-11, ACS880-01, ACS580-01 ja ACS380.

Taajuusmuuttajista ACS880-01, ACS580-01 ja ACS380 mitoitettiin kaikki samankokoisiksi, sillä niillä kaikilla on tarkoitus ajaa samoja moottoreita. Taajuusmuuttajien koko määräytyi olemassa olevien moottoreiden mukaan. Kuormakoneen taajuusmuuttaja

ACS880-11 mitoitettiin siten, että se pystyisi syöttämään myös muita taajuusmuuttajia jännitevälipiirinsä kautta, mutta sitä silti pystyttäisiin syöttämään 16 A:n syötöllä.

Kuormakoneelle ACS880-11 otettiin käyttöön seuraavan listan mukaiset lähdöt/tulot. Ohjauspulpetin Drive 1 puoli varattiin kokonaan kuormakoneen käyttöön.

- AI1
- AI2
- DI1-6
- DIO1-6
- RO1-5

Analogitulo AI1 varattiin moottorin nopeussäädön potentiometrille, AI2 jätettiin vapaasti määriteltäväksi testien mukaan. Digitaalitulo DI1 varattiin moottorin käynnistyssignaalille ja DI2 moottorin suunnan valinnalle. DI3-6 ja DIO1-6 jätettiin vapaasti määriteltäviksi testien tarpeen mukaan. Relelähdöt RO1-5 varattiin merkkivaloille, jotka syttyvät releen toimiessa. Relelähtö RO1 määritettiin aktivoitumaan, kun taajuusmuuttaja on valmiina käymään, RO2 määritettiin aktivoitumaan, kun moottori käy ja RO3 aktivoituu taajuusmuuttajan vikatilanteessa. Relelähdöt RO4-5 jätettiin vapaasti määriteltäviksi.

Muille taajuusmuuttajille, ACS880-01, ACS580-01 ja ACS380, otettiin käyttöön seuraavan listan mukaiset lähdöt/tulot. Lähtöjen/tulojen rajattu määrä johtui olemassa olevan johdotuksen mahdollistamista kytkennöistä. Drive 2 puoli ohjauspulpetista varattiin näiden taajuusmuuttajien käyttöön.

- AI1
- DI1-3
- DIO1-2

Analogitulo AI1 varattiin moottorin nopeussäädön potentiometrille. Digitaalitulo DI1 varattiin moottorin käynnistyssignaalille ja DI2 moottorin suunnan valinnalle. DI3 jätettiin vapaasti määriteltäväksi testien tarpeen mukaan. Digitaalilähdöt/tulot DIO1-2 jätettiin vapaasti määriteltäviksi testien tarpeen mukaan.

6.2 Moottorit

Laitteistoon tuli neljä moottoria kahteen moottoriletkaan. Ensimmäiseen letkaan tuli induktiomoottori ja kuormamoottoriksi kestopagneettimoottori. Toiseen letkaan tuli SynRM-tahtireluktanssimoottori ja kuormamoottoriksi samanlainen kestopagneettimoottori kuin ensimmäisessäkin. Moottoriletkassa moottoreiden väliin tuli sähkömagneettilla toimiva kytkin, jolla moottorien akselit saatiin lukittua toisiinsa syöttämällä sille 24 V:n jännite. Kestopagneettimoottoreissa ja induktiomoottorissa oli sisään rakennettu levyjarru, joka avautui syöttämällä sille 24 V:n jännitteen. Kestopagneettimoottoreissa käytettiin takaisinkytkentä resolveria. Induktio- ja SynRM-moottoreihin suunniteltiin käytettäväksi pulssienkooderia, mutta signaalin jakamisen hankaluuden takia ne päätettiin jättää pois.

6.3 Päävirtapiiri

Laitteiston suunnittelu aloitettiin hahmottelemalla päävirtakaavio. Päävirtakaaviosta nähdään päävirtapiiri, jonka jännite on 400/230V. Päävirtakaaviossa on esitetty pääkytkin, syötön sulakkeet, pääkontaktorit, taajuusmuuttajat, jännitevälipiirin sulakkeet, moottorit ja moottoreiden pistokkeet. Laitteiston syöttö tulee 16 A:n 3-vaihepistorasiasta, sillä tiloissa joissa laitetta on suunniteltu käytettäväksi, ei ole suuremmilla sulakkeilla varustettuja pistorasioita. Syöttävän pistorasia on vikavirtasuojattu.

ACS880-11 ja ACS580-01 taajuusmuuttajille tuli omat sulakkeet sekä pääkontaktorit. ACS880-01 ja ACS380 taajuusmuuttajien syöttö otettiin kuormakone ACS880-11 välijännitepiiristä joten ne olivat saman pääsulakkeen takana ja niiden eteen tuli kummallekin omat tasavirtasulakkeet. Taajuusmuuttajien ja moottorien väliin tuleviin moottorikaapeleihin tuli pistokkeet, joilla moottoreita voidaan jännitteettömänä vaihtaa eri taajuusmuuttajien ohjaukseen. Päävirtapuolelle tuli myös kaksi virtalähdettä, joista saatiin ohjausjännitepuolelle 24 V:n jännite. Päävirtapuolelle tuli myös merkkivalo laitteiston rungossa, joka palaa aina, kun laitteistossa on jännitteet kytkettyinä.

