TASASÄHKÖYHTEYS OHJATTAVILLA SILLOILLA

Jani Salmi

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2014
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehto

SALMI, JANI:
Tasasähköyhteys ohjattavilla silloilla

Opinnäytetyö 43 sivua, joista liitteitä 9 sivua
Huhtikuu 2014

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli rakentaa kahdella ohjattavalla sillalla tasasähköyhteys, tutkia käytettävien laitteiden toimintaa ja kehittää laitteistolla tehtävä opiskelijatyö työohjeineen.

Opinnäytetyön taustalla oli tarve löytää vaihtoehto Sähkövoimatekniikan laboratoriotyöt -opintojaksolla tehtävälle tasasähkövoimansiirtotyölle. Vaihtoehtoa tarvittiin, kun todettiin, ettei nyt käytössä olevia tyristoriohjattuja tasasuuntaussiltoja saa enää niin helposti. Nykyään saa helpommin ohjattuja siltoja AFE-sovelluksella varustettuna. Tällaisia Vaconin laitteita käytettiin ja tutkittiin tässä opinnäytetyössä. Laitteille rakennettiin kytkennät ja tutkittiin, miten sähkövoimatekniikan laboratoriovälineillä saadaan työ suoritettua ja tarvitaanko lisää välineistöä. Opinnäytetyöraportin alussa on esitelty työhön liittyvä teoria.

Hankitut laitteet toimivat odotetusti ja haluttuun päämäärään päästiin. Työ mukautui hyvin laboratorioympäristöön sillä poikkeuksella, että välineisiin tarvitsi hankkia kolme kontaktoria lisäksi. Ainoa ongelma ilmeni käytössä olevissa vikavirtasuojissa. Laitteisto tarvitsi suojaerotetun ratkaisun, kun vikavirtasuojaa haluttiin käyttää. Työssä rakennettu laitteistolle koteloita vaan koteloinnille on vain ehdotettu ratkaisut.

Asiasanat: AFE, Vacon, tasasähkövoimansiirto

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical Engineering
Option of Electrical Power Engineering

SALMI, JANI:
A DC-link With Controlled Active Bridges

Bachelor's thesis 43 pages, appendices 9 pages
April 2014

The aim of this thesis was to build a DC-link with two controlled active bridge, research the function of the devices and to make a student work where the devices is used.

The motive for this thesis was the need for an alternative solution for a HVDC-link student work made in laboratory works of power engineering –study module. This need for an alternative work came up when it was discovered that thyristor bridges that are currently being used in laboratory are hard to obtain and expensive. Nowadays it is easier to obtain controlled active bridges with the AFE-application. Vacon devices of this kind were also used and studied in this thesis. The aim of the work was to build the necessary wirings for the devices and to study whether it was possible to complete the work with the available equipment in the power electric laboratory and if there was a need for more equipment.

The results showed that the provided devices acted as expected and the desired goal was reached. The work adapted to laboratory environment well with that exception that three more contactors are needed to be purchased to the equipment found in the laboratory. The only problem that occurred was with the residual current circuit breakers that were used in the laboratory. The installation required isolated solution when it was necessary to use a circuit breaker. There was no time to build casings for the devices so only the suggestions for casings were given.

Key words: AFE, Vacon, HVDC-link

SISÄLLYS

1 JOHDANTO 5
2 TASASÄHKÖVOIMANSIIRTO 6
3 ACTIVE FRONT END 9
3.1 A.F.E.:n toiminta 10
3.2 IGBT 15
4 TASASÄHKÖYHTEYDEN RAKENTAMINEN 18
4.1 A.F.E.:n tutustuminen 18
4.2 Testikytkennät 18
4.2.1 Ensimmäinen osa 19
4.2.2 Toinen osa 20
4.2.3 Kolmas osa 21
4.3 DC Droop 27
4.4 Tasasähkövoimansiirtotyö 28
4.4.1 Kotelointi 28
5 POHDINTA 32
LÄHTEET 33
LIITTEET 34
Liite 1. AFEn yksipuoleinen kytkentä 34
Liite 2. Tasasähköyhteyden lopullinen kytkentä ilman mittauspisteitä 35
Liite 3. AFE1:n sisääntulojen ja sisäisen releen kytkennät 36
Liite 4. AFE2:n sisääntulojen ja sisäisen releen kytkennät 37
Liite 5. Tasasähkövoimansiirtotyöohje 38

1 JOHDANTO

Tehonsiirto kahden eritaajuisen vaihtosähköverkon välillä onnistuu käytännössä ainoastaan tasasuunnatulla ja uudelleen vaihtosuunnatulla sähköllä. Myös merenalaisissa sähkönsiirtokaapeleissa käytetään siirrossa tasasähköä, koska tasavirralla on vähemmän loistehoa ja tasasähkön siirtoon tarvitaan vain yksi tai kaksi kaapelia. Kun puhutaan kahden maan välisestä sähkönsiirrosta, on mm. Suomen ja Venäjän välillä käytössä tasasähköyhteys. Tähän kahden maan väliseen tasasuuntaukseen on tällä hetkellä käytössä kahta tekniikkaa: verkkokommutoivaa suuntaajaa tai jännitelähdesuuntaajaa, joista verkkokommutoivassa hyödynnetään tyristorisiltoja.

Tähän tyristorisilloilla rakennettuun tasasähköyhteyteen perustuu Tampereen ammattikorkeakoulun Sähkövoimatekniikan laboratoriotyöt -opintojaksolla tehtävä tasasähkövoimansiirtotyö. Käytössä on vanhat sillat, jotka pitää uusia tai huoltaa pian. Uusia laitteita on vaikea löytää, joten ne pitää rakentaa. Vaihtoehtoisesti työ voidaan korvata muulla laitteistolla ja tähän laitteistoon on kaavailtu ohjattavia siltoja.

Eräs tapa tasa- ja vaihtosuuntaukseen on suorittaa se aktiivisilloilla. Näissä tapauksissa hyödynnetään eristetyllä hilarakenteella varustettuja bipolaaritransistoreita ja niistä rakennettuja suuntaussiltoja. Tällaisia siltoja on huomattavasti helpompi löytää sillä perinteisistä taajuusmuuttajista saadaan oikealla sovelluksella juuri haluttu silta.

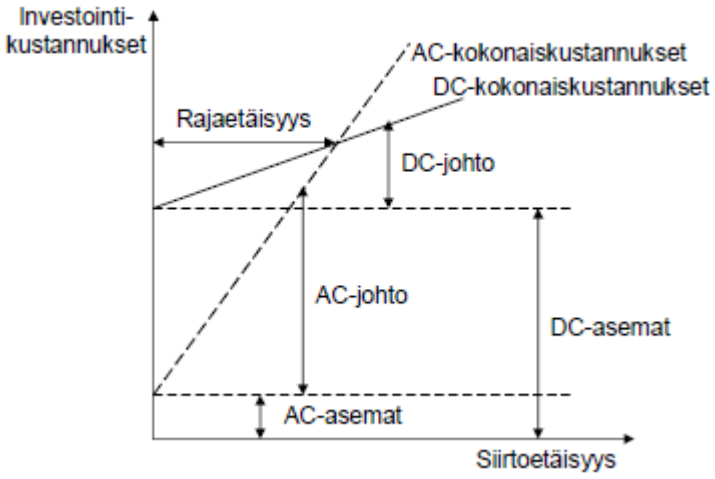
2 TASASÄHKÖVOIMANSIIRTO

Perinteisin tapa sähkönsiirrossa on käyttää vaihtosähköä. Tätä ratkaisua suositaan myös eniten. Vaihtosähkönsiirrossa siirtotehoa ei tarvitse erikseen säätää sillä sen suuruus määräytyy itsestään, koska johdon teho on suoraan verrannollinen johdon siirtokapasiteettiin. Siirtokapasiteetti määräytyy vaihtosähköverkon osalta sen johtimien termisen kuormitettavuuden tai käyttövarmuuden mukaan.
Tasasähköyhteydessä maksimiteho tulee käytettävien laitteiden termisen kapasiteetin ja valitun jännitteen mukaan. Tasasähköyhteys tarvitsee tehonsäätöön säätöjärjestelmän. Tämä johtuu siitä, että johdon päiden välillä oleva jännite-ero synnyttää virran, mikä on kääntäen verrannollinen siirrettävän välin resistanssiin. Säädössä ei tosin voida käyttää jännitettä sen aiheuttaman jännite-eron ja täten myös siirtotehon voimakkaan kasvun takia. Nykyään käytettävissä olevissa tasasähkövoimansiirtoratkaisuissa verkkokommutoivan yhteyden tehonsäätö hoidetaan säätämällä jännitettä vaihtosuuntaajalla ja virtaa tasasuuntaajalla. (Elovaara ja Haarla 2011, 297-298.)

