

Metropolia Ammattikorkeakoulu  
Automaatiotekniikan koulutusohjelma

**Tero Wendelin**

**Monimoottorikäytön testausympäristön rakennus ja käyttöönotto**

Insinööri työ 24.5.2010

Ohjaaja: CEO Pekka Ilmaranta  
Ohjaava opettaja: lehtori Kai Virta

Tekijä Otsikko	Tero Wendelin Monimoottorikäytön testausympäristön rakennus ja käyttöönotto
Sivumäärä Aika	39 sivua 10.5.2010
Koulutusohjelma	automaatiotekniikka
Tutkinto	insinööri (AMK)
Ohjaaja Ohjaava opettaja	CEO Pekka Ilmaranta lehtori Kai Virta
<p>Insinööri­työssä suunniteltiin ja rakennettiin testauslaitteisto, jossa taajuusmuuttajalla ohjattiin kolmea erillistä moottoria. Yleensä taajuusmuuttajat on tarkoitettu yhden moottorin ohjaamiseen. Testauslaitteiston avulla selvitettiin alustavasti taajuusmuuttajan mahdollisuudet ohjata kolmea erillistä moottoria, joita kytkettiin kontaktoreiden ja kytkimien avulla edestakaisin verkosta taajuusmuuttajalle. Alustavilla selvityksillä ja mittauksilla varmistettaisiin testauslaitteiston käyttäminen tulevaisuudessa erilaisissa käytännön sovelluksissa. Laitteiston testauksessa saatavia tuloksia hyödynnetään myöhemmin selvittäessä toimivan kokonaisuuden mahdollista kaupallistamista ja patentoimista.</p> <p>Testauslaitteiston toimivuuden selvittämiseksi moottoreita ajettiin vuorotellen taajuusmuuttajan ja verkon välillä, jolloin mitattiin taajuusmuuttajan syöttämä kokonaisvirta sekä jokaisen yksittäisen moottorin kuluttama virta. Lisäksi seurattiin taajuusmuuttajaa ja sen ilmoittamia häilytyksiä, joita analysoimalla parannettiin laitteiston toimintavarmuutta.</p> <p>Mittauksissa havaittiin ongelmia kytkettäessä moottoreita verkosta taajuusmuuttajalle. Tällöin syntyi virtapiikkejä taajuusmuuttajan syöttämään lähtöön, jonka taajuusmuuttajan turvatoiminnot pysäyttivät. Turvatoiminnot antoivat vikakoodeja, joita analysoimalla taajuusmuuttajan asetuksiin tehtiin muutoksia ja saatiin laitteiston toimintaa parannettua.</p> <p>Mittauksissa todettiin, ettei laitteisto ainakaan nykyisellään ole toimintakykyinen ja käytettävissä käytännössä. Myöhemmin laitteistolla tehdään lisää testauksia ja kokeillaan erilaisia tapoja parantaa toimintakykyä. Näitä tapoja ovat mm. jarrutusvastuksen lisääminen käynnistysvirtojen alentamiseksi sekä kytkentään asennettava veto- ja päästöhidastus. Tässä työssä saatuja kokemuksia käytetään hyväksi laitteiston kehitystyössä, jota jatketaan Enercomp Oy:n ja GE:n toimesta.</p>	
Hakusanat	taajuusmuuttaja, monimoottorikäyttö, moottorinohjaus, virtapiikki

Author Title	Tero Wendelin Building and implementing a multimotor testing application
Number of Pages Date	39 pages 10 May 2010
Degree Program	Automation Technology
Degree	Bachelor of Engineering
Instructor Supervisor	Pekka Ilmaranta, CEO Kai Virta, Principal Lecturer
<p>The aim of this Bachelor's thesis was to design and construct a test environment for a frequency converter application. The drive was supposed to control three motors. Usually frequency converter drives are intended for controlling one motor. The test environment was used to study how the drive can control three motors. Observations and measurements were made to find out the application's ability to operate in practice. The results received will be used later to determine whether the application can be commercialized and patented.</p> <p>Total current from the drive and the current of each motor were measured. The alarms were also monitored from the drive. They were used to explore the reliability of the drive.</p> <p>Measurements revealed problems. When the drive was connected to the motors, current surges were generated. They caused the drive to stop. The safety functions also provided fault codes. They were analyzed and the drive configurations were changed.</p> <p>The measurement results showed that the drive application does not work in the way it was supposed to. The current surges were the main problem and they need to be analyzed further. One improvement suggestion would be adding a breaking resistor to decrease current surges. The results of this thesis will be used in the further development of the application by Enercomp OY and GE Oy.</p>	
Keywords	drive, multimotorcontrol, motor control, current surge, frequency converter



# Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

1 Johdanto	6
2 Testausympäristön toteutus	7
2.1 Tarkoitus	7
2.2 Laitteiston toimintaperiaate	7
2.3 Vaatimukset	8
2.4 Suunnittelu	8
2.5 Rakennus	10
2.6 Käytetyt laitteet ja komponentit	11
2.7 Toimivuuden testaus	12
3 Teoria	13
3.1 Käynnistysvirta	13
3.2 Verkon yliaaltovirrat	14
3.3 PWM-taajuusmuuttaja	15
3.3.1 PWM-taajuusmuuttajan verkko-ominaisuudet	16
3.4 Sähkömagneettiset häiriöt	17
3.4.1 Laukeamiset välipiirin ylijännitteestä	19
3.4.2 Moottorin jännitekestoisuusongelmat	19
3.5 Usean moottorin syöttö yhdellä muuttajalla	20
3.6 Skalaariohjaus ja -sääto, vektorisääto ja suora vääntömomenttisääto DTC	20
3.7 Suora vääntömomenttisääto	21
3.8 RMS-arvot	22
3.8.1 RMS-keskiarvostaminen sähkötekniikassa	22
3.8.2 Vaihtojännitteen tehollisarvon johto	22
4 Mittaukset	24
4.1 Vaatimukset ja niiden täyttäminen	24
4.2 Suoritus	25
4.3 Tulokset ja analysointi	26
5 Testauslaitteiston hyödyntäminen ja käyttö tulevaisuudessa	29
6 Yhteenveto	30
Lähteet	31



## Liitteet

Liite 1: Testauslaitteisto	32
Liite 2: Taajuusmuuttaja GE VAT200	33
Liite 3: Kontaktorit, lämpösuojat, releet ja kytkimet.	34
Liite 4: Testauslaitteiston ohjauspiiri.	35
Liite 5: Laitteiston periaatteellinen kytkentäkaavio.	36
Liite 6: Monimoottorihjauksen piirikaavio	37
Liite 7: Päävirtapiiri	38
Liite 8: Ohjausvirtapiiri	39

## 1 Johdanto

Insinööriyössä toteutettu testausympäristö tehtiin Enercomp Oy:n toimeksiannosta yhteistyössä GE Oy:n kanssa. Työn lähtökohtana oli suunnitella ja rakentaa monimoottorikäytön testausympäristö ja suorittaa mittauksia, joilla varmistettaisiin laitteiston toimivuus. Valmiin laitteiston avulla olisi mahdollista selvittää, voidaanko korvata teollisuuden pumppausjärjestelmissä olevia vanhoja ohjauskeskuksia tässä työssä testatulla järjestelmällä. Toimiva järjestelmä olisi tulevaisuudessa mahdollisesti patentoitavissa ja kaupallistettavissa.

Yhteistyössä valvojana toimineen Enercomp Oy:n edustajan kanssa laitteisto suunniteltiin ja rakennettiin Metropolian Ammattikorkeakoulussa Myyrmäen yksikössä. Valmis testausympäristö testattiin automaatiolaboratorion vesiprosessissa olevilla pumpuilla ja yhdellä generaattorikäytöllä. Valmis testausympäristö todettiin toimivaksi yhdessä ohjaavan opettajan kanssa tehdyissä testauksissa.

Testausympäristö koostui taajuusmuuttajasta, jolla ohjattiin kolmea erillistä ja eritehoista moottoria. Testausympäristöön kuului keskeisimpänä osana ohjauslaitteisto, josta moottoreita ohjattiin taajuusmuuttajan avulla. Laitteisto koostui sulakkeista, painapeista, kontaktoreista, releistä sekä lämpösuojista. Laitteiston keskeisimpänä tarkoituksena oli selvittää taajuusmuuttajan kuormituksen kestävyys virtamittausten avulla. Virrat mitattiin taajuusmuuttajan lähdestä sekä jokaisen erillisen moottorin syötöstä. Lisäksi kiinnitettiin huomiota moottorien nopeissa hidastuksissa ja kiihdytyksissä tapahtuvaan inertiaan.

Enercomp Oy on Suomessa toimiva yritys, joka tuottaa energiansäästöön ja tehokkuuteen vaikuttavia ratkaisuja teollisuuteen[1]. GE Oy on kansainvälinen konserni, jonka tuotteet ja palvelut ulottuvat suihkumoottoreista sähköntuotantoon, rahoituspalveluista muovinvalmistukseen ja lääketieteellisestä kuvantamisesta uutisiin. Useimmat toimialat ovat edustettuina myös Suomessa.[2]

## 2 Testausympäristön toteutus

### 2.1 Tarkoitus

Testausympäristön avulla selvitettiin taajuusmuuttajan mahdollisuutta ohjata useampaa kuin yhtä moottoria. Nykyisissä käytännön sovelluksissa ohjataan pääsääntöisesti vain yhtä moottoria, ja nyt selvitettiin ohjauksen toimivuutta kolmen moottorin tapauksessa. Taajuusmuuttajavalmistajilta on aikaisemmin kysytty mielipidettä kolmen moottorin ohjaukseen, ja vastaukset sen toimivuudesta ovat olleet ristiriitaisia[3]. Käytännössä samanlaista sovellusta ei ole vielä testattu. Testauksen avulla saataisiin tietää sovelluksen mahdollisuus toimia käytännön prosesseissa. Käytännössä laite tulisi ohjaamaan lähes identtisiä ja rinnakkaisia prosesseja, joissa ei ole lähes lainkaan säädön tarvetta. Toimiessaan sovelluksella on mahdollista korvata useampi taajuusmuuttaja yhdellä ja saavuttaa taloudellisia säästöjä asennus- ja energiakustannusten pienentyessä.

### 2.2 Laitteiston toimintaperiaate

Laitteistolla haluttiin testata taajuusmuuttajalla toteutettua monimoottoriohjausta, ja sitä varten laitteistolle määritettiin käytännön sovellusta kuvaava toimintaperiaate, jonka mukaan laitteisto rakennettaisiin. Toimintaperiaate koostui kolmesta eri osasta, jotka on kerrottu alla olevassa luettelossa:

- Taajuusmuuttajan piti ohjata kolmea moottoria samanaikaisesti tai jokaista erikseen.
- Moottoreiden syöttö piti tulla taajuusmuuttajalta tai verkosta, mutta jännitteetönä ne eivät saisi olla. Myöskään taajuusmuuttajan ja verkon syöttö eivät saisi olla samanaikaisesti ohjattuina.
- Moottoreiden ohjauksen piti kytkeytyä nopeasti taajuusmuuttajalta verkkoon ja päinvastoin.

Edellä mainitut toiminnot takasivat vaadittavan toimintatavan, jotta laitteiston testauksessa saataisiin luotettavaa tietoa sen toimintakyvystä ja luotettavuudesta. Toimintojen toteuttamiseksi niiden ratkaiseminen ja rakentaminen on esitetty seuraavissa luvuissa.



### 2.3 Vaatimukset

Testausympäristö oli rakennettava mahdollisimman hyvin käytännön sovellusta vastaavaksi. Nämä vaatimukset täyttyivät hyvin, kun moottorit valittiin erikokoisiksi ja testisarjat suoritettiin käytännön ympäristöä mukaillen. Moottoreiden syöttökaapelit olivat myös pitkiä, jotta niihin syntyisi häiriötä kuten käytössä olevissa prosesseissa.

Mittauksissa tärkeää oli havaita taajuusmuuttajan syöttövirta sekä kaikkien moottoreiden ottama virta. Näitä arvoja käytettiin hyväksi analysoitaessa niitä keskenään. Erityisesti kytkentävaiheessa tapahtuvia virtapiikkejä tarkasteltiin, koska niiden aiheuttamat muutokset taajuusmuuttajan lähdöissä olisivat haitallisia. Mittaustarkkuuden vaatimuksena oli saada kytkentävaiheen virtapiikit näkymään mittaustuloksissa.

Kytkevävaiheen virtapiikkien havaitsemista varten taajuusmuuttajan ja verkon välinen riittävän nopea kytkentä suoritettiin kaksiasentoisella kytkimellä. Kytkentä suoritettiin käyttämällä 24 V:n kytkinpakkaa, joka edelleen ohjasi ohjausrelettä, jonka kärkien kautta moottorin kontaktorit saivat ohjausjännitteen.

Mittaustuloksien analysointia varten mittaukset tehtiin Fluke 435 Power Analyzerilla, josta mitattavat suureet voitiin siirtää tietokoneen näytölle Fluken ohjelmiston avulla. Mittausarvoja voitiin seurata reaaliaikaisesti trendinäytöltä tai vaihtoehtoisesti vaihtelevina arvoina. Mittaukset voitiin tallentaa myöhempää tarkastelua varten. Tiedoston tallennusmuotona oli tärkeää saada ne Microsoft Excel -muotoon.

### 2.4 Suunnittelu

Testausympäristön suunnittelussa otettiin huomioon vaatimukset ja testauspaikan tarjoamat mahdollisuudet. Suunnittelu aloitettiin mitoittamalla testauslaitteisto automaatiolaboratorion sähkönsyöttöön sopivaksi. Sähkönsyötön riittävyden tarkistamisen jälkeen selvitettiin kaapeleiden ominaisuudet ja oikean mallisten kaapeleiden saatavuus.