6.4 Ohjausvirtapiiri

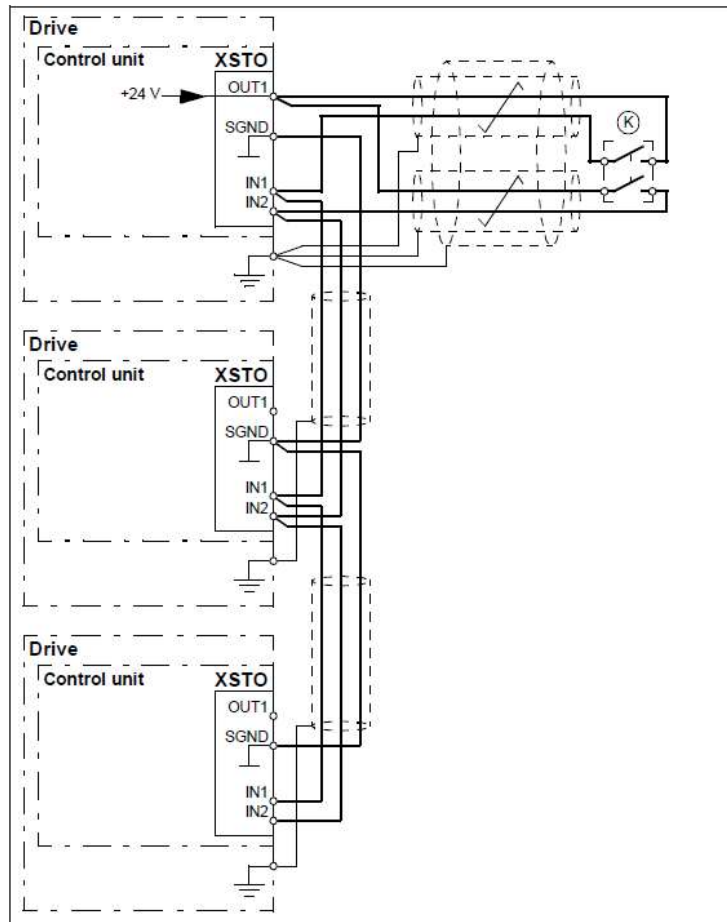
Ohjausvirtapiirissä hyödynnettiin mahdollisimman paljon vanhan laitteiston valmiita kytkentöjä. Laitteiston ohjaaminen tapahtui ohjauspulpetista, jossa sijaitivat kaikki käyttökytkimet. Ohjauspulpettiin ei juurikaan tehty muutoksia lukuun ottamatta joidenkin tarpeettomien laitteiden poistamista. Kytkeälaatikon sisällä muutoksia tehtiin poistamalla paljon vanhoja johtimia ja korvaamalla niitä uusilla.

Ohjausvirtapiiriin keskeisimpiä ominaisuuksia olivat käyttöturvallisuuteen liittyvät ominaisuudet. Näitä olivat syötön pääkontaktorin manuaalinen kytkentä omalla kytkimellään ja moottorin jarrun manuaalinen poiskytkentä. Taajuusmuuttaja ei saa käyntilupaa ennen kuin pääkontaktorin apukontaktorilta tulee lupasignaali.

Ohjausvirtapiiriin kuului myös ohjauspulpetista ohjattavat moottorien jarrut sekä moottoriletkojen magneettikytkimien ohjaus.

6.5 Turvallisuuspiiri

Laitteen turvallisuuspiirinä toimi STO-piiri. STO-piirissä oleva kytkin toimii hätäpysäytyspainikkeena ja moottorin ollessa pysähtyneenä se estää moottorin käynnistämisen. Painike jää pohjaan kun sitä painetaan ja se täytyy vapauttaa kiertämällä sitä myötäpäivään. Painettaessa kytkin avaa STO-piirin, jolloin STO-funktio aktivoituu. STO-piiri johdotettiin kaikille taajuusmuuttajille yhteiseksi, eli yhdellä painikkeella saadaan pysäytettyä kaikki taajuusmuuttajat. Piirin syöttäväksi tehonlähteeksi valittiin ACS880-11 sisäinen tehonlähde liittimestä XSTO OUT1. Tämä myös edellyttää sitä, että kuormakone ACS880-11 on aina päällä, tai mikään taajuusmuuttajista ei toimi, ei edes ACS580, jolla on oma AC-syöttö. Kuvassa 11 nähdään johdotusperiaate.



Kuva 11. Useamman taajuusmuuttajan STO-kytkentä sisäisellä tehonsyötöllä (12, s.264).