Tasasähköyhteyden mahdollistaminen vaatii yhteysjohtimen kumpaankin päätyyn suuntaaja-aseman. Suuntaaja-asema suuntaa nimensä mukaisesti vaihtosähkön tasasähköksi ja toisinpäin. Käytössä on kahdenlaisia suuntaajia: virtalähdesuuntaajia ja jännitelähdesuuntaajia. Näistä virtalähdesuuntaajilla varustettuja tasasähköyhteyksiä kutsutaan verkkokommutoiviksi ja niissä virran suunta ei voi vaihtua. Jännitelähdesuuntaajat ovat itsekommutoivia ja niissä jännitteen napaisuus pysyy samana. Muun muassa näiden asemien takia tasasähköyhteydet ovat vaihtosähköyhteyksiä kalliimpia. Vaikka tasasähköyhteyden siirtokaapelit eivät kulutakaan loistehoa, kuluu sitä suuntaaja-asemien käytettävissä olevissa tehoelektroniikan komponenteissa melko paljon. Verkkokommutoivan yhteyden nyrkkisääntönä on, että yhteys kuluttaa yleisillä tyristorisillan ohjauskulman arvoilla noin puolet pätötehon arvosta loistehoa. (Elovaara ja Haarla 2011, 298-299, 321.)

Kun tarvitsee liittää kaksi eritaajuista vaihtosähköverkkoa yhteen, on tasasähköyhteys ainoa vaihtoehto tähän tarkoitukseen. Myöskään erilaisella taajuussäädöllä varustettuja vaihtosähköverkkoja ei voida yhdistää suoraan keskenään vaan on yhdistäminen tehtävä tasa- ja vaihtosuuntauksella. Tällein säästytään vaihtosähköyhteydessä käytettävien johtimien liialliselta kuormitukselta satunnaisten kuormitusvaihteluiden takia. Pitkissä kaapeliyhteyksissä tasasähkön käyttö tehonsiirrossa tulee halvemmaksi ja paremmaksi kuin

vaihtosähköyhteys (kuvio 1). Tämän syynä on vaihtosähköyhteyden vaatima useampijohtimiset kaapelit. Vaihtosähköyhteydessä kaapelin pituuden kasvaessa kasvaa myös kaapelin kapasitiivinen virta. Tietyssä pisteessä koko kaapelin siirtokapasiteetti menee juuri tämän virran kuljettamiseen, minkä takia pitkiä siirtoyhteyksiä ei voida suorittaa vaihtosähköllä. Tästä syystä myöskään suurjännitteellä (≥100 kV) ei kaapelointi ole kannattava investointi kaapelien jäädessä liian lyhyeksi kapasitiivisen varausvirran viedessä pitemmillä matkoilla koko siirtokapasiteetin. Kapasitiivinen loisvirta voidaan kompensoida kaapelin varrelle asennettavilla kompensointikeloilla, mutta liian suurilla kapasitiivisilla varausvirroilla niitä jouduttaisiin sijoittamaan niin tiheään, ettei se ole enää kannattavaa. Myöskään merikaapeleille ei voida kompensointia tehdä, joten ainoa vaihtoehto pitkille meriyhteyksille on tasasähköyhteyden käyttö. (Elovaara ja Haarla 2011, 301-302.)



KUVIO 1. DC-AC investointikustannukset siirtoetäisyyden funktiona (Partanen 2011, 24.)

Tasasähköyhteydellä voidaan kuitenkin katsoa olevan enemmän etuja kuin haittoja. Etuina tasasähköyhteydellä on:

- Eritaajuisten vaihtosähköverkkojen yhtenäinen käyttö
- Siirtotehon riippumattomuus taajuudesta tai vaihesiirrosta
- Tehon nopea säätö
- Ympäröivän maaston hyödyntäminen virran paluureittinä
- Kapasitiivisen virran puuttuminen käytetyissä johtimissa
- Tasasähköyhteydessä tarvittavien johtimien pienempi lukumäärä
- Oikosulkuvirtojen kasvamatta jääminen vaihtosähköverkon puolella (Partanen 2011, 23.)

Haittoja tasasähköyhteydessä ovat:

- Suuntausasemien kallis hinta
- Suuntaajien aiheuttamat yliaallot
- Monopolaaristen yhteyksien aiheuttamat korroosiot
- Tasavirran katkaisu

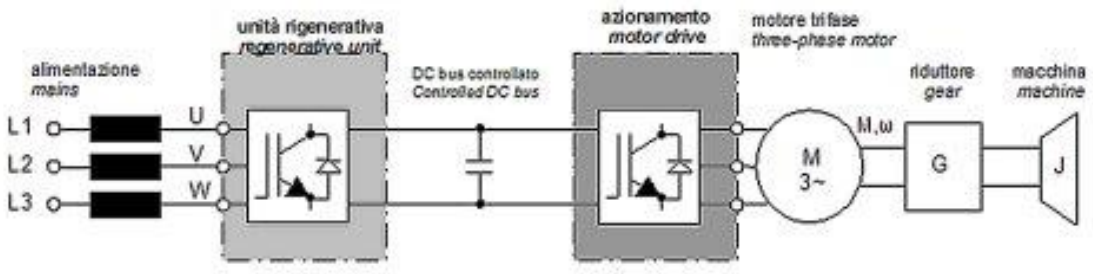
(Partanen 2011, 32.)

3 ACTIVE FRONT END

Active Front End on nimitys tasasuuntaukselle, missä suuntaus toteutetaan aktiivisilla komponenteilla (IGBT).

AFE-teknologiaa käytetään vähentämään harmonisten yliaaltojen määrää tasasuuntauksessa. Normaaleihin 6-pulssisiltoihin verrattuna tämä on suurin hyöty aktiivisessa tasasuuntauksessa. Normaalit 6-pulssisillat synnyttävät yliaaltoja, mitkä aiheuttavat 30–100 prosentin harmonisia virtasäröjä. AFE-käytöt luovat käänteisiä harmonisia aaltoja, jotka eliminoivat normaalin 6-pulssisillan aiheuttamia harmonisia yliaaltoja. (Kelly, n.d.)

Monissa moottorikäytöissä hyödynnetään AFE-teknologiaa sen suoman jarrutusedun takia. Siinä, missä normaalisti jarrutettava teho käytetään pois jarruvastuksissa, saadaan AFE:lla rakennetussa moottorinohjauksessa jarrutettava teho ajettua takaisin verkkoon päin. Kuviossa 2 on periaatteellinen kytkentä kahdella IGBT-sillalla rakennettuun moottorinohjaukseen. Kytkennän tarkoituksena on moottorin jarrutustehon ohjaaminen takaisin verkkoon. (A.F.E. characteristics**,** n.d.)



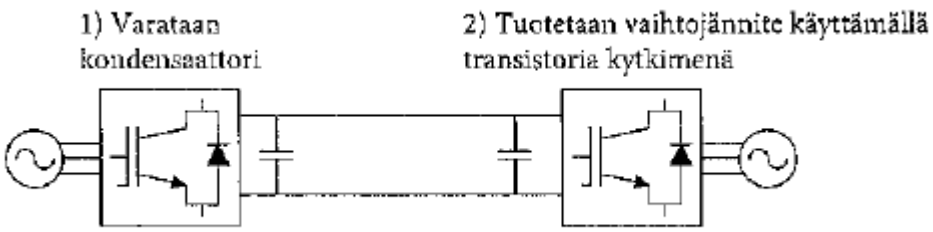
Kuvio 2. AFE-kytkentä moottorinohjauksessa (A.F.E. characteristics, n.d.)