Taajuusmuuttajan ja moottoreiden välistä kytkentää varten komponentit mitoitettiin maksimivirtojen mukaan.

Laitteiston toimintaperiaatteiden täyttämiseksi ohjauspiirin suunnittelussa oli eri vaihtoehtoja, mutta se toteutettiin kaskiasentokytkimillä. Kytkimillä varmistettiin moottoreiden olevan jatkuvasti ohjattuna taajuusmuuttajalla tai verkolla.

Muita vaihtoehtoja ohjauspiirin toteuttamiseksi olivat mm. logiikkaohjaus ja valvomo-sovelluksena käytettävä käyttöliittymä. Logiikan sovelluksessa ideana oli tehdä testisekvenssi valmiiksi logiikan muistiin, josta sitä ajettaisiin automaattisesti tai vaihtoehtoisesti manuaalisesti logiikan sisääntuloja käyttämällä. Valvomosovellus olisi tehty InTouch-ohjelmistolla, jolla olisi tehty käyttöpaneeli käytettäväksi tietokoneen ruudulta. Käyttöpaneelin kautta ohjaus olisi edennyt logiikalle, jonka lähdöt olisivat edelleen ohjanneet moottoreita ohjaavia kontaktoreita. Käytettäväksi ohjauspiiriksi valittiin kuitenkin tavalliset kaskiasentokytkimet, jotka ohjasivat releiden kautta kontaktoreita. Kytkimien etuna oli niiden helppous asennuksessa ja käytössä. Lisäksi logiikka-sovelluksien karsimisella säästettiin asennustilaa sekä rakentamiseen käytettyä aikaa.

Laitteiston komponenttien asennusta varten tehtiin layout-kaavio (liite 5), jolla määritettiin asennuslevyn tarpeelliset mitat. Komponenttien sijoittamisesta tehtiin mahdollisimman tiivis, jotta asennuslevyn fyysinen koko olisi sopiva laitteiston vaivattomaan siirtelyyn. Komponenttien asettelulla yritettiin mahdollistaa vaivattomin asennus moottoreiden syötölle ja kaapeleiden asennukselle.

Laitteiston rakentamisen suunnittelussa otettiin huomioon myös sähköturvallisuuteen vaikuttavat asiat, joilla mahdollistettaisiin valmiin laitteiston turvallinen käyttö. Johtimien ja kaapeleiden asennukseen kiinnitettiin huomiota, jotta sähköiskujen aiheuttamista sähkötapaturmilta vältyttäisiin. Mittauksia varten osa kaapeleista kuorittiin, joten sähköiskun vaara oli kuitenkin olemassa. Laitteisto on vain testauskäytössä, joten käyttöä voidaan pitää turvallisena.



## 2.5 Rakennus

Rakennusvaihe aloitettiin komponenttien sijoittamisella ja ruuvikiinnityksillä puiseen asennuslevyyn. Komponenttien asettelussa käytettiin hyväksi aikaisemmin tehtyä suunnitelmaa.

GE:n VAT 200 -taajuusmuuttaja sijoitettiin levyyn vasempaan yläkulmaan kaapeleiden asennuksen helpottamiseksi. Taajuusmuuttajan alareunaan kytkettiin laitteiston syöttöjännite ja moottoreiden lähdöt. Taajuusmuuttajan viereen asennettiin ohjauksen suorittamista varten sulakkeet, kontaktorit, releet ja painonapit. Sulakkeiden valintaan vaikuttivat enemmän käytettävien kaapeleiden virran kestävyys kuin moottoreiden virran kulutus. Tämä johtui varastossa olevasta kaapeleiden valikoimasta. Laitteiston syöttökaapelina käytettiin 5x6G-kumikaapelia, joka kytkettiin kiinteistön sähkönsyöttöön, joka oli 32 A. Kaapelin kestävyys oli ainoastaan 25 A, joten taajuusmuuttajan ja syötön väliin kytkettiin 25 A sulakkeet. Tällä ratkaisulla estettiin liian suuren virran kulkeutuminen kaapelissa ja mahdolliset vaaratilanteet.

Taajuusmuuttajan lähtö kytkettiin 5x6G-kumikaapelilla Phoenix Contactin riviliittimiin, joiden virran kestävyys oli 40 A. Riviliittimiltä jokainen taajuusmuuttajalta tullut lähtö monistettiin kolmelle kontaktorille omaksi vaiheeksi. Näillä kytkennöillä mahdollistettiin kolmen moottorin ohjaaminen samanaikaisesti yhdellä taajuusmuuttajan lähdöllä.

Kontaktoreita oli yhteensä kuusi eli kaksi jokaiselle moottorille. Kahdella kontaktorilla saatiin moottoreiden ohjaus järjestetyksi jatkuvasti taajuusmuuttajalta tai vaihtoehtoisesti suoraan koulun verkosta. Toiselle kontaktorille moottorin ohjaus tuli suoraan taajuusmuuttajan lähdestä ja toiselle verkosta. Verkosta tullut syöttö johdettiin laitteistossa ensimmäiseksi 20 A -sulakkeille, josta se johdettiin riviliittimien kautta kontaktorille ja edelleen moottoria syöttäville riviliittimille. Moottoreita syöttäville riviliittimille kytkettiin samaan liittimeen taajuusmuuttajan ja verkon lähtö.

Kontaktoreiden ohjausta varten laitteistoon kytkettiin niitä ohjaavia kytkimiä. Kytkimet ohjasivat ohjausreleitä, joiden kautta johdettiin kontaktoreiden ohjausjännite. Kytkimet



olivat erillisessä kytkinpaketissa, joiden kautta käytettiin 24 V:n jännitettä, joka saatiin erillisellä muuntajalla 230 V pistorasiasta. Kytkimet ohjasivat jännitteen ohjausreiden 24 V:n kelalle. Jännite-eron syntyessä kelalle sen kärjet sulkeutuvat ja johtavat 230 V:n jännitteen edelleen kontaktorille. Ohjausreleen kärjet ovat sulkeutuvia ja avautuvia. Avautuvat kärjet ohjasivat verkon syöttöä ohjaavaa kontaktoria ja sulkeutuvat taajuusmuuttajan syöttöä. Näin saatiin toteutettua vaatimuksena olleen ohjauksen, jossa moottorit ovat jatkuvasti ohjattuina taajuusmuuttajalta tai verkosta. Tämä mahdollisti mittauksissa vaadittavien oikeanlaisten testiajojen suorittamisen.

Johtimien asennuksessa kiinnitettiin huomiota johdinpäiden asennukseen riviliittimiin ja komponentteihin, jotta avonaisten johtojen aiheuttamilta sähköiskuilta välttyttäisiin. Ainaoan poikkeuksen tekivät moottoria syöttävien kaapeleiden mittaukset, joiden suorittamiseen vaadittiin arvot jännitteestä ja virrasta. Virran mittauksessa kaapelin päälle asetettiin pihtimittarit, joiden sisälle indusoituva virta saatiin turvallisesti ilman johtimien kuorimista. Jännitteen mittauksessa puolestaan vaadittiin johtimien kuorimista riviliittimiltä lähtevästä moottoreiden syötöstä. Tämän vuoksi johtimia jäi paljaaksi ja se aiheuttaisi sähköturvallisuusriskin. Riskit huomioitiin laitteistoa käytettäessä, jolloin testihenkilöstö oli tietoinen vaaroista. Laitteistoa käytetään vain testiympäristössä, joten sitä on mahdollista hyväksyttävästi käyttää.

## **2.6 Käytetyt laitteet ja komponentit**

Laitteiston rakentamisessa käytetyistä laitteista keskeisin oli taajuusmuuttaja. Moottoreita varten ohjauspiirit rakennettiin releistä, kontaktoreista, lämpösuojista ja kytkimistä. Laitteiston ja moottoreiden syöttöjä varten asennettiin vedonpoistot ja sulakkeet. Kaapeleiden kytkentää ja asennusta varten asennettiin riviliittimet ja johdinkourut. Lisäksi syöttökaapelit rakennettiin itse asentamalla kumikaapeleihin kolmivaihepistokkeet. Taajuusmuuttaja sekä kontaktorit ja lämpösuojat saatiin GE Oy:ltä. Loput tarvikkeet otettiin koulun varastosta, jossa kaikkia vaadittavia komponentteja ei ollut, joten laitteistossa jouduttiin tekemään muutoksia joiltain osin, mikä ei kuitenkaan heikentänyt laitteiston vaatimuksia. Alla on lueteltu laitteistossa käytetyt laitteet ja komponentit:

- 1 kpl GE VAT 200 -taajuusmuuttaja
- 6 kpl AEG LS07 -kontaktoreita

- 4 kpl GE MT03M -lämpösuojia
- 2 kpl GE MT03L -lämpösuojia
- 3 kpl Phoenix Contact EMG 22-REL -releitä
- 1 kpl ABB K25 A -sulakkeita
- 1 kpl ABB K16 A -sulakkeita
- 1 kpl ABB K2 A -sulakkeita
- n. 50 kpl Phoenix Contact 40 A -riviliittimiä
- pientarvikkeita kuten vedonpoistoja, kiinnikkeitä, DIN-kiskoa ja johdinkourua.

## 2.7 Toimivuuden testaus

Rakennusvaiheen valmistumisen jälkeen laitteiston toimivuus testattiin kokonaisuudessaan. Tosin ennen lopullista valmistumista laitteiston eri toiminta koekäytettiin, jotta voitiin varmistua eri komponenttien toimivuudesta ja rakennusvaiheen etenemisestä aikataulun mukaan. Laitteiston eri toiminnot testattiin erikseen. Laitteiston toimivuuden mittauksissa käytettiin yleismittaria Mastech MY-64.

Ensimmäisenä testattiin 24 V ohjausreleiden toiminta mittaamalla yleismittarilla niiden kärkien kautta kulkemien jännitteiden oikeellisuus. Tämän jälkeen varmistettiin ohjausreleiden ohjaamien kontaktoreiden toiminta ohjausreleitä vastaavilla mittauksilla.

Syöttöjännitteiden kytkeminen suoritettiin viimeisenä, koska siihen liittyivät suurimmat sähköturvallisuusriskit. Verkon syöttö kytkettiin laitteistolle, jonka jälkeen sulakkeet nostettiin ja voitiin mitata verkon syöttämä jännite. Tämän jälkeen moottorit kytkettiin laitteistoon, jolloin mitattiin niiden käyttämät jännitteet. Moottoreita ajamalla todettiin niiden ottaman virran pysyvän suunnitelluissa rajoissa, ja lisäksi todettiin kaapeleiden virran kestävyden olevan sallituissa arvoissa.

Viimeisenä laitteistosta testattiin taajuusmuuttaja. Sille kytkettiin syöttö ja tehdasasetuksilla ajettiin ensiksi ilman moottoreita. Ajamisen onnistuessa ilman kuormaa sen läh-  
töön kytkettiin moottorit. Moottoreita ajettiin yksitellen päälle ja päältä pois taajuutta

muuttamalla. Samalla mitattiin moottoreille menevät jännitteet ja todettiin niiden olevan oikeanlaiset.

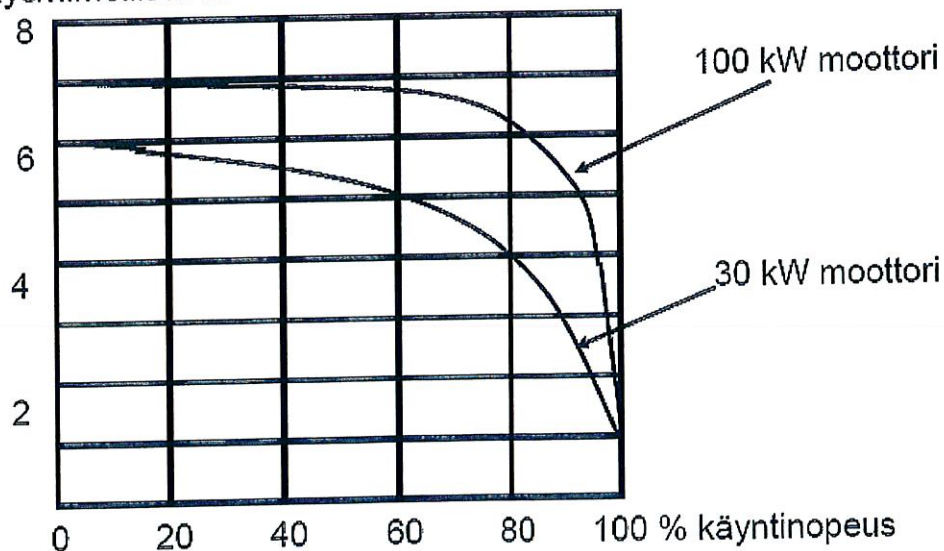
Laitteiston eri osien toimivuuden testauksen jälkeen voitiin koko laitteistoa käyttää suunniteltuun tarkoitukseen ja suorittaa vaadittavia mittauksia testausympäristössä.