7 Laitteiston rakentaminen ja parametointi

7.1 Rakentaminen

Laitteiston rakentaminen aloitettiin heti, kun sopiva runko oli löytynyt. Rakentaminen alkoi vanhaan ACS880 -testilaitteistoon tutustumalla ja purkamalla siitä vanhat taajuusmuuttajat pois. Vanhat johdotukset merkittiin purkamisen yhteydessä, jotta myöhemmin niiden selvittäminen olisi helpompaa.

Purkamisen yhteydessä kerättiin lista tavaroista mitä tarvitaan, mitä löytyy ABB:lta ja mitä pitäisi tilata. Ensimmäiseen tilaukseen sisältyivät uusi kytkentäkotelo laajennuksia

varten ja korotusreuna kotelolle, kahvasulakkeen pohjia tasavirtasulakkeita varten, liittimet moottorikaapeleille sekä EMC-suojatut vedonpoistoholkit liittimiin. Tilauksen saavuttua huomattiin, että kytkentäkotelon pohjalevy olisi pitänyt tilata erikseen. Pohjalevy tilattiin pikimmiten, jotta kotelon kalustaminen voitiin aloittaa.

Kun vanhat taajuusmuuttajat oli saatu purettua, aloitettiin kytkentäkotelon kasaaminen tasavirtasulakkeita varten. Kytkentäkotelon sisälle laitettiin tasajännitesulakkeet, joilla ACS880-01 ja ACS380 yhdistettiin kuormakoneen ACS880-11:n tasajännitevälipiiriin. Koteloon laitettiin myös ylimääräiset sulakkeet valmiiksi, mikäli joskus tulevaisuudessa halutaan tehdä muutoksia. Sulakkeiden lisäksi koteloon laitettiin kaksi DIN-kiskoa ja niihin riviliittimiä uusia kytkentöjä varten, mikäli niitä ei vanhassa kotelossa mahduttaisi tekemään. Kiskoille jätettiin paljon laajennusvaraa. Kotelo rakennettiin valmiiksi pöydällä, ennen kuin se kiinnitettiin laitteiston runkoon. Koteloa ei kiinnitetty suoraan laitteiston takaseinään, vaan se korotettiin hieman seinästä ylös jotta kotelon takapuolelta mahtuu vetämään johtoja putkessa siististi. Uuden ja vanhan kotelon välille laitettiin putket, joita pitkin johdotukset saatiin siististi tehtyä.

Kotelon asennuksen jälkeen kiinnitettiin taajuusmuuttajat laitteiston etupuolelle. Kiinnitysvaiheessa otettiin huomioon jokaisen taajuusmuuttajan tarvitsema tila ympärilleen tehokkaan ilmanvaihdon saavuttamiseksi. Taajuusmuuttajat päätettiin kiinnittää järjestykseen fyysisen kokonsa mukaan järjestyksessä vasemmalta oikealle: ACS880-11, ACS880-01, ACS580-01 ja ACS380-04. ACS380:lle tehtiin kytkentäosan päälle läpinäkyvästä muovista lisäsuoja parantamaan suojausta mekaaniselta kosketukselta sen avonaisen rakenteen takia.

Taajuusmuuttajille tulevia johdotuksia varten päätettiin asentaa putket asennuksen siistimmän ulkonäön ja kaapelien lisäsuojan takia. Putkituksissa kytkentäkoteloilta taajuusmuuttajille pyrittiin hyödyntämään mahdollisimman paljon runkolevyssä ja kotelon pohjassa olevia vanhoja reikiä. Kullekin taajuusmuuttajalle tuli kaksi putkea. Toinen putki meni suoraan kytkentäkotelolle ja toinen ohjauspulpettiin. Ohjauspulpetin alapintaan asennettiin moottorikaapeleiden kiinteät pistokkeet kunkin taajuusmuuttajan kohdalle. Kaapelointien selkeydyttyä tilattiin ohjauskaapelit. Moottorikaapelit saatiin aikaisemmin toista projektia varten hankitulta kaapelikelalta.

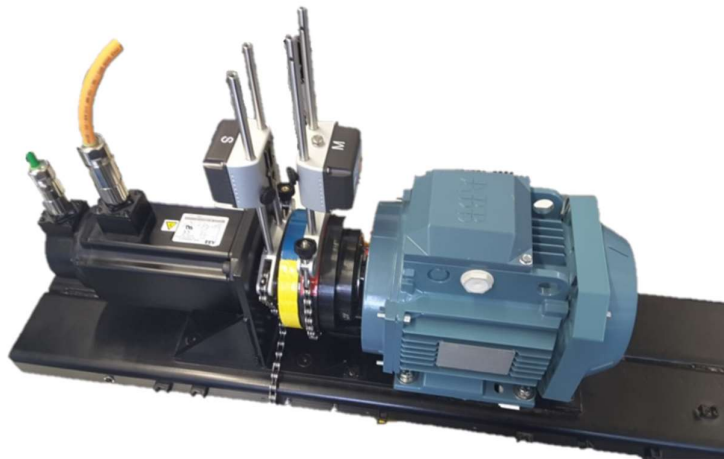
Kun johtoreitit olivat selvillä ja putkitukset paikoillaan, aloitettiin kaapelointi. Ensimmäisenä kaapeloitiin taajuusmuuttajien syöttöjohdot. Kuormakoneen ACS880-11 syötön johtimen halkaisija oli 2,5 mm². ACS880-01 ja ACS380 taajuusmuuttajien DC-syötöt johdotettiin myös 2,5 mm²:n johtimilla ohjauspulpetin kautta kulkevaa putkea pitkin. ACS580-01 johdotettiin omalla 1,5 mm²:n syöttökaapelilla. Syöttöjohtojen jälkeen kaapeloitiin moottoreiden pistokkeille lähtevät kaapelit. Kaapelina käytettiin häiriösuojattua 4 x 1,5 S -kaapelia. Häiriösuoja kytkettiin jatkumaan liittimen läpi.