Etuja IGBT-silloilla varustetulla jarrutuskytkennällä normaaliin jarrutukseen verrattuna on mm.

- Energian säästäminen
- Tasasähköyhteyden ohjaus
- Vähäharmoninen virta
- Vähäiset häviöt (lämpenemä pienempi)
- Loistehon kompensointi

(A.F.E. characteristics, n.d.)

Tasasähkövoimansiirron yhteydessä IGBT-silloilla toteutetusta tasasähköyhteydestä puhutaan jännitelähdesuuntaajasta. Jännitelähdesuuntaajan napaisuus ei vaihdu vaan tehon suunta vaihdetaan vaihtamalla virran suuntaa. Kuviossa 3 on kuvattu IGBT-silloilla toteuten tasasähköyhteyden periaatteellinen rakenne.

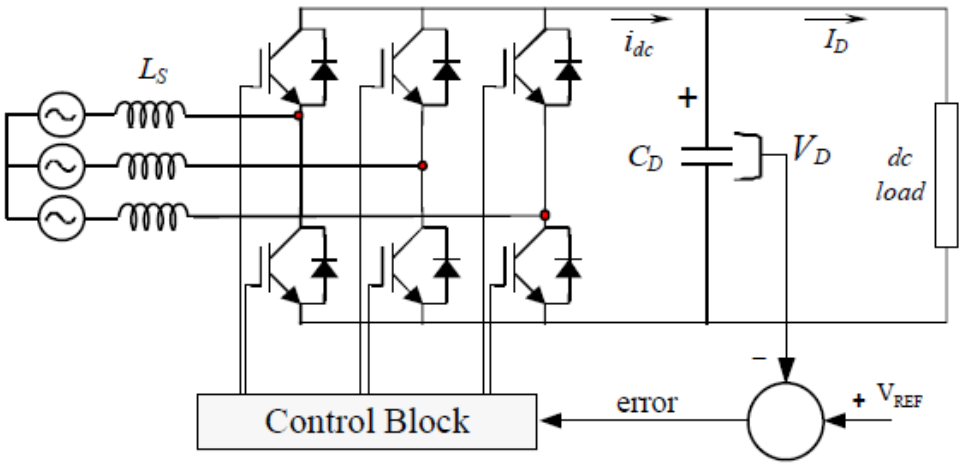


Kuvio 3. IGBT-silloilla toteutettu tasasähköyhteys. (Elovaara ja Haarla 2011, 325.)

Vacon käyttää AFE-nimitystä nelikvadranttisista taajuusmuuttajistaan, joissa molemmat suuntaajat ovat aktiivisia. Käytettävät tehopuolijohteet ovat IGBT-transistoreita, joiden avulla virta voi kulkea verkossa molempiin suuntiin. (Laiti 2010, 10)

3.1 A.F.E.:n toiminta

Perus toimintaperiaate jännitelähdesuuntaajalla (tai A.F.E.:lla) sisältää tasasähköpuolen jännitteen ylläpitämisen halutussa arvossa käyttäen kuvion 4 mukaista takaisinkytkentää. Saavuttaakseen tämän toiminnon tasasähköpuolen jännite mitataan ja verrataan referenssijännitteeseen V_{REF}. Vertailusta saatua eroarvosignaalia käytetään ohjaamaan tasasuuntauksen kuutta venttiiliä päälle ja pois. Tällöin teho voi kulkea vaihtosähkölähteelle tai -lähteeltä tasasähköyhteyden jännitevaatimuksien mukaan. Tasasähköpuolen jännite V_D mitataan kondensaattorista C_D.

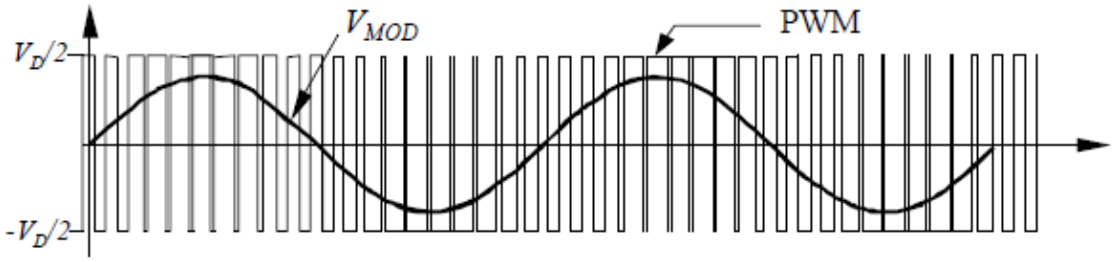


Kuvio 4. Jännitelähdesuuntaajan toimintaperiaate (Dixon, 33)

Kun virta I_D on positiivinen (tasasuuntaus), kondensaattori C_D on purkautuneena ja eroarvosignaali pyytää ohjauslohkolta (Control Block kuviossa 4) lisää tehoa vaihtosähköpuolelta. Ohjauslohko ottaa tehon lähteestä luomalla sopivan pulssinleveysmodulaatiosignaalin (PWM-signaali) kuudelle venttiilille. Tällöin saadaan enemmän virtaa kulkemaan vaihtosähköpuolelta tasasähköpuolelle ja kondensaattorin jännite palautuu. Käänteisesti, kun I_D on negatiivinen (vaihtosuuntaus), kondensaattori on ylilatautunut ja eroarvo pyytää ohjausta purkamaan kondensaattoria ja palauttamaan tehon vaihtosähköpuolelle.

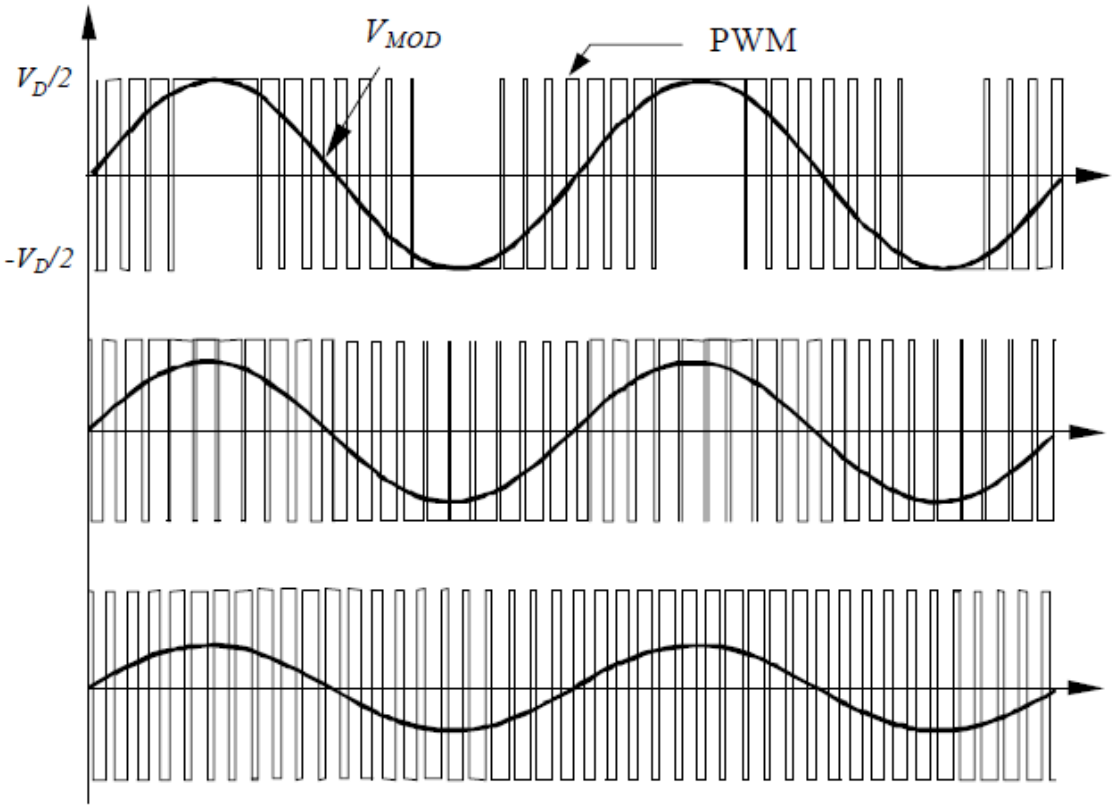
PWM-ohjaus pystyy pätötehon lisäksi käsittelemään loistehoakin mahdollistaen tämäntyyppisen tasasuuntauksen korjaamaan tehokerrointa. Sen lisäksi vaihtovirran aaltomuodot voidaan pitää lähes sinimuotoisena pienentämällä harmoonisia aaltoja syöttöpuolelta.