### 3 Teoria

#### 3.1 Käynnistysvirta

Käynnistysvirta on moottorin käynnistyksen aikana ottama virta. Sen suuruus on jokaiselle oikosulkumoottorille ominainen arvo, joka on työkoneesta riippumaton. Se pienentyy verkkojännitteen alentuessa, jolloin vastaavasti moottorin kehittämä vääntömomentti pienenee ja käynnistysaika pitenee. Käynnistysvirta on tavallisesti 5...7 kertaa moottorin nimellisvirta. Käynnistyshetkellä saattaa käynnistysvirran ensimmäinen virtahuippu saavuttaa lähes  $\sqrt{2}$ -kertaisen arvon. [4, s.6-7]

Virtasysäys/nimellisvirta



Kuva 1. Oikosulkumoottorin virtasysäys ja nimellisvirta käynnistettäessä. [2]



Oikosulkumoottorin käynnistys:

Käynnistysvirran aiheuttama suhteellinen jännitepudotus lasketaan likimäärin lausekkeella  $dU = 100 ( 1 - x_s / ( X_d' + x_s ) )$  (1)

$x_s = I_{Gn} / I_s$  moottorin oikosulkureaktanssin suhteellinen arvo

$i_{Gn}$  = generaattorin nimellisvirta

$I_s$  = moottorin käynnistysvirta generaattorin nimellijännitteellä

$X_d'$  = generaattorin pitkäjäsen muutosreaktanssin suhteellinen arvo. Avonapakoneilla 0.2 ... 0.5

Keinot käynnistysvirran alentamiseksi ovat

1 tähti/kolmiokäynnistys

2 kuristinkäynnistys

3 muuntajakäynnistys. [5]

### 3.2 Verkon yliaaltovirrat

Diodisilta on syöttöverkon kannalta epälineaarinen laite. Epälinearisuus aiheuttaa taajuusmuuttajan verkkovirran säröytymisen. Perustaajuisen virran lisäksi verkkovirta sisältää  $f_n$  taajuiset yliaaltovirrat. [4]

$$f_n = n \cdot f_0 = (6k \pm 1) \cdot f_0, \quad (2)$$

jossa  $f_n$  = yliaaltovirran taajuus

$n$  = yliaallon järjestysluku

$f_0$  = verkkojänniteen taajuus ja  $k = 1, 2, 3 \dots$  [4]

Ideaalitapauksessa yliaaltojen suuruudet  $I_n$  ovat

$$I_n = I_1 / n, \quad (3)$$

jossa  $I_n$  = n:s yliaaltovirta

$I_1$  = perusaaltovirran suuruus

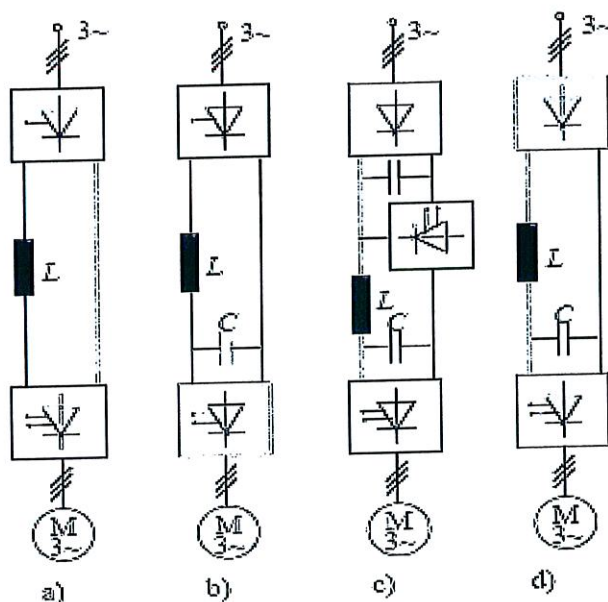
$N$  = yliaallon järjestysluku.

Yliaaltovirrat ovat siis suoraan verrannollisia perusaaltovirtaan. Kuvan 4 nomogrammista on luettavissa PWM-taajuusmuuttajan yliaaltovirtojen suuruudet ideaalitapauksessa eri pyörimisnopeuksilla ja vääntömomenteilla tai tehoilla. Yliaaltovirrat ovat suu-

rimmillaan nimellinopeudella ja maksimimomentilla. Vakiokuormitusmomentilla pyörimisnopeuden laskiessa yliaaltovirrat pienenevät, koska perusaaltovirta pienenee. [4]

### 3.3 PWM-taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttajia, joiden välipiirissä on LC-alipäästösuodatin, kutsutaan tasajännitevälipiirillä varustetuiksi. Näissä taajuusmuuttajissa lähtöjännitteen amplitudia säädetään muuttamalla lähtöjännitteen pulssikuviota (kuva 2, d). Tätä pulssikuvion muuttamista kutsutaan pulssileveysmoduloinniksi (PWM). Tasajännitevälipiirillä varustetut taajuusmuuttajat soveltuvat yksittäis- ja monimoottorikäyttöihin. [4]



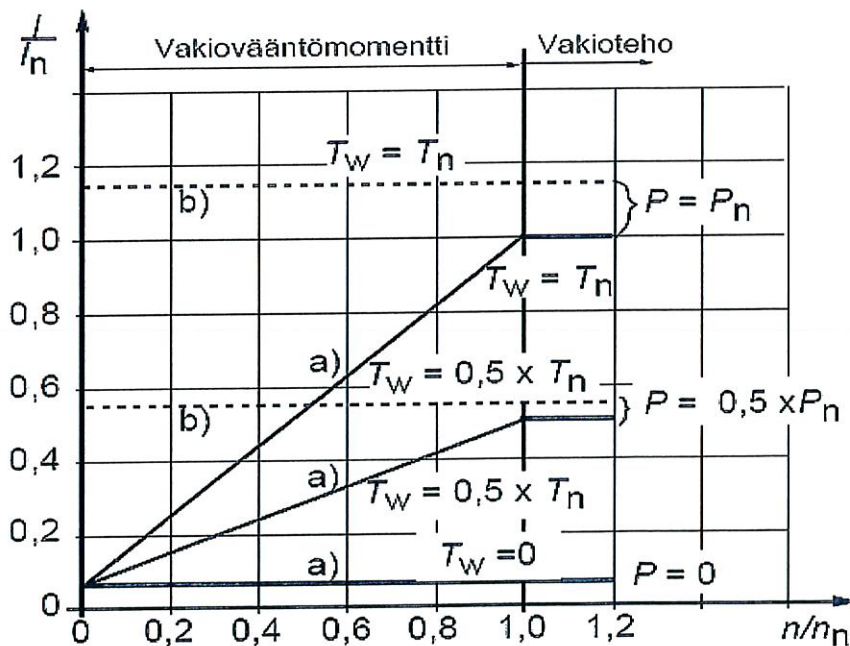
Kuva 2. Taajuusmuuttajavaihtoehdot. a) Tasavirtavälipiiri. b) Ohjattu tasajännite. c) Tasajännitteen ohjaus katkojalla. d) PWM-taajuusmuuttaja. [4]

PWM-taajuusmuuttaja on yleiskäyttöisin esitetyistä vaihtoehdoista. Se eroaa ohjatulla tasajännitevälipiirillä varustetuista tyypeistä mm. verkkovaikutuksiansa ja säätönopeutensa suhteen. Ohjatulla välipiirin tasajännitteellä varustetuissa taajuusmuuttajissa jännitteen säädön tapahtuessa välipiirijännitettä säätämällä jää säätönopeus huonoksi, koska jännitteen muuttuessa joudutaan varaamaan tai purkamaan välipiirin suurta kondensaattoria. PWM-taajuusmuuttajassa säätönopeus on suuri, koska jännitteen säätö tapahtuu vaihtosuuntaajassa. PWM-taajuusmuuttaja ottaa verkosta diodisiltansa ansiosta lähes yksinomaan pätötehoa. Taajuusmuuttajat, joissa jännitettä ohjataan syöttöverkkoon kytketyn verkkokommutoidun suuntaajan avulla, kuluttavat myös loistehoa. [4]

### 3.3.1 PWM-taajuusmuuttajan verkko-ominaisuudet

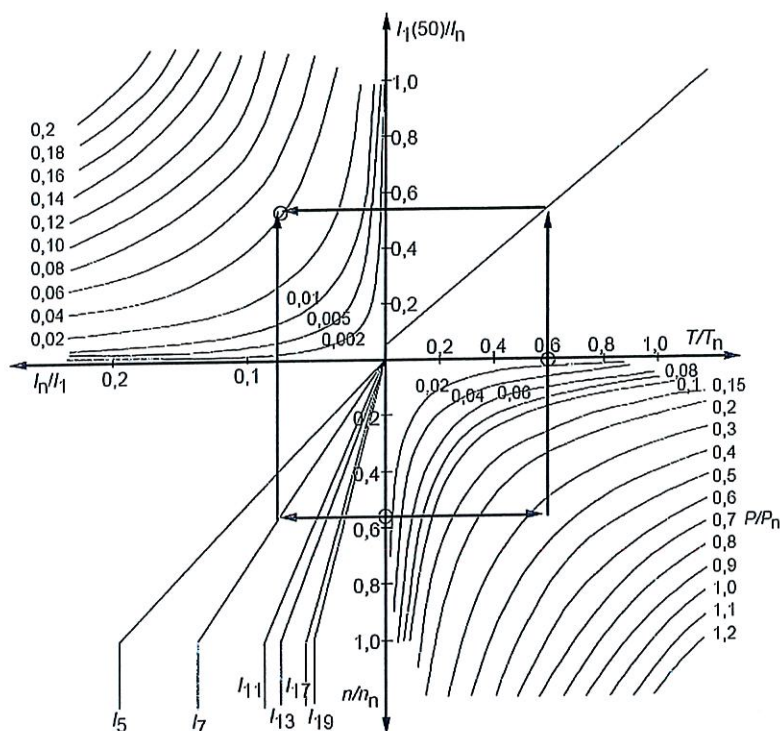
PWM-taajuusmuuttajissa välipiirin tasajännitteen suuruus on vakio. Normaalityypisessä verkkoon liitetty tasasuuntaaja on diodisilta. Kiinteän välipiirijännitteen takia verkkovirran perusaallon tehollisarvo on suoraan verrannollinen moottorin ottamaan pätötehoon. Vakiovastamomentilla pätöteho pienenee pyörimisnopeuden laskiessa suoraan verrannollisena pyörimisnopeuteen. Tällöin pienenee myös taajuusmuuttajan ottama verkkovirta, vaikka moottorin vaihevirta pysyykin vakiosuuruisena. Tasasähkökäyttö ottaa suuremman verkkovirran kuin PWM-taajuusmuuttaja (kuva 3), koska tasavirtakäytöissä:

- Nimellisa nopeudellakin tasasuuntaajan jännite (440 V) on pienempi kuin diodisillan jännite (500 V).
- Pyörimisnopeuden laskiessa ja vääntömomentin pysyessä vakiona teho ja tasasuuntaajan jännite laskevat suoraan verrannollisina pyörimisnopeuteen. Tällöin verkkovirta pysyy vakiona. PWM-taajuusmuuttajassa tasasuuntaajan jännite pysyy vakiona ja virta pienenee. PWM-taajuusmuuttajakäyttö selviää myös pienemmällä verkkovirralla kuin suoraan verkkoon kytketty oikosulkumoottori. [4]



Kuva 3. PWM-taajuusmuuttajan ottama verkkovirta, kun vastamomentti  $T$  mek on nimellinen, puolet nimellisestä ja nolla. Vertailun vuoksi esitetään myös samaan suorituskäyttöön pystyvän tasavirtakäytön verkkovirta: a) PWM-taajuusmuuttaja b)tasasähkökäyttö. [4]



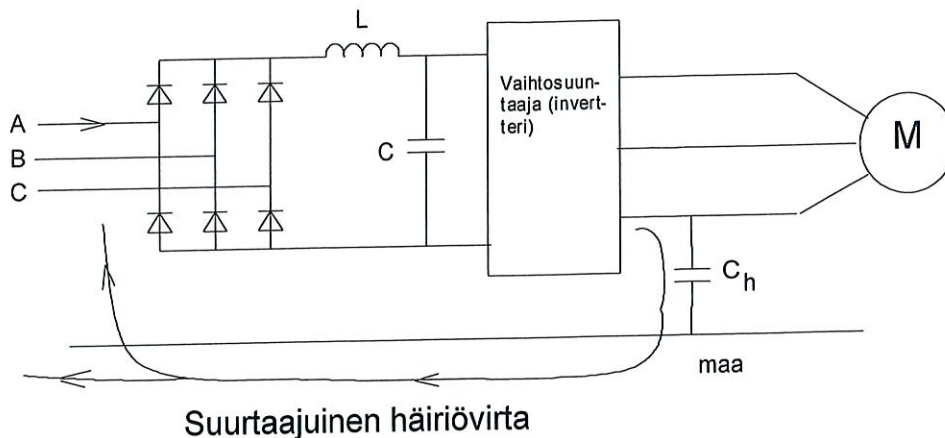


Kuva 4. Nomogrammi, josta saadaan verkkovirran yliaaltovirran suuruus suhteessa moottorin nimellisvirtaan, kun pyörimisnopeus ja teho tai vääntömomenti tunnetaan. [4]

### 3.4 Sähkömagneettiset häiriöt

PWM-taajuusmuuttajan moottorille syöttämä kolmivaihejännite muodostuu siten, että tasavirtapiirin jännite kytketään nopeasti vuorotellen aina kahden moottorivaiheen välille. Kytkiminä toimivat tyristorit, transistorit, hilalta sammutettavat tyristorit (GTO) tai nykyisin jännitteellä ohjattavat bipolaaritransistorit (IGBT). Kytkentä tapahtuu hyvin nopeasti, jolloin pulssien reunoissa jännitteen muutosnopeus on 1000 - 5000 V/μs. Moottorin vaihejohtimien potentiaali esimerkiksi maan potentiaaliin nähden muuttuu lähes vastaavalla nopeudella. Suurtaajuuden häiriövirran syntyä voi havainnollistaa seuraavan esimerkin avulla (kuva 5). Jos oletetaan, että vaihejohtimen hajakapasitanssi maahan on 1 nF, synnyttää jännitteenmuutosnopeus 3000 V/μs kondensaattorin kautta kulkevan virran[6]

$$i = C \frac{du}{dt} = 1 \text{ nF} \cdot 3000 \text{ V} / \mu\text{s} = 3 \text{ A} \quad (4)$$