Kun taajuusmuuttajien syötöt oli kaapeloitu, kaapeloitiin STO-piiri. Kaapelointiin käytettiin neljäjohtimista ohjauskaapelia, joka hankittiin ABB:n tuotannon puolelta. ACS880-11 kaapeloitiin ensin kytkentäkotelolle, josta oli valmis kaapelointi hätäpysäytyspainikkeelle. Sitten piiri ketjutettiin muille taajuusmuuttajille järjestyksessä ACS880-01, ACS580-01 ja ACS380. STO-piiri kaapeloitiin putkea pitkin kytkentäkotelon kautta.

STO-piirin jälkeen kaapeloitiin ohjauskaapelointi. Koska ohjauspulpetissa oli vain kahdet käyttöpainikkeet, joista Drive 1 puoli oli varattu kuormakoneelle ACS880-11, muiden taajuusmuuttajien piti jakaa Drive 2 puoli ohjauspulpetista. Päätettiin hyödyntää kytkentäkotelon kyljessä valmiiksi olevia kytkentäpistokkeita. Pistokkeella pystyttiin valitsemaan, mitä taajuusmuuttajaa Drive 2 puolen käyttöpainikkeilla ohjataan. Kytkenät suoritettiin lisätyssä kytkentäkotelossa. Kytkentäpistokkeiden liittimet johdotettiin koteloon riviliittimille, josta ne jatkettiin 14x0,5 -ohjauskaapelilla taajuusmuuttajille. Ohjauskaapeleihin jätettiin ylimääräisiä johtimia mahdollisia lisäyksiä varten. Drive 1 puoli kaapeloitiin 24x0,5 -ohjauskaapelilla, sillä sille otettiin käyttöön paljon enemmän tuloja ja lähtöjä. Kuormamoottorin resolveri kaapeloitiin valmiilla laitekaapelilla moottorilta ACS880-11:lle. Valmiin laitekaapelin asentaminen putkeen muiden ohjauskaapeleiden kanssa osoittautui vaikeaksi ja kaapelin valmiita liittimiä jouduttiin purkamaan putkesta läpi vetämisen ajaksi. Laitekaapeli kytkettiin taajuusmuuttajan lisäoptioon FEN-21.

Kaapelointien jälkeen saatiin hankittua toinen moottoriletka, jossa oli identtinen tasavirtamoottori, kuin toisessakin letkassa. Letkaan vaihdettiin induktiomootorin tilalle SynRM-moottori. Sähköinen kytkin irrotettiin vanhasta moottorista ja se kiinnitettiin SynRM-mootorin akselille. Letkan tasavirtamoottori kiristettiin kiinteästi moottoripedille, jonka päällä letka lepäsi. Sitten SynRM-moottori asetettiin silmämääräisesti linjaan tasavirtamoottorin kanssa. Lopullinen moottoriletkan linjaaminen tehtiin SKF TKSA 51 Shaft

alignment tool -moottorin linjaus työkalulla. Työkalu toimi tabletilla mobiilisovelluksella. Kaksi anturia, jotka kiinnitettiin linjattavien moottorien akseleille, oli yhdistetty tablettiin bluetoothilla. Anturit linjattiin kohdakkain laserin avulla ja moottorien akselit lukittiin yhteen magneettikytkimellä. Kuvassa 12 nähdään tämä käytännössä. Sovellukseen syötettiin letkan mitat, joita olivat anturien etäisyys magneettikytkyn keskikohdasta, linjattavan moottorin etummaisten kiinnityspulttien etäisyys sen akselin anturista, sekä moottorin etummaisten ja taaempien kiinnityspulttien etäisyys toisistaan. Tabletin sovelluksesta näki, milloin anturien linjaus oli kohdallaan. Anturien linjaamisen jälkeen aloitettiin letkan linjaaminen. Sovellus ohjeisti hyvin linjaamisen vaiheittain. Akseliilta otettiin kolme mittausta eri asennoista 90 asteen kulman välein. Mittausten jälkeen sovellus kertoi mistä kulumista moottoria täytyy nostaa tai laskea ja kuinka paljon. Linjaaminen olisi voinut käyttää ohuita moottorin jalkojen alle laitettavia metallilevyjä apuna, mutta levyt olivat hävinneet. Sen takia mittauksia ja säätöjä täytyi toistaa useamman kerran, ennen kuin moottoriletka saatiin linjattua. Onnistuneen linjauksen jälkeen sovelluksella tehtiin raportti linjauksesta. Raportti on liitetty liitteeksi työn loppuun (liite 3).