Pulssinleveysmodulaatio sisältää venttiilien avaamista ja sulkemista valmiin mallin mukaan. Tämä malli voi olla sinimuotoista jännitettä tai virtaa. Yhden vaiheen modulaatio voi olla esimerkiksi kuvion 5 mukaista. Tämä PWM kuvio on jaksollinen aaltomuoto, minkä modulaatiosignaali on mallin kanssa saman taajuinen jännite. Tämän modulaatiosignaalin amplitudi (V_{MOD} kuviossa 5) on verrannollinen myös mallin amplitudiin.



Kuvio 5. PWM kuvio ja sen modulaatiosignaali V_{MOD} (Dixon, 34)

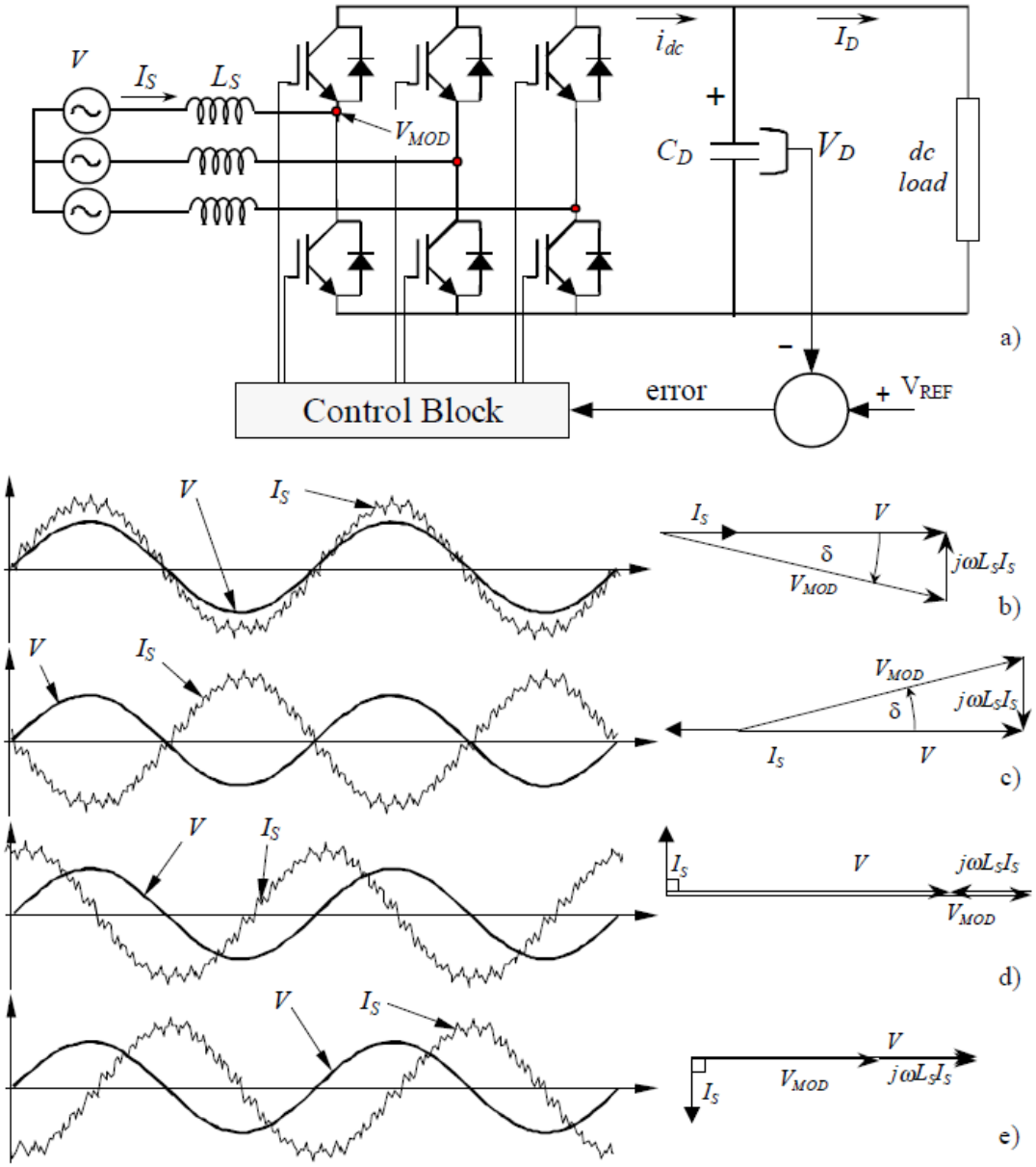
Jotta tasasuuntaus toimii kunnolla, pitää PWM kuvion luoda teholähteen kanssa saman taajuinen modulaatiosignaali V_{MOD}. Muuttamalla signaalin amplitudia, ja sen vaihesiirtoa lähteeseen nähden, voidaan tasasuuntaajaa ohjata toimimaan neljässä kvadrantissa: tasasuuntaus kapasitiivisella tehokertoimella, tasasuuntaus induktiivisella tehokertoimella, vaihtosuuntaus kapasitiivisella tehokertoimella ja vaihtosuuntaus induktiivisella tehokertoimella. Vaihtamalla kuvion modulaatiota, kuten esimerkiksi kuviossa 6 on näytetty, vaihtuu V_{MOD}:n voimakkuus. Siirtämällä PWM kuviota muuttuu vaihe-ero.



Kuvio 6. V_{MOD}:n muutos PWM kuviolla (Dixon, 34)

V_{MOD}:n ja lähdejännite V:n vuorovaikutus nähdään vektoridiagrammista. Tämä vuorovaikutus mahdollistaa tämän tasasuuntauksen nelikvadrantti mahdollisuuden ymmärtä-