Kuva 5. Suurtaajuinen häiriövirran synty vaihtosuuntaajan kytkintoiminnan vuoksi. [6]

Kytkeäntapahtumat siis synnyttävät moottorikaapelista maahan ja muihin lähellä oleviin kaapeleihin virtoja, jotka sulkeutuvat taajuusmuuttajan syöttöpuolelle monia reittejä pitkin. Virtapulssit ovat lyhyitä (alle mikrosekunnin), mutta ne muodostavat merkittävän suuritaajuisen virran, joka leviää taajuusmuuttajan ympäristöön mahdollisesti häiriten muiden laitteiden toimintaa. Myös diodisillan kommutoinnista aiheutuu sähkömagneettisia häiriöitä, jotka pääsevät galvaanista tietä verkkoon, jos taajuusmuuttajan tulo- ja poislouluolella ei ole suodatinta. On myös havaittu, että taajuusmuuttajan ohjauspiireistä voi säteillä suuritaajuisia häiriöitä, ellei niitä ole taajuusmuuttajan suunnittelussa otettu huomioon. [6]

Taajuusmuuttajien aiheuttamat sähkömagneettiset häiriöt ovat olleet koko taajuusmuuttajahistorian ajan merkittävä ongelma. Vuonna 1996 voimaan astunut EMC-direktiivi (EU Council's Electromagnetic Compatibility Directive (89/336/EEC)) on pakottanut taajuusmuuttajavalmistajat ja käyttöjen suunnittelijat pienentämään taajuusmuuttajien aiheuttamia häiriöitä. Tämä on johtanut suojavaipalla varustettujen moottorikaapeleiden ja erilaisten häiriösuodattimien käyttöön sekä taajuusmuuttajan mekaanisen rakenteen muutoksiin. Taajuusmuuttajien valmistajat antavat nykyisin yksityiskohtaisia asennusohjeita, joita noudattamalla taajuusmuuttajan häiriöt saadaan direktiivin edellyttämälle tasolle. Sähkömagneettisten häiriöiden pienentäminen aiheuttaa osittain lisäkustannuksia, mutta vastapainona saadaan vähemmän häiriöongelmia. [6]



### 3.4.1 Laukeamiset välipiirin ylijännitteestä

Diodisuuntaajaalla varustettu taajuusmuuttaja ei pysty syöttämään tehoa verkkoon päin. Jos moottori kuormitusmomentin vaihtelun vaikutuksesta muuttuu generaattoriksi, voi välipiirin tasajännite nousta niin suureksi, että taajuusmuuttajan ylijännitesuojaus aiheuttaa laukaisun. Jos sähkökäytössä esiintyy tällainen kuormitus, on taajuusmuuttajaa varustettava tasavirtapiiriin kytkettävällä jarrukatkojalla ja vastuksella, johon lyhytaikainen jarrutusteho kulutetaan. Jos käytössä esiintyy pitkäaikaista jarrutusta (esimerkiksi jotkin linjakäytöt), voidaan diodisuuntaaja korvata verkkovaihtosuuntaajalla, jolla jarrutusenergia syötetään takaisin verkkoon [7]

### 3.4.2 Moottorin jännitekestoisuusongelmat

Taajuusmuuttajan jyrkkäreunaiset pulssit voivat aiheuttaa moottorin käämitykselle liian suuria jänniterasituksia ja sen vuoksi eristevaurion. Jyrkkäreunaisen pulssin heijastuminen moottorista voi luoda kaapelin moottorin puoleiseen päähän jännitepiikin, jonka korkeus on teoriassa kaksi kertaa välipiirin tasajännitteen suuruinen, jos moottorin kaapelilla on tietty kriittinen pituus. Kriittinen pituus riippuu pulssin etureunan jyrkkyydestä ja kaapelin aaltoimpedanssista. Valitettavasti uusien taajuusmuuttajatekniikka on lisännyt pulssin jyrkkyyttä ja kriittinen pituus on lyhentynyt muutama kymmenen metriin. Asiaa pahentaa vielä se, että pulssin etureunan aikana jännite jakaantuu käämitysvyyhdien eri kierrosten välillä epätasaisesti.[8]

Käytännössä jännitekestoisuusongelma esiintyy 690 V:n käytöissä, joissa standardimoottoreiden eristystaso ei ole riittävä näille jännitepiikeille. Käyttöjännite 500 V on rajatapaus, jossa ongelmia on esiintynyt harvoin. Ongelman ratkaisuna käytetään moottoria, jossa on vahvennettu eristys. Uutta moottoria tilattaessa kustannuslisä ei ole kohtuuton, mutta tällöin käytössä on erikoisrakenteinen moottori, jota ei ole nopeasti saatavana moottorivaurion sattuessa.[8]

Tämä ongelma on pakottanut taajuusmuuttajavalmistajat suunnittelemaan taajuusmuuttajan lähtöön kytkettäviä suotimia, joilla pulssien reunoja loivennetaan (ns.  $du/dt$ -



suodin) tai jännite suodatetaan lähemmäksi sinimuotoa (ns. sinisuodin). Näistä viimeksi - mainittu on hyvin kallis ratkaisu.[8]

### 3.5 Usean moottorin syöttö yhdellä muuttajalla

Teollisuudessa on sovellutuksia, joissa halutaan ohjata useaa moottoria saman taajuusmuuttajan avulla (esimerkiksi rullarata). Periaatteessa tässä ei ole mitään ongelmaa. Taajuusmuuttaja muodostaa moottoreille varsin jäykän verkon, jonka taajuutta voidaan muuttaa. Taajuusmuuttajassa on tällöin ns. skalaarisäätö, jossa taajuusmuuttajalle annetaan taajuusohje ja taajuusmuuttaja antaa moottorille tätä vastaavan taajuuden ja likimain oikean jännitteen moottorin vuon asettamiseksi. Oikosulkumoottoreiden synkroniset pyörimisnopeudet ovat samat, mutta kuormituksesta ja koneen koosta riippuen ne eivät pyöri täsmälleen samalla nopeudella, jota joskus toivottaisiin. Viimeksi mainittu ongelma voidaan ratkaista käyttämällä reluktanssikoneita tai tahtikoneita.[9]

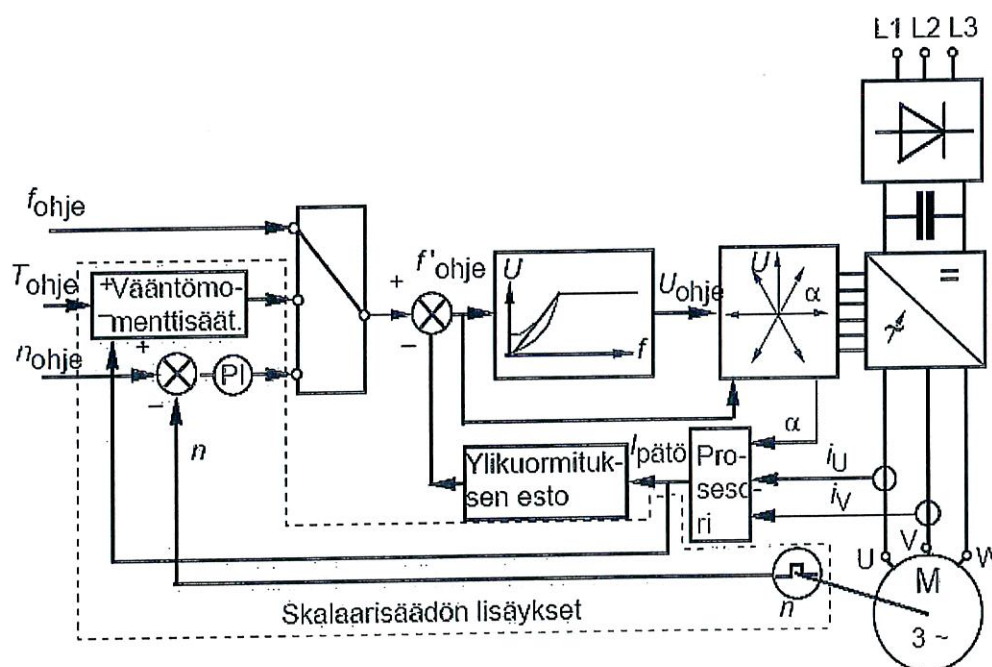
Uusimmat hyvän dynamiikan omaavat taajuusmuuttajakäytöt (“vektorisäätö”, “DTC-tekniikka”, “vuovektorisäätö”) on suunniteltu yhden moottorin ohjaamiseen, ja on luonnollista, ettei samoja dynaamisia ominaisuuksia saada usealle saman taajuusmuuttajan perässä olevalle moottorille. Erityisesti näin on, jos moottorit ovat erikokoisia ja niiden kuormitus on erilainen. Tällöin kannattaa siirtyä skalaariohjaukseen.[9]

### 3.6 Skalaariohjaus ja -säätö, vektorisäätö ja suora vääntömomenttisäätö DTC

Sähkökäytön tehtävänä on siirtää työkoneelle mekaanista tehoa niin, että saavutetaan haluttu toimintatila. Yleensä pyritään tiettyyn pyörimisnopeuteen tai vääntömomenttiin. Skalaariohjauksessa moottorin pyörimisnopeutta ohjataan invertterin lähtötaajuutta muuttamalla, jolloin moottorin pyörimisnopeus asettuu taajuuden ja kuormitusvääntömomentin määräämään arvoon. Lähtöjännite riippuu lähtötaajuudesta. Jännite kasvaa lineaarisesti moottorin nimellisjännitteeseen asti, joka saavutetaan moottorin nimellistaajuudella. Tämän yläpuolella jännite pysyy vakiona. Skalaariohjauksessa mitataan moottorin vaihevirratt ja lasketaan pätövirtakomponentit. Moottorin pätövirtakomponentti on verrannollinen moottorin vääntömomenttiin. Oletetaan moottorin vääntömomentin olevan suoraan verrannollisen moottorin jännitteen ja pätövirran tuloon:

$$U_1 \cdot I_p = U_1 \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (5)$$

Tästä johtuu nimitys skalaariohjaus. Skalaariohjauksessa ei mitata moottorin pyörimisnopeutta. Skalaarisäädön avulla voidaan säätää joko moottorin pyörimisnopeutta tai vääntömomenttia tai molempia vuorotellen. Pyörimisnopeus jää jättämän verran syöttötaajuutta vastaavaa tahtinopeutta pienemmäksi. Jättämä asettuu sellaiseen arvoon, että työkonne saa vaatimansa tehon. Skalaarisäädössä on takometri. Kuva 6 esittää skalaariohjauksen ja -säädön lohkokaaviota. Skalaarisäädön perusohjelmassa on vakiona käytettävissä kaikki ns. sovellustoimilohkot.[4]



Kuva 6. Skalaariohjauksen ja -säädön lohkokaavio. [4]

### 3.7 Suora vääntömomenttisäätö

Suoran vääntömomenttisäädön eli DTC (Direct Torque Control) avulla ohjataan suoraan moottorin perussuureita vääntömomenttia ja pyörimisnopeutta. Moottorin virta ja invertterin tasajännitevälipiirin jännite mitataan ja syötetään mukautuvaan eli adaptiiviseen moottorin matemaattiseen malliin. Se laskee vuon ja vääntömomentin oloarvot 25 ms välein. Vääntömomentin ja vuon vertailupiirit eli komparaattorit vertailevat oloarvoja ohjearvoihin, jotka tulevat momentin ja vuon ohjearvosäätäjiltä. Optimipulssin valit-



sin tekee tarvittavat kytkennänmuutokset komparaattoreilta saamiensa kaksitasoisten tietojen perusteella. DTC:ssä kytkennän muutokset tehdään vuon ja momentin arvojen perusteella. Moottoria syöttävän jännitteen muotoon ei kiinnitetä huomiota. Tästä johtuen moottoria syöttävä jännite ei muutostiloissa ole sinimuotoinen. Jatkuvuustilassa pyörimisnopeuden ollessa vakio moottorin syöttöjännite muuntautuu sinimuotoiseksi. Tässä suhteessa DTC eroaa oleellisesti perinteisestä PWM-käytöstä, jossa invertteri pyrkii syöttämään moottoria kaikissa tilanteissa mahdollisimman sinimuotoisella jännitteellä. DTC:llä saavutetaan parempi dynamiikka kuin tasasähkökäytöllä.[4]

### 3.8 RMS-arvot

RMS (Root-Mean-Square, neliöllinen keskiarvo) on vaihtovirran tai -jännitteen tehollinen arvo. RMS-keskiarvoistamalla lasketaan jännitteen tai virran tehollisarvo, joka antaa kuormaan saman tehon kuin vastaavan suuruinen tasajännite tai tasavirta. [10]

#### 3.8.1 RMS-keskiarvostaminen sähkötekniikassa

Sähkötekniikassa tehoja laskettaessa, kun käytössä on vaihtojännite (yhtä hyvin käytössä voisi olla myös vaihtovirta), halutaan yleensä huippujännitteen sijaan tietää vaihtojännitteen tehollisarvo. Näin siksi, että vaihtojännite, joka ilmaistaan tehollisarvonsa avulla, antaa kuormaan saman tehon kuin vastaavan suuruinen tasajännite. Tehollisarvo lasketaan vaihtojännitteestä keskiarvostamalla käyttämällä RMS-keskiarvostamista. Tämän vuoksi ammattipiireissä yleensä puhutaankin RMS-arvosta tehollisarvon sijaan.[11]