Kuva 12. Moottorinlinjauslaserit moottoreiden akseleille kiinnitettynä.

Moottoriletkan linjaamisen jälkeen letka kiinnitettiin testilaitteistoon. Letkan pedin alle laitettiin kumiset jalat värinän vähentämiseksi. Letkan magneettikytkimelle kaapeloitiin 24 V:n syöttö, joka liitettiin toisen letkan magneettikytkimen rinnalle. Seuraavaksi kaapeloitiin syöttökaapelit induktio- ja SynRM-moottoreille. Kaapelina käytettiin häiriösuojattua

4x1,5S -moottorikaapelia. Kaapelien toiseen päähän tuli pistoliittimet, jotka pystyi yhdistämään aiemmin asennettuihin pistokkeisiin ohjauspulpetin alapinnassa. Moottorin päässä läpivienteihin kytkentäkoteloon laitettiin 360° maadoittavat vedonpoistoholkit ja kaapelin suojaava vaippa kierrettiin yhdeksi johtimeksi ja päätettiin maadoitusliittimeen. Moottorikaapelit kiinnitettiin ohjauspulpetin alapuolelle tukevasti kiinni.

Laitteistoon lisättiin maadoitusjohdin lisätylle moottoriletkalle ja taajuusmuuttajien lähtöjen ja tulojen kytkentöihin tehtiin pieniä muutoksia. Laitteiston rakentaminen alkoi olla valmis, joten tasajännitesulakkeet pistettiin kiinni ja laite kytkettiin ensimmäistä kertaa syöttöön kiinni. Taajuusmuuttajat käynnistyivät normaalisti, mutta ohjausvirtapuolella havaittiin ongelmia 24 V:n virtalähteiden jännitteen pudotessa ohjauksia käytettäessä. Syyksi paljastui lopulta laboratorion kelluva sähköverkko, josta puuttui kokonaan nollajohdin. Laitteisto siirrettiin toiseen laboratorioon, jossa syötössä oli myös nollajohdin. Laboratoriossa, jossa syötössä oli myös vikavirtasuojaja, huomattiin, että ACS580 EMC -suodin jouduttiin irrottamaan, sillä vikavirtasuojat eivät pysyneet päällä. ABB ei suosittele vikavirtasuojauksen käyttämistä taajuusmuuttajien syötöissä normaalissa käytössä, mutta laboratorio-olosuhteissa vikavirtasuojat ovat pakollisia. Rakentamisen valmistuttua aloitettiin laitteiston ohjelmistopuolen päivittäminen ja parametointi. Kuvassa 13 nähdään valmis testilaitteisto. Vasemmalla laitteisto on kuvattu edestäpäin ja kuvassa nähdään taajuusmuuttajat ja ohjauspulpetin painikkeet. Oikealla kuvassa on laitteisto takaapäin kuvattuna ja kuvassa nähdään kytkentäkotelot, jossa kytkennät on tehty. Alemman kotelon kyljessä nähdään myös valintapistokkeet, joilla voidaan valita, minkä taajuusmuuttajan ohjaus tulee ohjauspulpetin painikkeille.



Kuva 13. Valmis laitteisto etu- ja takapuolelta.

7.2 Parametrien asettaminen

Rakentamisen valmistuttua ensimmäisenä aloitettiin taajuusmuuttajien ohjelmistojen päivittäminen. Kaikkiin taajuusmuuttajiin päivitettiin viimeisin ohjelmisto. Päivittäminen tehtiin Drive Loader 2.4 -ohjelmalla. Lisäksi ACS880-11 ja ACS880-01 taajuusmuuttajille tilattiin tehtaalta uudet käyttöpaneelit, sillä vanhat olivat kadonneet. Kun taajuusmuuttajien laiteohjelmistot olivat ajan tasalla, aloitettiin taajuusmuuttajien parametointi.

Parametointi tehtiin Drive Composer 2.4 -ohjelmalla. Taajuusmuuttajille asetettiin moottorien parametrit sekä parametroidiin moottoreiden asettamat rajoitukset, esimerkiksi asetettiin esto moottorin nimellinopeuden ylittämiseksi. Moottoriparametrien asettamisen jälkeen ajettiin ID-ajo, joka pyörittää moottoria ja asettaa moottorille moottorinsäätöarvot. Kuormitettaville taajuusmuuttajille ACS880-01, ACS580-01 ja ACS380 asetettiin

user set -parametrin avulla sekä induktiomoottorin että SynRM-moottorin arvot ja molemmille ajettiin ID-ajo. Näillä taajuusmuuttajilla voidaan valita, kumman moottorin parametreja käytetään. Parametrien vaihto tapahtuu user set -parametria muuttamalla. Kaikilla taajuusmuuttajilla induktiomoottori asetettiin user set 1 -paikkaan ja SynRM-moottori user set2 -paikkaan.