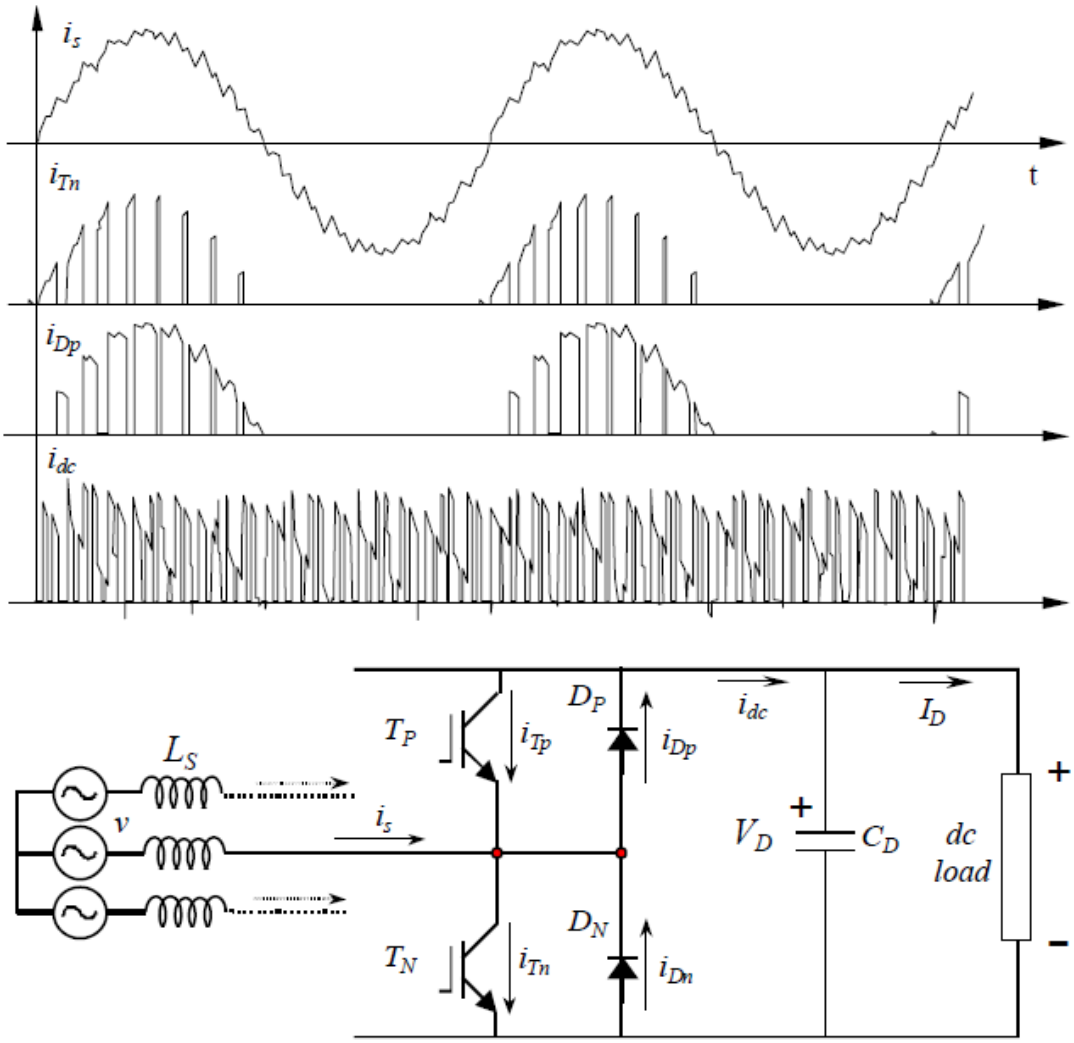
misen. Kuviossa 7 on esitettynä seuraavat toiminnot: tasasuuntaus resistiivisellä tehokertoimella, vaihtosuuntaus resistiivisellä tehokertoimella, kondensaattori ja kela.



Kuvio 7. Pakkokommutoidun tasasuuntauksen nelikvadranttikäyttö: a) PWM-pakkokommutoitu tasasuuntaus, b) tasasuuntaus resistiivisellä tehokertoimella, c) vaihtosuuntaus resistiivisellä tehokertoimella, d) kondensaattoritoiminto tehokertoimella 0, e) kelatoiminto tehokertoimella 0 (Dixon, 35)

Kuviossa 7 I_S on lähdevirran i_s neliöllinen keskiarvo. Tämä virta kulkee puolijohteiden läpi kuvion 8 mukaisesti. Positiivisella puolijaksolla tasasähköpuolen negatiivisille puolelle kytketty transistori T_N on käännettynä auki ja virta i_s lähtee kulkemaan transistorin T_N läpi (i_{Tn}). Virta palaa lähteelle ja tulee takaisin venttiileille sulkien virtakierron toisella vaiheella ja kulkien tasasähköpuolen negatiiviselle terminaalille kytketyn diodin läpi.

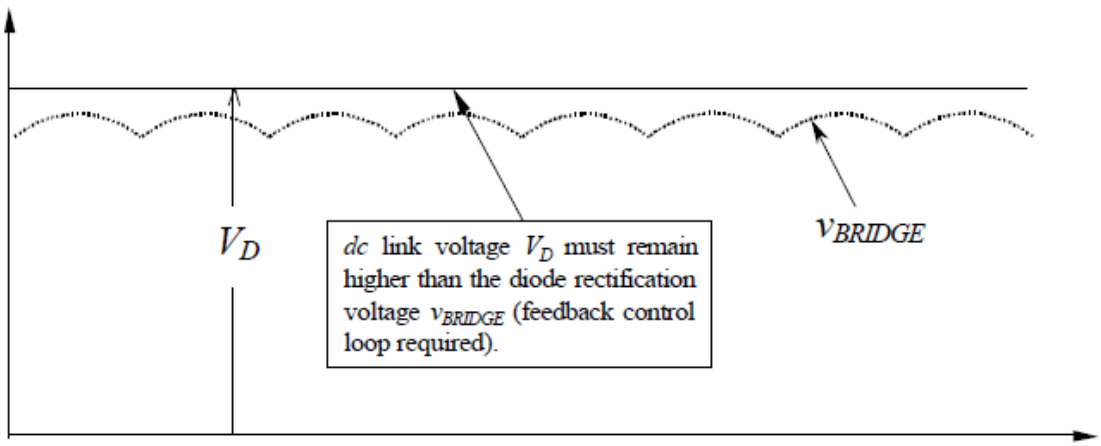
Virta voi myös kulkea tasasähköpuolen kuorman läpi (käänteisesti) ja palautua tasasähköpuolen positiiviselle puolelle kytketyn transistorin läpi. Kun transistori T_N on käännettynä kiinni, virran kulkureitti on tukittu ja virta alkaa kulkemaan DC-puolen positiiviselle terminaalille kytketyn diodin D_P läpi. Tämä virta (i_{Dp} kuviossa 8) menee suoraan DC-puolelle auttaen tasasähkövirran i_{dc} luomisessa. Virta i_{dc} varaa kondensaattorin C_D ja mahdollistaa tasasuuntaajan tuottaa tasasähkötehoa. Kelat L_S ovat tärkeässä asemassa tässä prosessissa. Ne luovat indusoituneen jännitteen, mikä mahdollistaa diodin D_P johtumisen. Samantyylinen operaatio tapahtuu negatiivisellakin puolijaksolla transistorilla T_P ja diodilla D_N (kuvio 8).



Kuvio 8. Virran aaltomuodot lähdöllä, venttiileillä ja tasasähköpuolella (Dixon, 36)

Vaihtosuuntauksessa virran reitit ovat erilaiset, koska transistorien läpi kulkeva virta tulee pääosin tasasähköpuolen kondensaattorilta C_D. Tasasuuntauksessa piiri toimii kuten Boost-hakkuri ja vaihtosuuntauksessa piiri toimii kuten Buck-hakkuri.

Tasasuuntaajan operaation täyden ohjauksen saamiseksi kaikki sen kuusi diodia pitää olla polarisoitu negatiivisesti kaikilla vaihtojännitelähteen hetkellisillä arvoilla. Muuten diodit johtaisivat ja PWM-tasasuuntaus toimisi kuten normaali dioditasasuuntaaja. Tapa pitää diodit estettynä on varmistaa tasasähköpuolen jännitteen olevan suurempi kuin diodien luoman tasajännitteen huippuarvo (kuvio 9). Tällöin diodit pysyvät polarisoituneena negatiivisesti ja ne johtaa vain, kun vähintään yksi transistoreista on käännetty auki ja suotuisat hetkelliset vaihtojännitteen olosuhteet saavutetaan. Kuviossa 9 V_D esittää kondensaattorin tasajännitettä, mikä pidetään suurempana kuin normaali diodisillan luoma tasajännite V_{BRIDGE}. Ylläpitääkseen tätä tilaa tasasuuntaajassa pitää olla takaisinkytkentä ohjaukselle kuten kuviossa 4 on näytetty. (Dixon, 33-37.)