#### 3.8.2 Vaihtojännitteen tehollisarvon johto

Tehollisarvo määritellään keskimääräisen tehon avulla. Tehon määritelmän ja Ohmin lain avulla hetkelliseksi tehoksi resistanssiin saadaan

$$P(t) = \frac{v^2(t)}{R}, \quad (6)$$



missä  $v(t)$  on jännitteen arvo tietyllä ajan hetkellä  $t$  ja  $R$  kuormavastuksen resistanssi.  
[11]

Keskimääräiselle teholle saadaan lauseke integroimalla vaihtojännite ajan jakson  $T$  yli sekä jakamalla integroinnista saatu tulos jakson pituudella.[11]

$$P_{avg} = \frac{1}{R} \left( \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v^2(t) dt \right) = \frac{v_{rms}^2}{R}, \quad (7)$$

missä  $t_0$  on ajan hetki tarkastelujakson alussa. Keskimääräinen teho on merkitty yhtä suureksi kuin tehollisarvoisesta jännitteestä  $v_{rms}$  laskettu teho. Ratkaistaan jännitteen tehollisarvo ottamalla neliöjuuri.[11]

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v^2(t) dt} \quad (8)$$

Tämä johdettu tehollisarvon laskentakaava on sama kuin olisi käytetty suoraan RMS-keskiarvostamista. Kaava on helppo muistaa, sillä lyhenne RMS kertoo suoraan laskutavan, Root-Mean-Square (neliöjuuri-keskiarvo-neliöinti). Kaavaa tarvitaan laskettaessa tehollisarvot erilaisille vaihtojännitteille, joista yleisimmin käytettyjä ovat siniaalto, kolmioaalto ja kantiaalto.[11]

Sinimuotoinen vaihtojännite on muotoa

$$v(t) = V_0 \sin(\omega t), \quad (9)$$

missä  $V_0$  on jännitteen amplitudi,  $t$  aika ja  $\omega$  kulmataajuus.

Tehollisarvon lauseke sinimuotoiselle jännitteelle on

$$v_{rms,sin} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_0^2 \sin^2\left(\frac{2\pi}{T}t\right) dt} = \frac{V_0}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\int_0^{2\pi} \sin^2(t) dt}. \quad (10)$$

Lausekkeen ensimmäisessä osassa kulmataajuus on muutettu muotoon  $\omega = 2\pi / T$ . Jälkimmäisessä osassa ajanjakson  $T$  paikalle on sijoitettu sinin jakson pituus, joka on  $2\pi$ . Ajasta riippumaton jännitteen amplitudi on tuotu myös integraalin ulkopuolelle.[11]

Seuraavaksi käytetään hyväksi jo tunnettua sinin neliön integraalia:

$$\int \sin^2(x) dx = \frac{x}{2} - \frac{1}{4} \sin(2x) + C. \quad (11)$$

Laskut suorittamalla saadaan, että sinimuotoisen jännitteen tehollisarvo on vaihtojännitteen huippuarvo jaettuna neliöjuuri kahdella.[11]

$$v_{rms,\sin} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \quad (12)$$

## 4 Mittaukset

### 4.1 Vaatimukset ja niiden täyttäminen

Mittauksissa oli tarkoituksena osoittaa taajuusmuuttajan ominaisuudet sopiviksi useamman kuin yhden moottorin ohjaamisessa. Ongelmana usean moottorin ohjauksessa ovat virtapiikkien vaikutukset taajuusmuuttajaan. Lisäksi taajuusmuuttajan kuormassa tapahtuvat nopeat ja suuret muutokset aiheuttavat vaikeuksia, joihin virtapiikitkin liittyvät. Taajuusmuuttajien laitevalmistajilta oli aikaisemmin kysytty Enercomp Oy:n toimesta mahdollisuuksia taajuusmuuttajan käyttämiseen halutussa sovelluksessa. Laitevalmistajien mielipiteissä oli ristiriitoja eikä selvää vastausta siis saatu. Enercomp Oy:n toimesta haluttiin tehdä testausympäristö, jossa tätä sovellusta voitaisiin testata. Testauksen oikeellisuuden ja sovelluksen toimivuuden todistamiseksi testausympäristön käyttämisessä ja mittauksissa oli keskeisiä vaatimuksia.

Mittauksissa tärkeimpänä vaatimuksena oli saada taajuusmuuttajan syöttämän ja moottoreiden käyttämät virrat. Lisäksi virroissa tapahtui hyvin nopeita muutoksia moottoreita kytkettäessä, joten mittaustarkkuuden oli oltava sopiva näiden muutosten havaitsemi-

seen. Mittalaitteena käytettiin Fluke 435 Power Analyzera, jossa mittaustarkkuus oli riittävän pieni ja lisäksi mahdollisuus mitata samanaikaisesti neljän eri vaiheen virtaa.

Nopeiden muutosten saamiseksi moottoreiden kytkentä oli saatava suoritettua mahdollisimman nopeaksi. Taajuusmuuttajalle haluttiin nopeita kuorman vaihteluita ja virtapiikkejä, joten moottoreiden ohjaukseen käytettiin kaksiasentoisia kytkimiä, joilla ohjattiin kontaktoreiden avulla moottorit jatkuvasti verkon tai taajuusmuuttajan syöttöön.

Mittaustulosten analysointia varten vaatimuksena oli saada mittaustulokset tallennettua oikeaan tiedostomuotoon ja tulostettua paperille, jotta voitiin osoittaa sovelluksen toimivuus. Tämä onnistui Fluke 435 Power Analyzer -mittarilla, josta saatiin USB-johdolla yhteys tietokoneeseen, ja siten voitiin reaaliaikaisesti seurata mitattavia suureita Fluke View -ohjelmiston avulla trendinäytöltä tai pelkinä arvoina. Tallennus onnistui useaan eri tiedostomuotoon, mutta käytettiin Excel-tiedostotyyppiä. Mittarilla oli myös mahdollisuus seurata mittauksia sen omalta näytöltä trendi-muodossa tai pelkinä arvoina ja tallentaa ne mittarin omaan muistiin, josta on mahdollista ladata ne myöhemmin tietokoneen FlukeView -ohjelmaan analysointia varten.

Testauksessa käytettyjen laitteiden valinnassa ei ollut ehdottomia vaatimuksia. Moottoreiden toivottiin olevan eritehoisia, joiden syöttökaapeleiden haluttiin olevan mahdollisimman pitkiä mahdollisten häiriöiden saamiseksi käytännön prosessien mukaisesti. Moottorit olivat tehoiltaan 3 kW, 3 kW ja 2,2 kW. Moottoreiden kaapelit olivat noin 5-15 metriä. Taajuusmuuttaja oli teholtaan 11 kW, joten se riitti hyvin syöttämään moottoreita, joiden yhteisteho oli noin 8,2 kW. Kontaktoreiden lämpösuojat oli valittu ja säädetty moottoreiden nimellisvirtoja hieman suuremmiksi.

#### **4.2 Suoritus**

Mittaukset aloitettiin asettelemalla Fluke 435 Power Analyzer -mittalaitteen mittausjohdot paikoilleen. Mittalaitteen asetukset konfiguroitiin mittauksen vaatimusten mukaisesti. Asetuksissa valittiin mitattava kytkentä eli kolmivaiheinen virtamittaus. Käytettävissä oli vain kolmen vaiheen mittaus, mutta nollajohtimen mittauskaapelit kytkettiin taajuusmuuttajan lähtöön, jolloin mittalaitteen asetuksia muuttamalla nollanvaiheen mit-



taus konfiguroitiin vaiheen mittaukseen sopivaksi. Asetuksista muutettiin myös käytetty mittaustapa sekä näytteenottotarkkuus. Mittalaitteen trendinäytön skaalauksesta valittiin myös tarvittavan laajuinen.

Jännitteenmittausta varten mittausjohtimet asetettiin jokaisen moottorin yhteen vaihejohtimeen kiinni sekä yhteen taajuusmuuttajan syöttävään vaiheeseen. Taajuusmuuttajan ja jokaisen moottorin vaihejohtimia oli kolme, mutta niissä on lähes lineaariset jännitteet, joten yhden vaiheen mittauksella saatiin riittävä mittaustarkkuus.

Virtojen mittausta varten mittalaitteen virtapihdit asetettiin jännitteenmittauksessa käytettyjen vaiheiden ympärille, jolloin saatiin virtojen arvot jokaiselta moottorilta erikseen sekä taajuusmuuttajan syöttämä virta. Virrat mitattiin jännitemittauksen tapaan vain yhdestä vaiheesta, mutta virtojen ollessa lähes lineaariset kolmen vaiheen kesken mittauksesta saatiin riittävän tarkka.

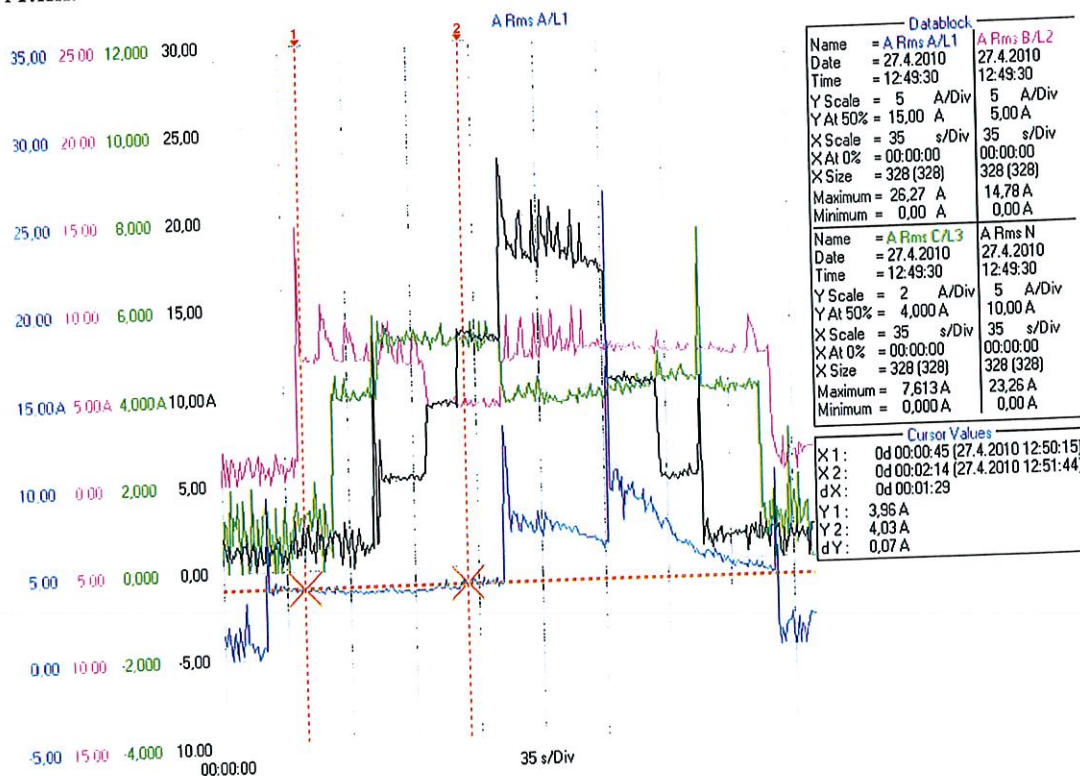
Mittauksia varten moottoreita ajettiin vuorotellen taajuusmuuttajan ja verkon välillä, jolloin saatiin aikaiseksi virtapiikkejä, kuormituksen äkillisiä vaihteluita sekä muita taajuusmuuttajan ohjaamiseen vaikuttavia häiriöitä. Moottoreiden ajamiseen ei ollut ennalta sovittua tarkkaa järjestystä, vaan ohjaaminen tapahtui manuaalisesti kytkimien avulla erilaisten tapojen välillä.

### **4.3 Tulokset ja analysointi**

Laitteiston taajuusmuuttajan ja moottoreiden virtojen ja jännitteiden mittaukset suoritettiin Fluke 435 Power Analyzer -mittalaitteella. Mittausarvoja seurattiin reaaliaikaisesti mittalaitteen näytöltä sekä tietokoneen näytöltä Fluke View -ohjelman Readings-toiminnon avulla. Reaaliaikaiset arvot ja käyrät myös tallennettiin ja niitä käytettiin hyväksi myöhempää analysointia varten.

Moottoreita ajettiin manuaalisesti kytkimillä edestakaisin taajuusmuuttajan ja verkon välillä. Ajojen aikana seurattiin mittausarvoja ja käyriä, jolloin voitiin havaita haluttujen ajojen vaikutuksia mitattaviin suureisiin. Samalla seurattiin taajuusmuuttajan käyttäytymistä eri ajojen aikana taajuusmuuttajan käyttöpaneelista.

Testiajo aloitettiin kytkemällä jännitteet laitteistolle ja ohjaamalla kontaktoreiden avulla moottoreiden syöttö taajuusmuuttajalle ohjauksen ollessa 0 Hz, joka näkyy kuvassa 7 ajan hetkellä 00:00:00. Kuvassa näkyy taajuusmuuttajan syöttämä virta mustalla värillä ja nimellä A Rms N. Moottorin 1 virta näkyy kuvassa sinisellä, moottorin 2 virta näkyy liilana ja moottorin 3 virta näkyy vihreänä. Kuvasta nähdään, että aluksi moottoreita kytetään yksitellen verkkoon, minkä jälkeen ne kytetään yksitellen taajuusmuuttajan syötölle taajuusasetuksen ollessa 20 Hz. Tämä näkyy kuvassa 7 mustalla värillä tapah-tuvissa muutoksissa, jolloin virran lisäys muuttuu nolasta ensiksi noin 5 A:iin, jonka jälkeen edelleen moottoreiden lisäyksen vaikutuksesta 9 A:sta 13 A:iin. Lopuksi taa-juusmuuttajan ohjausta nostetaan 50 Hz:iin, jolloin virran kulutus nousee vajaan 20 A:iin.