Moottoriparametrien ja ID-ajojen jälkeen asetettiin alustavat asetukset tuloille ja lähdöille. Moottorin käynnistysignaali asetettiin digitaalituloon DI1 ja pyörimissuunta digitaalituloon DI2. Moottorin nopeussäätö asetettiin analogituloon AI1 säädettäväksi potentiometrin jännitesignaalilla. Muita tuloja ja lähtöjä ei vielä määritelty ja ne voidaan asettaa kunkin suoritettavan testin tarpeiden mukaan.

8 Yhteenveto

Insinööriyön tavoitteena oli suunnitella ja rakentaa testilaitteisto ABB Oy:n Drives-yksikön taajuusmuuttajien teknisen tuen käyttöön. Laitteiston tarkoituksena oli toimia apuna teknisen tuen toiminnassa asiakkaiden ongelmien toistamisessa sekä ratkaisussa. Laitteistoon oli tarkoitus sisällyttää teknisen tuen yleisimmät taajuusmuuttajat. Laitteiston rakentamisella oli myös tarkoitus säästää laboratoriotilaa sisällyttämällä useampia taajuusmuuttajia ja moottoreita samaan laitteistoon.

Työn lopputuloksena saatiin toimiva kompakti testilaitteisto, jolla voidaan testata ja verrata erilaisten moottorien käyttäytymistä erilaisilla taajuusmuuttajilla. Erona aikaisempiin testilaitteisiin oli se, että laitteisto sisälsi useampia erilaisia moottoreita ja taajuusmuuttajia samassa laitteistossa. Tällä tavoin saavutettiin laboratoriotilan säästöä. Laitteistolla pystyttiin myös kuormittamaan moottoreita melko tarkalla säädöllä.

Työn alussa esiteltiin taajuusmuuttaja laitteena, jonka jälkeen tarkasteltiin vastaavanlaisen laitteiston suunnittelua ja rakentamista sähkö- ja toiminnallisen turvallisuuden kannalta ja tutustuttiin oleellisiin standardeihin ja direktiiveihin. Tämän jälkeen perehdyttiin common DC -järjestelmään ja sen mitoitukseen ja työn lopussa käytiin läpi laitteiston suunnittelu ja rakentaminen sekä valmiin laitteiston parametointi.

Laitteistosta tuli hyvin pitkälti alkuperäisen suunnitelman mukainen, mutta joitakin laitteiston toiminnan kannalta vähemmän välttämättömiä ominaisuuksia jouduttiin karsimaan, sillä niiden toteuttaminen olisi ollut liian aikaa vievää ja monimutkaista. Laitetta olisi voitu parantaa vaihtamalla uudet johdot taajuusmuuttajien lähtöjen ja tulojen pistokkeille, jolloin olisi ollut mahdollista käyttää taajuusmuuttajien kaikkia lähtöjä ja tuloja. Työn aikana asetettujen välietappien aikataulu kuitenkin piti hyvin ja työ valmistui ajallaan.

Laitteistosta pyrittiin tekemään mahdollisimman turvallinen käyttää ja siinä onnistuttiin todella hyvin. Laitteiston kaikki liikkuvat ja sähköiset osat on kosketussuojattu ja metallirungot maadoitettu. Laitteistolle tuli vielä toinen erillinen maadoitusjohdin syöttöpistokkeen maadoitusjohtimen lisäksi. Erillinen maadoitusjohdin kytketään laboratorion potentiaalintasauskiskoon.

Insinööriyöstä rajattiin ulos laitteiston sähkökuvien ja laitteiston lopullisen käyttöohjeen tekeminen. Sähkökuvat ja käyttöohjeet tullaan kuitenkin tekemään työn palauttamisen jälkeen, sillä on mahdollista, että samanlaisia laitteita tullaan tulevaisuudessa rakentamaan tarpeen mukaan lisää.

Lähteet

- 1 Taajuusmuuttajat. Verkkoaineisto. SähköNet <<https://blogit.gradia.fi/sahkonet/sahko-ja-automaatioasennukset/oppimistehtavat/teollisuuden-sahkoasennukset/moottori-kaytot/taajuusmuuttajat/>>. Luettu 7.10.2019.
- 2 Niiranen, Jouko. 1999. Sähkomoottorikäytön digitaalinen ohjaus. Helsinki: Otatieto
- 3 Hietalahti, Lauri. 2011. Tehoelektroniikan perusteet. Amk-Kustannus Oy: Tammertekniikka
- 4 SFS 6002 käytännössä. 2016. Espoo: Sähköinfo Oy
- 5 Sähköturvallisuuslaki 1135/2016. 2016. Verkkoaineisto. Finlex. <<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20161135>>. Luettu 9.9.2019.
- 6 Technical Guidebook Rev1. 2014. Verkkoaineisto. ABB Drives. <https://library.e.abb.com/public/61e5d147bd6f436d96559fa456a710cc/TechnicalGuide-Book_EN_3AFE64514482_Rev1.pdf>. Luettu 26.8.2019.
- 7 Standardi SFS 6000-4-44:2017. 2017. Sesko Ry.
- 8 Standardi SFS-EN 50191 Sähköisten testauslaitteistojen asennus ja käyttö. 2011. Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- 9 Application guide, ACS880-01 drives and ACS880-04 drive modules Common DC systems. 2014. Verkkoaineisto. ABB Drives. <https://www.convertingsystems.com/uploads/2/6/8/5/26859557/acs880_common_dc_bus.pdf>. Luettu 2.9.2019.
- 10 Application guide, ACS355 Common DC. 2010. Verkkoaineisto. ABB Drives. <https://library.e.abb.com/public/21c4fab1813be5cec12579f700381f5a/en_acs355_common_dc_application_guide_a.pdf>. Luettu 2.9.2019.