Kuvio 9. Tasajännite PWM-tasasuuntauksen operaatiolle (Dixon, 37)

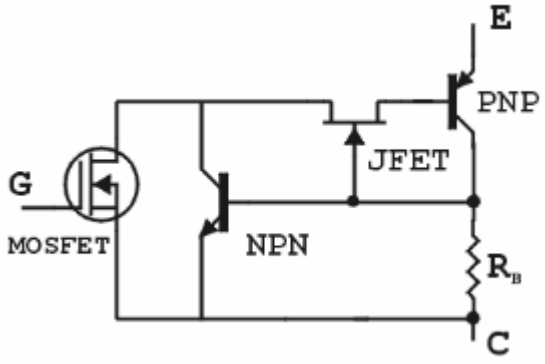
3.2 IGBT

Eristetyllä hilarakenteella varustettuja bipolaaritransistoreita kutsutaan IGBT nimikkeellä. Lyhenne tulee englanninkielisestä nimestä Insulated Gate Bipolar Transistor. Kyseinen transistori on kehitetty pintakanavatransistorin (MOSFET) jäädessä epäkelpoiseksi suurien tehojen ohjaamiseen. Ohjaaminen IGBT:llä saadaan suoritettua ilman suurempaa ohjaustehoa IGBT:n kanavatransistorin hilalta. Itse kanavatransistoriosuus IGBT:ssä ohjaa bipolaaritehotransistoria. Nämä kaksi yhdessä muodostavat siis IGBT-kokonaisuuden. Ohjauksessa IGBT:n MOSFET-osan hilalle tuodaan jännite, mikä kytkee komponentin päälle. Kun komponentin ohjaama virta halutaan katkaista, on hila kytkettävä estotilaan tuomalla sille estotilan vaatima jännite. Kriittisimmät pisteet komponentin toiminnassa ovat kohdat, missä virta nousee nopeasti päälle kytkennän yhtey-

dessä niin, ettei kollektorin ja emitterin yli vaikuttava jännite ole ehtinyt laskea riittävästi. Vastakkainen tapahtuma ohjauksen yhteydessä tapahtuu, kun virtaa katkaistaan ja kollektori-emitteri –jännite nousee ilman virran sammumista. IGBT:n ohjautuminen auki-tilasta kiinni-tilaan on hidas sen varaustenkuljettajien ainoasta poistumiskeinosta, rekombinaatiosta, johtuen. Varaustenkuljettavat voidaan purkaa takaisin kollektorille vastuksen kautta. Jos purkuvastusta ei käytetä, voidaan IGBT:n ohjaus suorittaa hilamuuntajaa käyttäen, mutta tällöin tarvitaan hilavastusta ja purkudiodia. (Esala, 6; Hietalahti 2011, 17)

IGBT:n etuja ovat pintakanavatransistoria pienemmät häviöt, kytkentätaajuus ja helppo ohjattavuus. Suurienkin tehojen ohjaamismahdollisuus IGBT:llä on nykyään edistänyt niiden käytön yhä useammissa käyttökohteissa. Komponentit kestävät jopa 3000 V:n jännitteen ja niitä pystytään ohjaamaan suurillakin taajuuksilla. Vaikka IGBT on hyödyllinen komponentti monessakin tilanteessa, on se silti melko vähäisessä käytössä. Perinteiset tyristorit ovat halvempia ja käyttökohteittain edelleen optimaalisin ratkaisu. (Hietalahti 2011, 17)

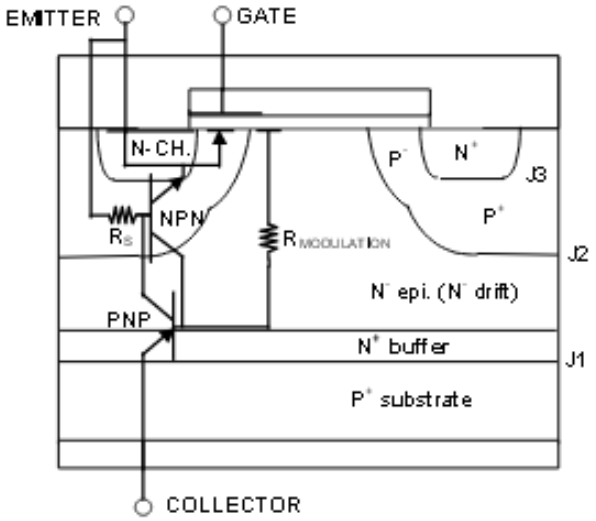
AFE-suuntauksessa kuitenkin IGBT on ainoa vaihtoehto sen mahdollistaman aktiivitoiminnon ansiosta. IGBT:llä tehtävissä siltakytkennöissä on kuitenkin otettava huomioon, että kytkentä tarvitsee diodin käyttämisen. Tämä johtuu diodin puuttumisen bipolaaritransistorista (pl. suuren tehon, kuten 1200 V:n, IGBT:t). (Niiranen 1997, 99-100.)



Kuvio 10. IGBT:n sijaiskytkentä (Sattar 2001, 3.)

Kuviossa 10 on kuvattuna IGBT:n sijaiskytkentä. Kytkennästä käy ilmi edelläkin mainittu IGBT:n koostuminen pintakanava- (MOSFET) ja bipolaaritransistoriosista (NPN, PNP). Hila on merkitty kuviossa G:llä, emitteri E:llä ja kollektori C:llä samaan tapaan kuin suurin osa fyysisistä komponenteistakin. Lisäksi kuviossa on kuvattuna purkuvastus R_B. Rakenteellinen kuvaus IGBT:stä näkyy kuviossa 11. Kuviossa on merkattuna eri

aineet (P^-, P^+, N^-, N^+), jotka toimivat kanavina virtateille jännitteen ylittäessä tarvittavat kynnysjännitteet yllä mainituissa ohjaustilanteissa. (Sattar 2001, 11.)



Kuvio 11. IGBT:n sisäinen rakenne (Sattar 2001, 3.)

4 TASASÄHKÖYHTEYDEN RAKENTAMINEN

4.1 A.F.E.:n tutustuminen

Työ aloitettiin tutustumalla Vaconin AFE-laitteistoon. Työssä käytettiin kahta Vaconin INU (Invertet Unit) -taajuusmuuttajaa. Käytettävä laitteisto oli Vaconin puolelta valmiiksi varustettu ARFIFF02V136-ohjelmistolla, mikä on AFE-sovellus.
Tasa- ja vaihtosuuntauksista aiheutuvien yliaaltojen takia taajuusmuuttajien seuraksi piti myös hankkia suotimet. Myös nämä toimitettiin Vaconilta heidän ehdottamien speksien mukaisina.

Ennen kuin voitiin aloittaa kytkentöjen tekeminen, piti tutustua sovellusohjeisiin. Laitteiston mukana toimitettiin yleissovellusohjeet, jotka pätivät yleisellä tasolla taajuusmuuttajissa käytettäviin sovelluksiin sekä myös taajuusmuuttajien omat ohjeet, joista on apua laitteiston rautapuolen ongelmiin. Suoraan ei siis tarjottu AFE-sovellusohjetta vaan kyseinen ohje oli itse haettava. Vaconin Internet-sivuilta löytyi onneksi manuaali ohjelmistolle ARFIFF02V134 (Vacon Oyj, n.d.). Kyseisen ohjelmiston tunnuksen loppuosa eroaa kuitenkin käytetyn ohjelmiston tunnuksesta. Tunnuksen ”V” viittaa versioon, joten kyseessä oli vanha versio. Manuaalin käytettävyys uudemman version ohjelmistossa oli tarkistettava Vaconin edustajalta. Lyhyen sähköpostitiedustelun jälkeen selvisikin, että version 134 ohjetta voidaan käyttää myös versiossa 136.

4.2 Testikytkennät

Testikytkennät suoritettiin pääosin kolmessa eri osassa. Ensimmäisessä osassa keskityttiin vain saamaan yksi AFE käyttöön ja päälle. Toisessa osassa käyttöön lisättiin myös toinen AFE suotimineen, jolloin mahdollistettiin tasasähköyhteys. Kolmannessa osassa kytkennät muutettiin virhetilojen eliminoimisen takia sekä lisättiin turvallisuustekijöitä. Kytkentöjen suunnittelussa ja tukena hyödynnettiin Vaconin tarjoamia NX_AFE_Contactor –piirikaavioita, joiden kytkennöillä saadaan ohjattua moottoria AFE-INU –ratkaisulla. Suoraan kyseinen kytkentä ei sovellu siis AFE-AFE –käyttöön. Suunnittelussa otettiin myös huomioon työn mahdollistaminen opiskelijatyöksi.