Kuva 7. Virran Rms-arvojen mittaus.

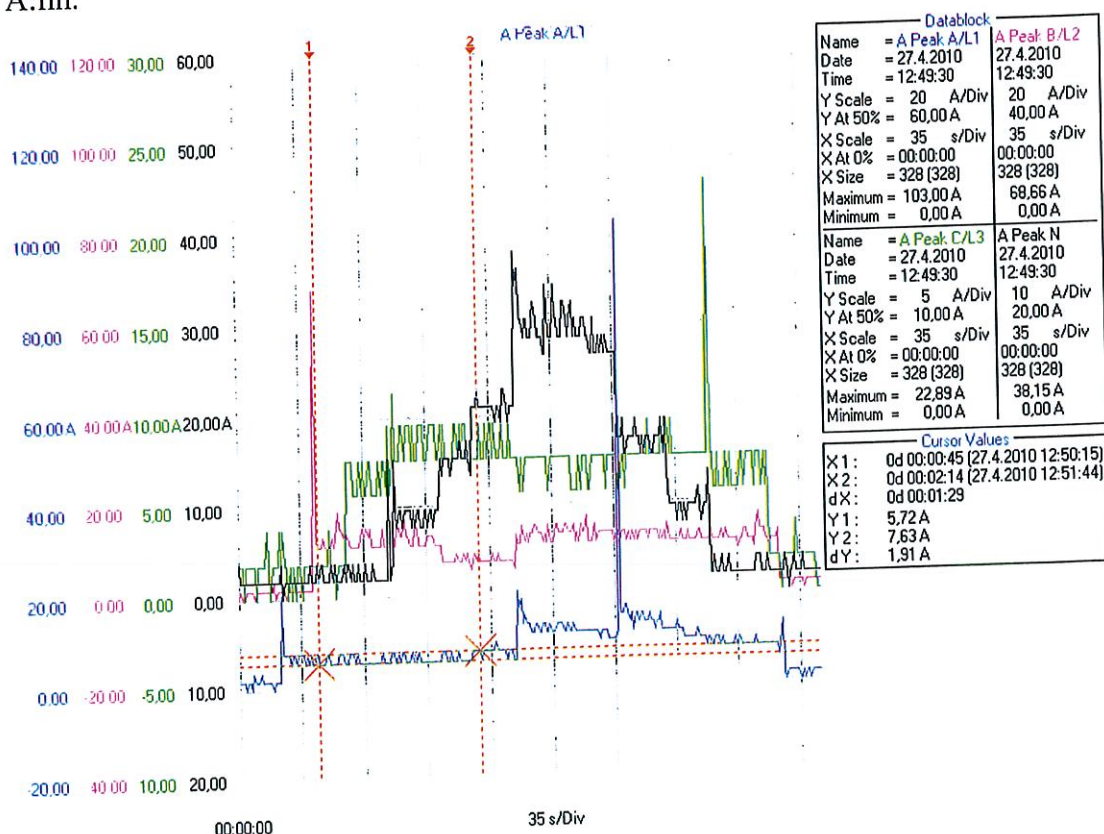
Kuvasta nähdään tärkein haluttu tieto eli virtapiikit. Virtapiikin tarkalla arvolla ei ole suurta merkitystä, koska sen täytyisi olla huomattavasti taajuusmuuttajan virrankeston alapuolella, jotta laitteistoa voisi luotettavasti käyttää. Kuvasta 7 nähdään siis virtapiikkejä useita, ja ne tapahtuvat aina moottoreita kytkettäessä. Moottoreiden syötössä tapah-



tuvien virtapiikkien suuruus ei ole merkittävin tieto vaan kuvassa näkyvä mustalla käytävällä oleva taajuusmuuttajan syöttämä virta. Siitä nähdään taajuusmuuttajan virran nousevan hetkittäin jopa lähes 23 A:iin taajuusmuuttajan lähdön maksimiarvon ollessa 25 A.

Tällöin taajuusmuuttajalle tuli ylivirta vikailmoituksia, jotka pysäyttivät taajuusmuuttajan.

Kuvassa 8 nähdään sama mittaus kuin kuvassa 7, mutta nyt kuvasta nähdään virran peak-arvot. Kuvassa näkyvät virtapiikit ovat nyt huomattavasti suuremmat kuin Rms-arvoilla. Taajuusmuuttajan syöttämä virta näkyy mustalla, ja sen huomataan ajoittain nousevan lähes 40 A:iin. Moottoreiden virran kulutuksen huippuarvoissa näkyy myös suuria muutoksia. Moottorin 1 kuluttama virta nousee kytkentävaiheessa jopa yli 100 A:iin.



Kuva 2. Virran Peak-arvojen mittaus.



Testissä taajuusmuuttajalle tuli erilaisia vikailmoituksia, joita analysoitiin ja yritettiin poistaa taajuusmuuttajan asetuksia muuttamalla. Kaikki vikailmoitukset johtuivat liian suuresta virrasta, mutta niitä oli erilaisia kuten ylivirta käynnistyksessä, hidastuksessa ja kiihdytyksessä. Taajuusmuuttajan käyttöpaneelista määriteltiin asetuksia, jotta vikailmoitukset saataisiin poistumaan. Asetuksissa määriteltiin mm. kiihdytyksiin ja hidastuksiin käytettäviä aikoja, ylivirtojen raja-arvoja ja hälytysten valvontaa. Vikoja ei pystytty korjaamaan, joten niiden tutkimista ja ehkäisemistä jatketaan myöhemmin.

## **5 Testauslaitteiston hyödyntäminen ja käyttö tulevaisuudessa**

Testausympäristössä käytetyn laitteiston avulla simuloitiin taajuusmuuttajan mahdollista käyttöä monimoottoriohjauksessa. Mittaustuloksista nähdään, että ongelmia syntyi useita, mutta niiden poistaminen voisi olla mahdollista. Ongelmien poistaminen vaatii kuitenkin lisää mittauksia ja testiajoja, joilla voitaisiin paremmin selvittää laitteiston toimivuus erilaisissa käytännön sovelluksissa.

Laitteiston korvaamattomana ongelmana on kuitenkin yksittäisen pumpun tai moottorin säädön mahdottomuus. Taajuusmuuttaja on tarkoitettu myös säädön mahdollistamiseen, mutta tämä laitteisto ei siihen sovellu. Toimiessaan laitteisto voisi kuitenkin korvata esimerkiksi teollisuudessa vanhoja pumppausjärjestelmiä ohjaavia sähkökeskuksia, joissa ei ole tarvetta tarkempaan säätöön.

Vanhat sähkökeskukset ovat toimintavarmuudeltaan heikkoja, joten uuden keskuksen asennuksella parannettaisiin luotettavuutta ja saataisiin taloudellisia säästöjä laitekustannuksissa, kun useampi taajuusmuuttaja korvattaisiin yhdellä. Uuden keskuksen asennuksen helpouteen kiinnitettäisiin myös huomiota. Teoriassa vanhan keskuksen olisi mahdollistaa vaihtaa uuteen katkaisemalla syöttökaapelit ja liittämällä ne suoraan uuteen keskukseen. Tämä ajatus vaatii uudelta keskukselta helppoa ja nopeaa muutettavuutta, jotta sitä voitaisiin kustannustehokkaasti asentaa monenlaisiin käytännön sovelluksiin. Laitteiston kaupallistamiseen ja mahdolliseen patentoimiseen tähtäävää selvitystä jatketaan tulevaisuudessa.

## 6 Yhteenveto

Tämä työ tehtiin Enercomp Oy:n ja GE Oy:n toimeksiannosta ja siinä tutkittiin taajuusmuuttajan käyttäytymistä monimoottoriohjauksessa. Työssä tärkeimpänä asiana oli selvittää, pystyykö taajuusmuuttaja ohjaamaan kolmea moottoria luotettavasti, kun niitä kytketään edestakaisin taajuusmuuttajan ja verkon välillä. Selvitystä varten rakennettiin testausympäristö, jossa suoritettiin taajuusmuuttajan käyttäytymistä havainnollistavia mittauksia.

Taajuusmuuttajan käyttäytymistä tutkittiin rakentamalla testausympäristö, jossa ohjattiin kytkimien avulla moottoreita taajuusmuuttajan ja verkon välillä. Kytkevävaiheessa laitteistossa suoritettiin mittauksia taajuusmuuttajan ja moottoreiden kuluttamista virroista sekä jännitteistä. Mittauksille ja laitteistolle oli asetettu tiettyjä vaatimuksia, jotta tutkimisesta olisi hyötyä vertailtaessa monimoottorikäytön soveltuvuutta käytännön prosesseissa.

Laitteiston testauksessa tehdyillä mittauksilla ja taajuusmuuttajan seurannalla todettiin, ettei laitteistossa käytetty taajuusmuuttajasovellus ole sellaisenaan hyödynnettävissä todellisissa prosesseissa. Mittauksissa havaittiin suuria käynnistysvirtoja moottoreita kytkettäessä taajuusmuuttajalle, jolloin taajuusmuuttajan turvatoiminnot pysäyttivät sen toiminnan. Käynnistysvirrat saatiin pienemmiksi kytkettäessä moottoreita verkosta taajuusmuuttajalle viiveellä, jolloin laitteistoa pystyttiin keskeytyksettä käyttämään. Lisäksi ratkaisuna käynnistysvirtojen pienentämiselle voisi olla jarrutusvastus, joka kytkettäisiin taajuusmuuttajan lähtöön. Tätä ratkaisua ei kuitenkaan testattu tässä työssä.

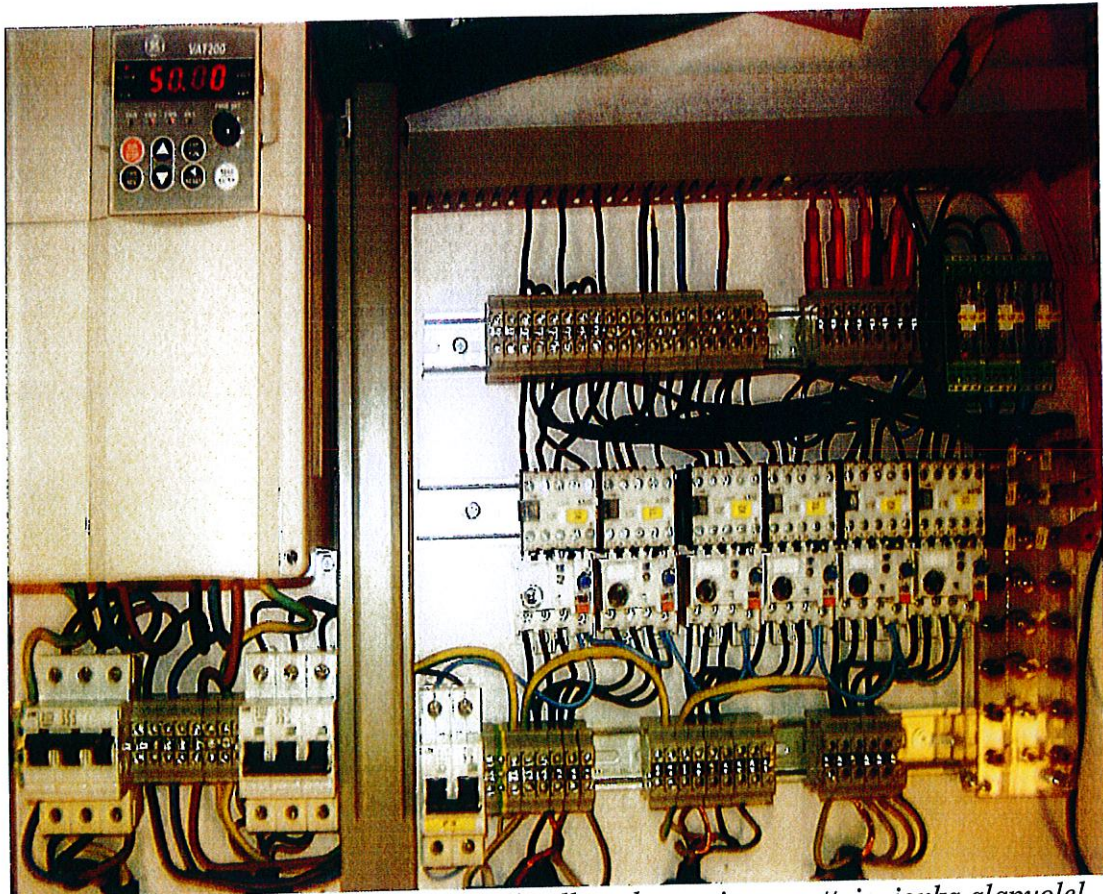
Testausjärjestelmästä saatuja tietoja käytetään hyväksi myöhemmin tehtävissä tutkimuksissa. Enercomp Oy:n ja GE Oy:n toimesta seuraavissa vaiheissa testataan eri vaihtoehtoja, joilla saataisiin laitteisto toimivaksi ja luotettavaksi käytännön prosessissa.