- 11 Application guide, Common DC system for ACS380 drives. 2016. Verkkoaineisto. ABB Drives. <https://library.e.abb.com/public/af93bcc0c05c472ca10c128c23765f97/EN_ACS380%20common%20DC%20application%20guide_A.pdf>. Luettu 2.9.2019.
- 12 ACS880-01 Drives Hardware manual. 2019 Verkkoaineisto. ABB Drives. <https://library.e.abb.com/public/a7aaf7a6a16846d3afaddf7f8dd7a473/EN_ACS880-01_HW_rev_N_A5_screenres.pdf>. Luettu 27.9.2019.

SIL- ja PL -turvallisuustasojen raportti

1 Project information

1.1 Tool mode

Safety zones: Not applied

Tool language: English

1.2 Project data

Project name: ACSX80 DEMO RACK PL

Project description: Calculating Performance Level for ACSX80 DEMO RACK

Project version: 000.000.001

Authors: Eero Levo Approvers:

Created date: 10/30/2019

Modified date: 10/30/2019

Project standard: ISO 13894-1

2 Safety functions overview

2.1 Safety functions and data 2.1.1 STO

Description	
Hazard to mitigate	Rotating motor shaft
Triggering event	Removal of covers and misuse of demo rack
Response time	Instant from STO trigger
Safe state	Torque removed from shaft
Target performance level	a
Risk parameters	
Severity of injury (S) Frequency and/or exposure to hazard (F) Possibility of avoiding hazard or limiting harm (P)	S1 Slight (normally reversible injury) F1 Seldom-to-less-often and/or exposure time is short P1 Possible under specific conditions
Achieved performance level	e
Achieved PFH _D	3.14E-9 1/h

1 Project information

1.1 Tool mode

Safety zones: Not applied

Tool language: English

1.2 Project data

Project name: ACSX80 DEMO RACK SIL

Project description: Calculating Safety Integrity Level for ACSX80 DEMO RACK

Project version: 000.000.001

Authors: Eero Levo Approvers:

Created date: 10/30/2019

Modified date: 10/30/2019

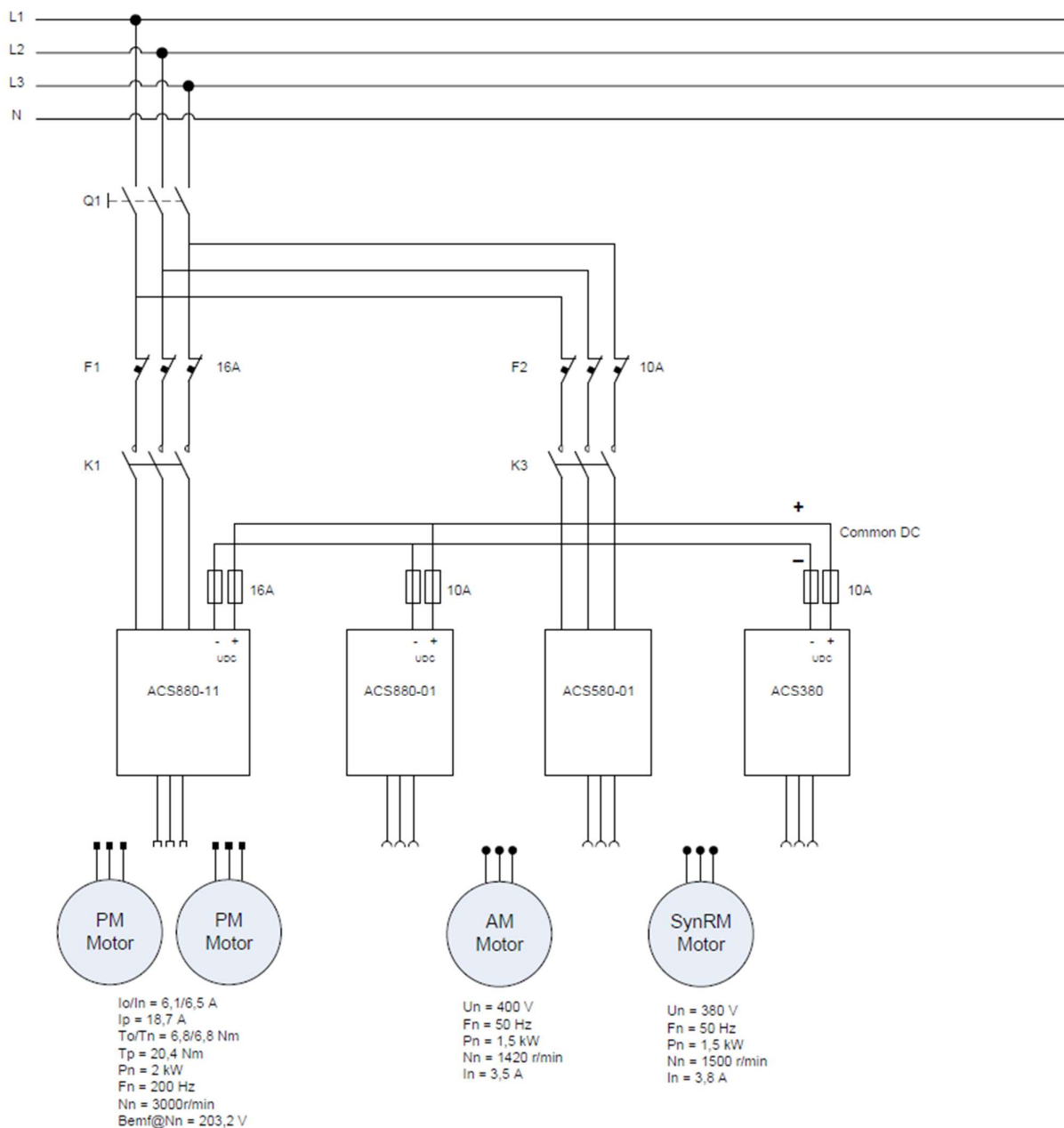
Project standard: IEC 62061

2 Safety functions overview

2.1 Safety functions and data 2.1.1 STO

Description	
Hazard to mitigate	Rotating motor shaft
Triggering event	Removal of covers and misuse of demo rack
Response time	Instant from STO trigger
Safe state	Torque removed from shaft
Target SIL	SIL1
Risk parameters	
1) Severity of injury (S)	3: Irreversible: broken limb(s), losing a finger(s)
2a) Duration of exposure < 10 min	Yes
2b) Frequency and duration of exposure	1: <1 per year
Probability of occurrence of hazardous event	1: Negligible
Probability of avoiding or limiting harm	1: Probable
Achieved SIL	SIL3
Achieved PFH _D	3.14E-9 1/h

Päävirtakaavio



Moottoriletkan linjaus raportti

Shaft Alignment Report
Horizontal
SynRM letka



Machine ID: Date: 30.8.2019 10.47

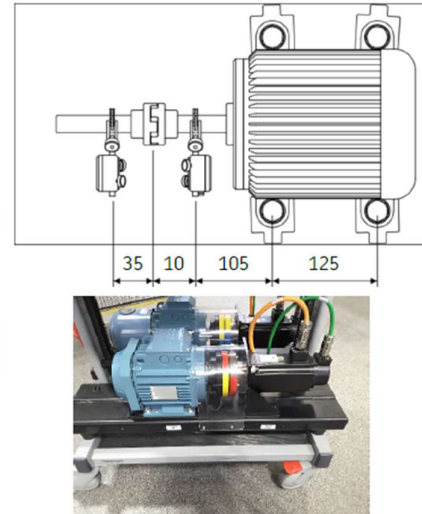
Company: ABB Oy Drives Operator: Eero Levo

Notes:

Speed (rpm)	Offset (mm)	Angular Error (mm/100)
1000-2000	0,10	0,08

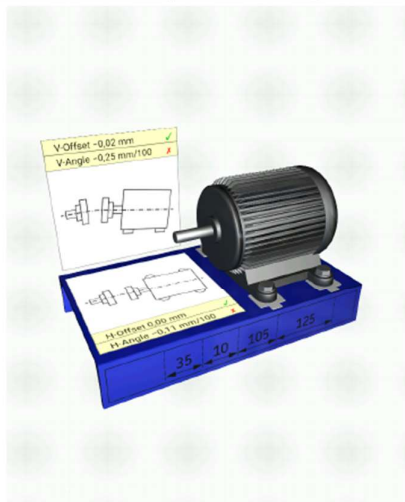
	Vertical	Horizontal
Offset (mm)	-	-
Angle (mm/100)	-	-

Stationary Unit (S):
Movable Unit (M):
Soft Foot Check Performed: No



Result

As Found	Vertical	Horizontal	As Corrected	Vertical	Horizontal
Offset (mm)	-0,02	0,00	Offset (mm)	-0,01	0,01
Angle (mm/100)	-0,25	-0,11	Angle (mm/100)	-0,03	-0,05
Front Feet (mm)	-0,30	-0,12	Front Feet (mm)	-0,04	-0,04
Rear Feet (mm)	-0,61	-0,26	Rear Feet (mm)	-0,07	-0,10



Signature: _____ Date: 29.9.2019