4.2.1 Ensimmäinen osa

Ensimmäisen kytkennän yhteydessä mietittiin, miten suoritetaan välipiirin lataus. Tähän tarkoitukseen tarvittiin siis erillistä tasasuuntausta. Käytössä olevan laitteiston puitteiden mukaan päädyttiin käyttämään koululta löytyvää siirrettävää sähkölähdevaunua, jossa oli myös tasasuuntausmahdollisuus. Tämä oli hyvä ratkaisu myös senkin takia, että vaunussa oli säädettävä jännite, jolloin latausjännitteen sai nostettua rauhallisesti eikä ollut pelkoa liian nopean jännitteenkasvun aiheuttamista virtapiikeistä. Liite 1 sisältää kytkentäkuvan ensimmäisestä osasta.

Kytkentä tarvitsi kontaktorin K1 (liite 2), jolla ohjattiin vaihtojännitepuolen vaiheita. K1 veti vain tilanteessa, kun välipiiri oli latautunut n. 80 % vaaditusta nimellisjännitteestään. Kontaktorin K1 ohjaus suoritettiin AFE:n sisäisellä kontaktorilla RO2 (liite 3), joka puolestaan vaihtoi tilaansa saatuaan tiedon edellä mainitun 80 % tason saavuttamisesta. Tämä mittaus tapahtui siis laitteen sisällä. Lisäksi kontaktorista K1 piti saada tieto laitteelle, että kontaktori on vetänyt. Ilman tätä tietoa laite olisi saanut vikatilan F64 eikä laite lähde käymään tämän vian takia. Tieto kontaktorin vedosta saatiin tuomalla +24 V jännite AFE:n lähdöstä 6 ja viemällä se kontaktorin koskettimien kautta tuloon 14 DIN4. Ensimmäisen osan yhteydessä kytkennöissä käytettiin tätä toimintoa varten kahta kontaktoria vääriksi luultujen kontaktorien koskettimien takia. Myöhemmin selvisi, että kontaktorissa olikin oikea määrä oikeanlaisia koskettimia (neljä sulkeutuvaa), jolloin kahdesta kontaktorista siirryttiin yhteen per puoli.

Välipiirin latauksessa jännite nostettiin sähkölähdevaunulla rauhallisesti vaihejännitteen arvoon 230-240, jolloin tasasuunnattu latausjännite oli lähempänä tarvittavaa nimellisjännitettä. Tällöin sisäinen kontaktori havahtui ja toimi kuten edellä on mainittu. Välipiirin latauduttua AFE lähti päälle ja itse suuntaustoiminto voitiin aloittaa.

Syöttö ensimmäisessä kytkennässä suoritettiin ensin 16 A –jakorasian välityksellä, niin sähkölähdevaunulle kuin AFE:lle. Jakorasia oli varustettu tulolle ja kahdelle lähdölle sekä näiden johdonsuojakatkaisijoilla ja vikavirtakatkaisijalla. Tämä osoittautui ongelmaksi, kun laitteistoon saatiin ensimmäistä kertaa sähköt. Vikavirtasuoja, mikä oli normaali 30 mA:n suojaus, katkaisi jakorasian sähköt AFE:n käynnistyessä. Syyksi pääteltiin AFE:n sisäiset EMC-suotimet ja näiden aiheuttamat virtapiikit. Jakorasiasta jouduttiin luopumaan ja syöttö AFE:lle otettiin suoraan laboratoriotilojen pääkeskukselta sa-

masta pisteestä, mistä projektipisteen sähköpöytäkin saa syöttönsä. Sähkölähdevaunulle syöttö otettiin kyseisestä pöydästä. Tällä kytkennällä saatiin ensimmäinen käynnistys suoritettua ongelmitta. AFE:n syöttöön lisättiin myös pääjännitemittaus indikoimaan jännitteen päällä olemista.

4.2.2 Toinen osa

Toisessa osassa lähdettiin rakentamaan itse tasasähköyhteyttä. Jo rakennetun kytkennän vierelle tuotiin toinen AFE suotimineen ja kytkennät tehtiin täysin samalla lailla kuin edellinenkin paitsi AFE2:n sisääntulokytkennät erosivat hieman (liite 4). Tasasähköyhteys toteutettiin suoralla yhteydellä ilman välissä olevia komponentteja. Kytkentöjen yhteydessä lisättiin mittauksia: syötön pääjännitteelle ja virralle (2. vaiheessa) sekä tasajännitteelle ja –virralle.

Ensimmäisellä kokeilukerralla kytkennöissä oli oikaistu. Suotimien ja syötön väliltä jätettiin kontaktori pois, koska testattiin onnistuuko suora syöttö verkkoon päin. Vaihtosuuntauspuoli kytkettiin siis suoraan sähköpöydän 400 V lähtöön. Kytkettäessä sähköjä päälle toimikin vaihtosuuntauspuoleksi ajateltu AFE tasasuuntaajana sen verran, että sai välipiirin ladattua ja näin ollen käynnistettyä AFE1:n ennen kuin virhekoodi F64 esti AFE2:n toiminnan. Tämän kokeilun jälkeen kytkentään lisättiin kontaktorit myös AFE2:n vaihtosähköpuolelle.

Toisella kytkentäkerralla tapahtui taas kuten ensimmäiselläkin kertaa: AFE2 sai virhekoodinsa ja AFE1:n välipiiri latautui sen verran, että laite ehti käynnistyä. Tällä kertaa vika oli vääränlaisissa kontaktoreissa. Vaiheet 2 ja 3 olivat avautuvilla koskettimilla ja vaihe 1 sekä kontaktoritieto AFE:lle oli sulkeutuvilla. Näin ollen sähköt AFE:lle tuli vaiheilta 2 ja 3 heti, jolloin välipiirin lataus ja kontaktoritieto jäi kokonaan välistä. Tämän havainnon yhteydessä huomattiin myös, että aiemmin käytetyt kaksi kontaktoria olivatkin varustettu aiemmin mainituilla oikeilla koskettimilla, joten kytkentää muutettiin vastaamaan tavoiteltua tilaa. Syöttö tapahtui samasta sähkövaunusta kummallekin laitteelle ja lataus toteutettiin toisella vaunulla.

4.2.3 Kolmas osa

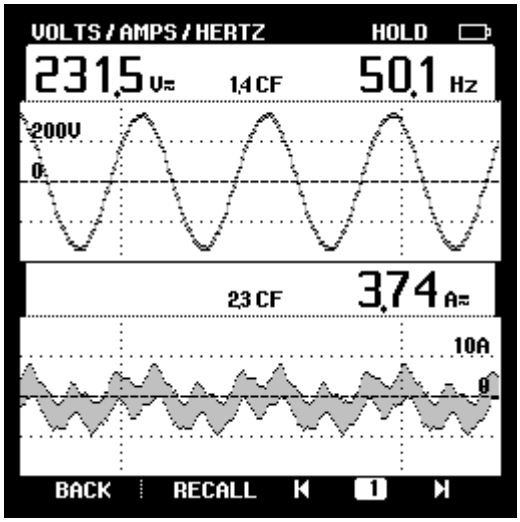
Kun kytkennät oli saatu tehtyä sille mallille, että teho saatiin kulkemaan AFE-laitteiden välillä, alettiin tutkimaan tehojen säätämistä. Säätämiseen tiedusteltiin valmiita ohjeita Vaconin edustajalta, mutta tutkittuamme manuaalin parametrilistausta löysimme vastauksen kysymykseen ennen Vaconin vastausta. Parametria P2.2.1 DC Voltage Ref. säätämällä saadaan tehon suuruus ja suunta valittua. Samalla todettiin myös, että parametrilla P2.2.2 DC Voltage Drooping saadaan tehon säädön vaikutusta muutettua: mitä isompi droop sitä pienempi vaikutus jännite referenssin säädöllä oli. Kuten parametrilistauksesta voidaan todeta, ei P2.2.1 säätöalue ole kovin suuri (105 % - 130 %). Säätötarkkuus on kuitenkin kahden desimaalin tarkkuudella.