## Lähteet

- 1 Enercomp Oy. (WWW-dokumentti).  
<<http://www.enercomp.fi/page7.html>>. Luettu 27.4.2010.
- 2 GE Oy. GE Suomessa. (WWW-dokumentti).  
<<http://www.enercomp.fi/page7.html>>. Luettu 27.4.2010.
- 3 Ilmaranta, Pekka. CEO, Enercomp Oy, Vantaa. Keskustelu 12.2.2010.
- 4 ABB TTT -käsikirja 2000- 07. ABB Oy.
- 5 Häkkinen, Pentti. Laivasähköverkko. Opetusmoniste. (WWW- dokumentti).  
<[http://www.tkk.fi/Yksikot/Laiva/Opinnot/Kurssit/Kul-24.4410/pdf/luku\\_5.1.pdf](http://www.tkk.fi/Yksikot/Laiva/Opinnot/Kurssit/Kul-24.4410/pdf/luku_5.1.pdf)>.  
Luettu 8.5.2010.
- 6 ABB Technical Guide No. 3, EMC Compliant Installation and Configuration for a Power Drive System. ABB 2002
- 7 ABB Technical Guide No. 8, Electrical Braking. ABB 2002.
- 8 Yrjö Kerkkänen. Taajuusmuuttajakäyttöjen ongelmia. Satakunnan Ammattikorkeakoulu. Opetusmoniste 2007.
- 9 ABB Technical Guide No. 1, Direct Torque Control. ABB 2002.
- 10 Fluke Finland Oy. Tutkimus- ja mittauslaitteet. (WWW- dokumentti).  
[http://www.fluke.de/comx/portal\\_glossary.aspx?locale=fifi](http://www.fluke.de/comx/portal_glossary.aspx?locale=fifi). Luettu 5.5.2010
- 11 Neliöllinen keskiarvo(RMS). (WWW-dokumentti).  
[http://fi.wikipedia.org/wiki/Neli%C3%B6llinen\\_keskiarvo](http://fi.wikipedia.org/wiki/Neli%C3%B6llinen_keskiarvo). Luettu 8.5.2010.

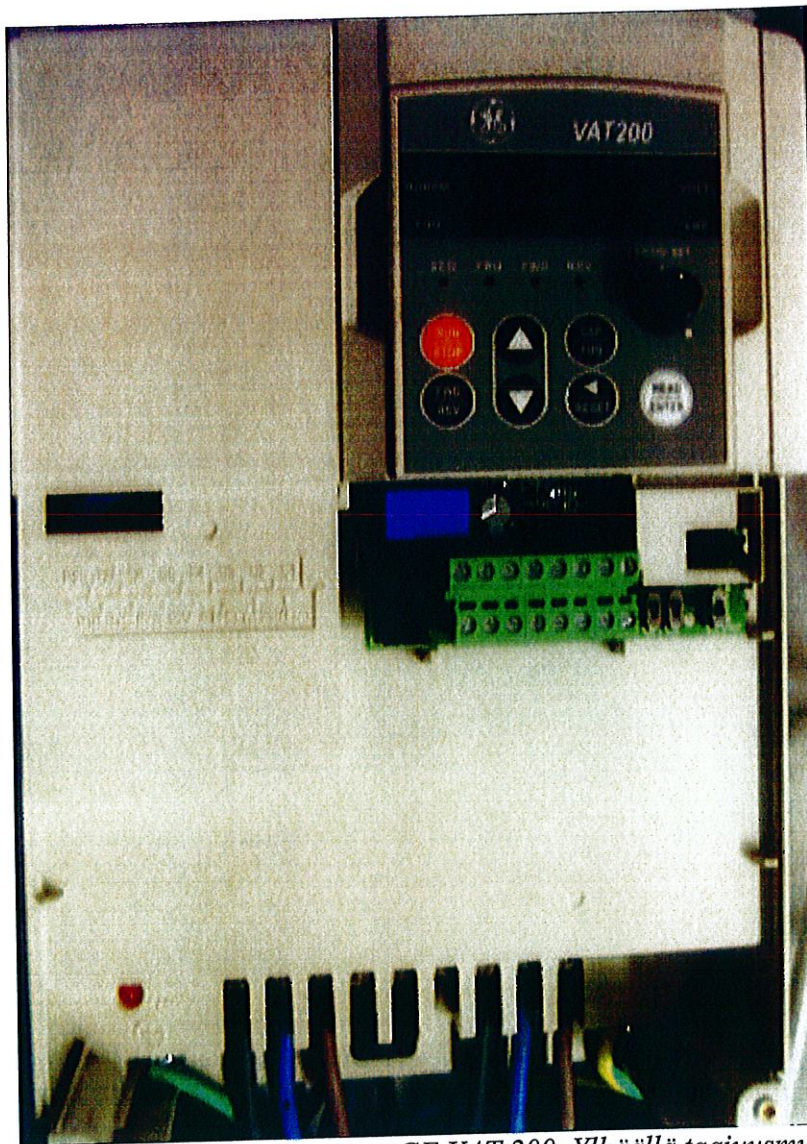


## Liite 1: Testauslaitteisto.



*Kuval. Testauslaitteisto. Vasemmalla ylhäällä näkyy taajuusmuuttaja, jonka alapuolella syöttöjen sulakkeet. Oikealla puolella näkyy ylhäällä riviliittimet ja 24 V:n ohjausreleet. Niiden alapuolella kontaktorit ja lämpösuoijat sekä kytkimet. Alhaalla on riviliittimet, joiden kautta lähtevät moottoreiden syötöt.*

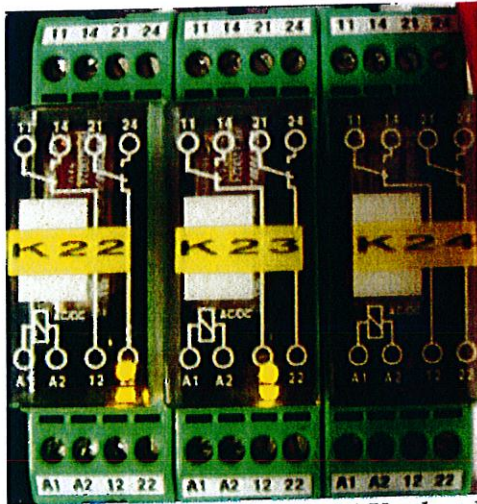
## Liite 2. Taajuusmuuttaja GE VAT200.



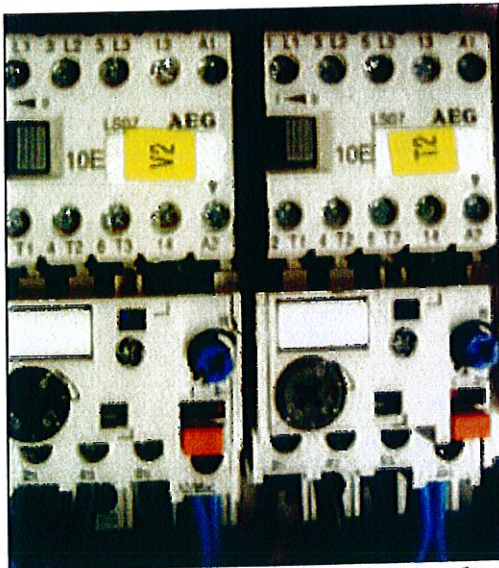
*Kuva 1. Taajuusmuuttaja GE VAT 200. Ylhäällä taajuusmuuttajan käyttöpaneeli ja alhaalla jännitekytkennät.*



### Liite 3. Kontaktorit, lämpösuojat, releet ja kytkimet.



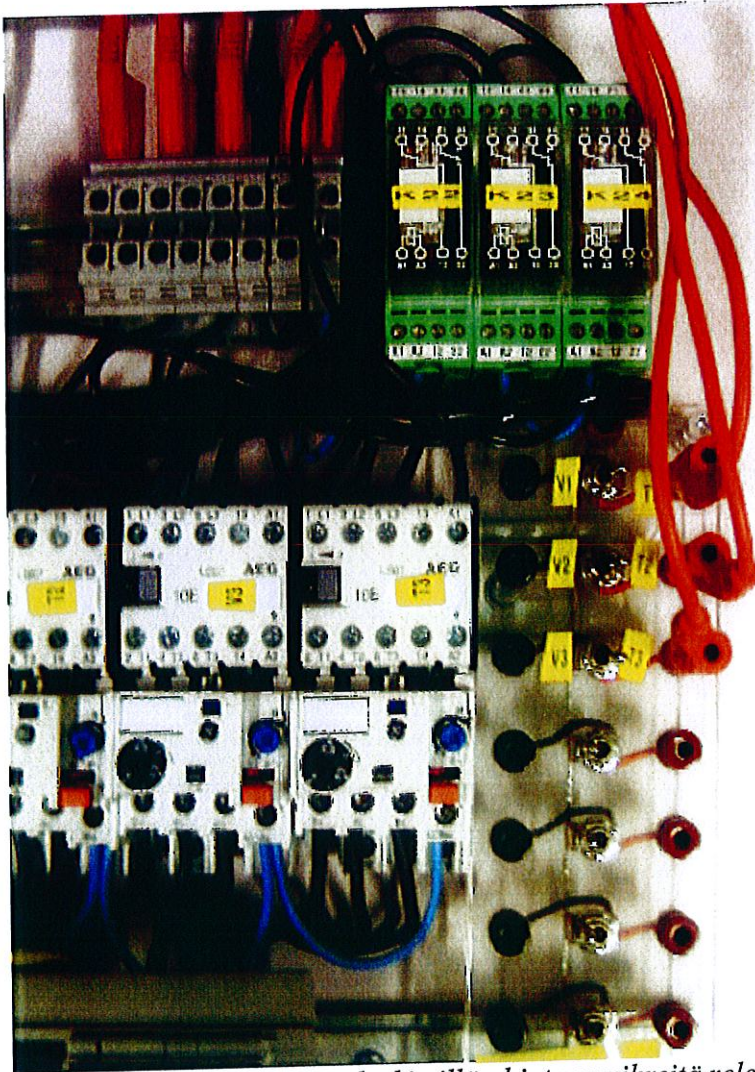
Kuva 1. Phoenix Contact 24 V releet kontaktoreiden ohjaukseen.



Kuva 2. AEG:n kontaktorit ja GE:n lämpösuojat mottoreiden ohjaamiseen.

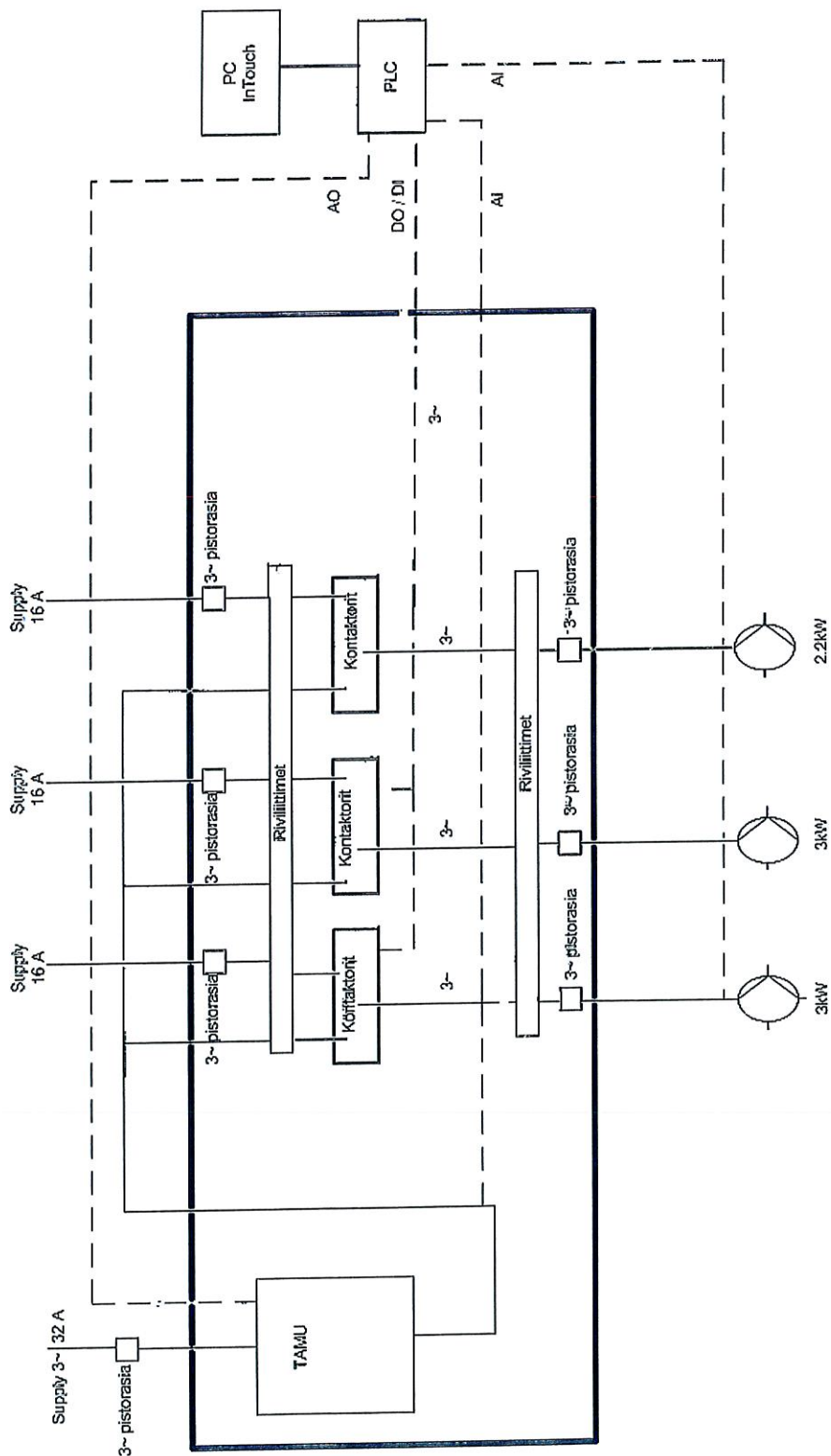


#### Liite 4. Testauslaitteiston ohjauspiiri.

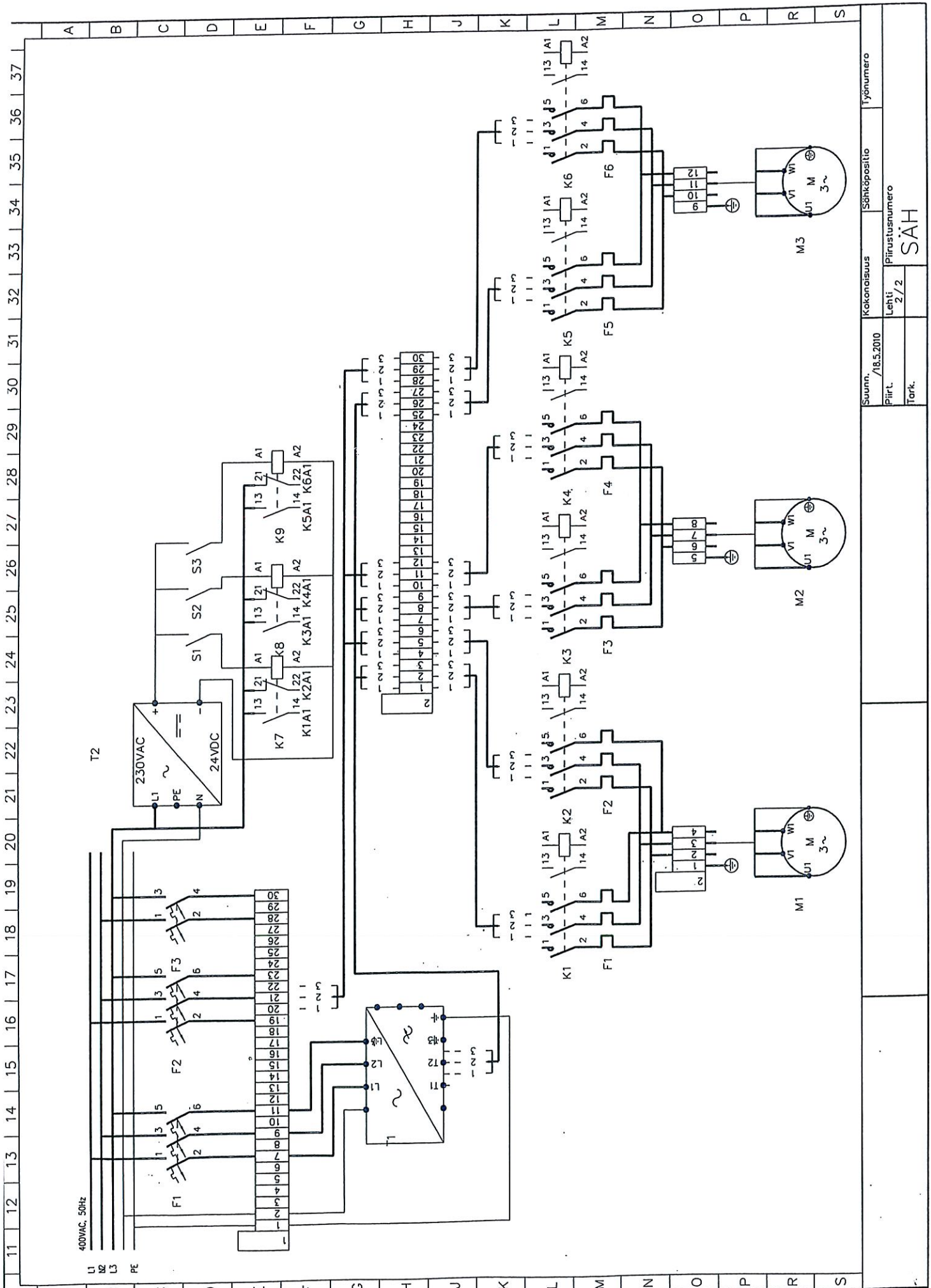


*Kuva1. Ohjauspiirissä kytkimillä ohjataan vihreitä releitä, joiden kautta kontaktorit saavat ohjausjännitteet, jotka edelleen ohjaavat moottoreita lämpösuojien kautta.*

### Liite 5. Laitteiston periaatteellinen kytkentäkaavio.



Kuva 1. Laitteiston periaatteellinen kytkentäkaavio, jota käytettiin avuksi asennuslevyn mitoituksessa. Ohjaustapana kaaviossa on logiikka ja käyttöliittymä, mutta lopullinen ohjaus tehtiin käyttämällä kaksiasentokytkimiä.



A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	O	P	R	S
			D mutos	E mutos	F mutos											

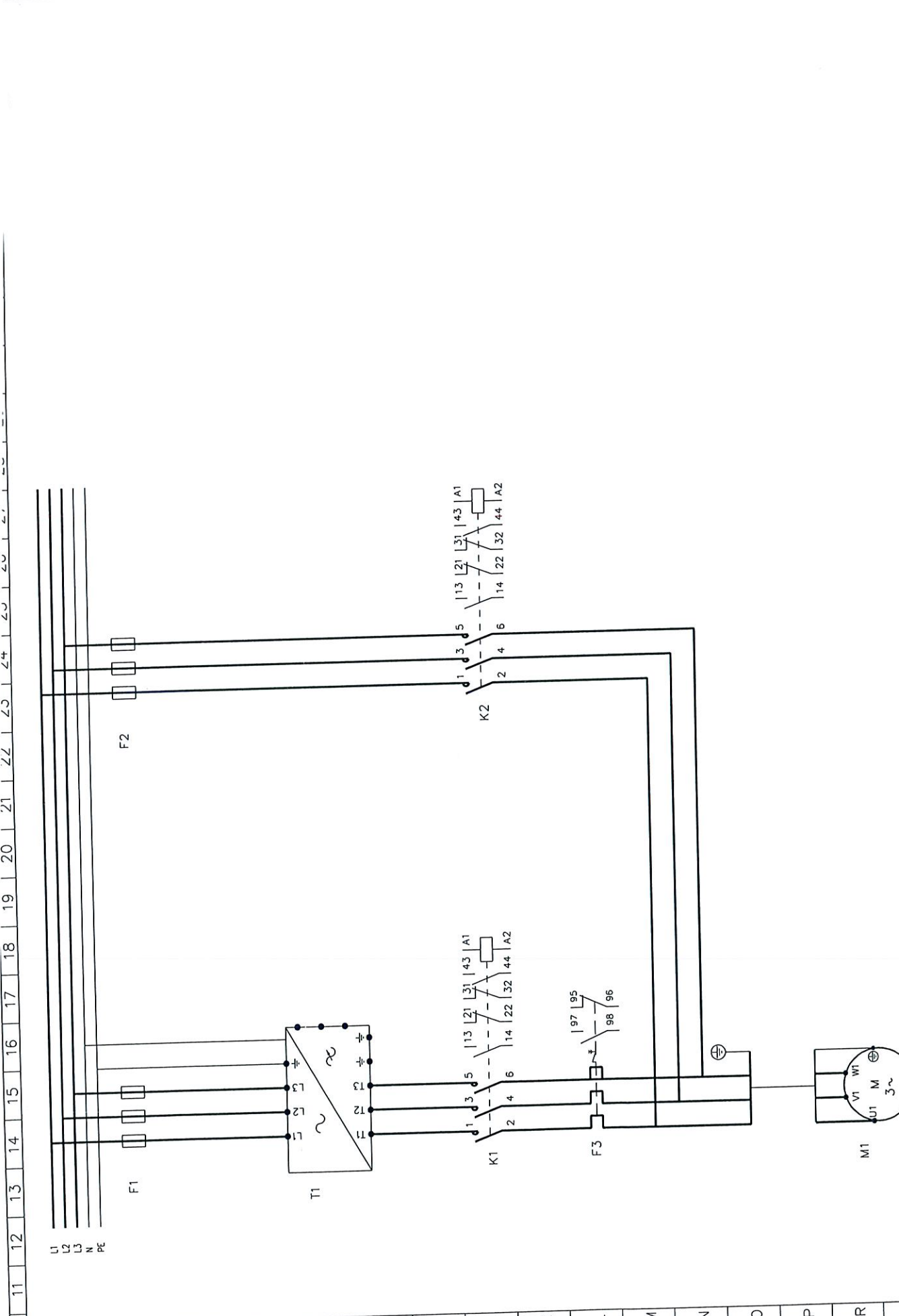
SÄH	
Lehti	2/2
Piirustusnumero	
Sähköposito	
Kokoonaisuus	
Suunn.	/18.5.2010
Tark.	
Työnnumero	

11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37

400VAC, 50Hz  
L1 L2 L3 PE  
T2  
230VAC  
24VDC  
K1 K2 K3 K4 K5 K6  
K7 K8 K9  
K3A1 K4A1 K5A1 K6A1  
F1 F2 F3 F4 F5 F6  
M1 M2 M3  
S1 S2 S3



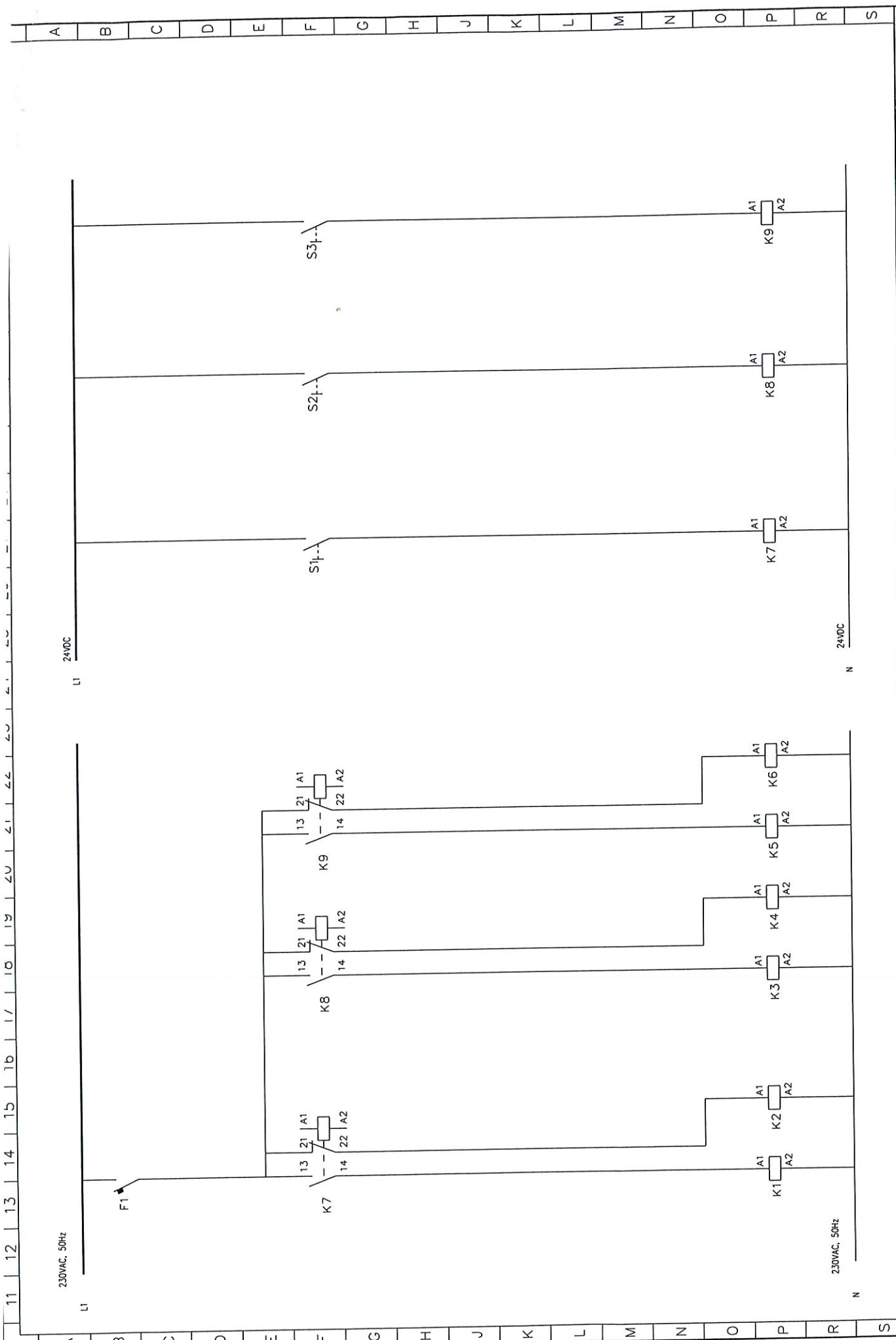
A B C D E F G H J K L M N O P R S



11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100

Suunn. /12.5.2010		Kokonaisuus	Sähköposito	Työnnumero
Piirt.	TW	Lehti	Piirustusnumero	SÄH
Tark.	TW	2/2		
Päävirtapiiri				

A muutos  
B muutos  
C muutos



D muutos	
E muutos	
F muutos	
A muutos	
B muutos	
C muutos	

Ohjousvirtapiiri		Sähköpositio		Työnumero	
Suunn. /12.5.2010		Kokonaisuus		Piiustusnumero	
Pirt. TW		Lehti TW		1/1	
Tark.				SÄH	