Droop säädettiin 20% ennen ensimmäistä tehonsäätöä ja jännite referenssit pidettiin oletusasetuksissa eli 110%. Näin varmistettiin, ettei koneiden välillä lähde tehot nousemaan liikaa sillä tämä oli varsinainen ensimmäinen kerta, kun kummatkin AFE:t ovat suuntauskäytössä. Aikaisemmilla kerroilla laitteet olivat vain päällä, mutteivät käynnissä.

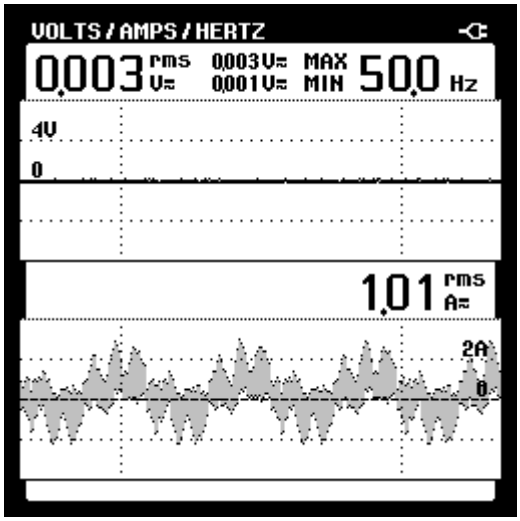
Kolmannen osan ensimmäisellä käyntikerralla kaikki vaikutti toimivan aluksi. Parametreja ei ehditty muuttaa, kun AFE1 sai vikakoodin F3 Earth fault, mikä tarkoitti sitä, että vaihevirtojen summa ei ollut nolla vaan jokin tai jotkin vaiheista sai enempi virtaa kuin toiset. Selvää syytä ei suoraan vialle keksitty, joten testejä jatkettiin normaalisti. Seuraavalla kerralla saatiin jo hieman ohjattua tehoa P2.2.1 säätämisellä, mutta vika F3 ilmestyi jälleen. Tässä vaiheessa alettiin epäilemään, että samaan pisteeseen kytketyt AFE:t ei välttämättä ole hyvä idea niiden aiheuttamien Ripple-ilmiöiden takia. Tämän eliminoimiseen kytkentää muutettiin jälleen. DC-piirin väliin laitettiin suuritehoinen vastus vaimentamaan Ripple-ilmiötä. Lisäksi toinen AFE sai sähkönsä suoraan verkosta siten, että väliin sijoitettiin 16 A johdonsuojakatkaisijat sillä ensimmäiset suojat olisi muuten olleet vasta sähkölaboratorion pääkeskuksella. Toinen AFE taas jätettiin sähkölähdevaunuun kiinni, jolloin näiden kahden laitteen välillä oli hieman verkkoa välissä tasoittamassa lisää Ripple-ilmiötä. Tämän kytkentämuutoksen jälkeen ei vikaa enää ilmennyt.

Tehonsäädön testauksien yhteydessä seurattiin mittareiden arvoja, jolloin nähtiin AFE1:n verkosta ottama teho ja virta, mikä kulki DC-piirissä. Näistä mittauksista otet-

tiin kuvaajat talteen kustakin vaihtuneesta tehonsäädön tilasta. Kuviossa 12 ja 13 on ensimmäisen tehonsäätötilan tulokset. Tässä tilassa parametrien asetukset olivat taulukon 1 mukaiset.



Kuvio 12. AFE1:n verkosta ottama jännite (yläosa) ja virta (alaosa), tilanne 1

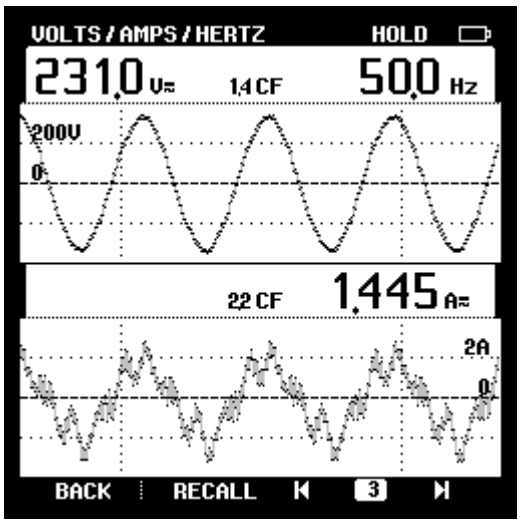


Kuvio 13. DC-piirin virta, tilanne 1

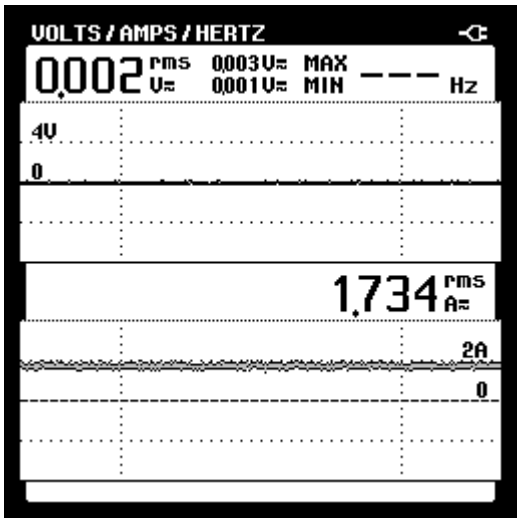
Taulukko 1. Parametriasetukset, tilanne 1

Parametrin tunnus	Parametrin nimi	AFE 1	AFE 2
P2.2.1	DC Voltage Ref.	113 %	110 %
P2.2.2	DC Voltage Drooping	20 %	20 %

Ensimmäiset mittausarvot on ennen virheen F3 korjausta. Kuviosta 13 huomataan ripplen vaikutus virtaan. Tätä lähdettiin tasoittamaan ja tulokset voidaan havaita kuvioista 14 ja 15.



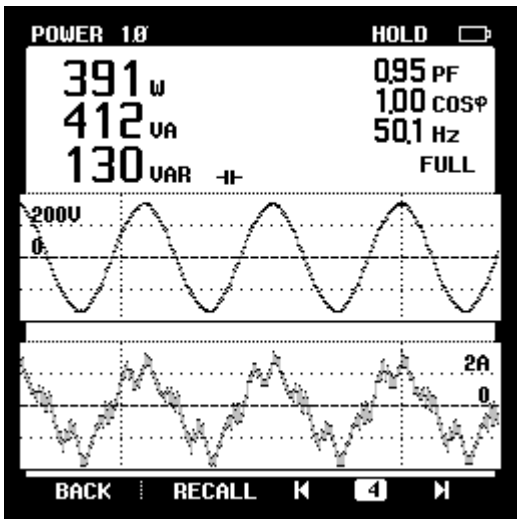
Kuvio 14. AFE1:n verkosta ottama jännite (yläosa) ja virta (alaosa), tilanne 2



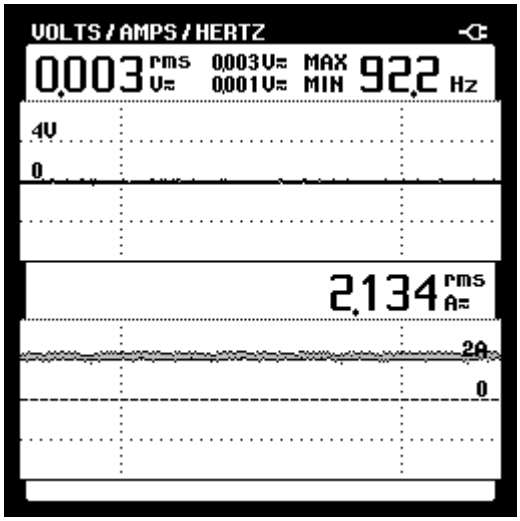
Kuvio 15. DC-piirin virta, tilanne 2

Kytkennän muutos vaikutti huomattavasti, kuten voidaan kuvioista 14 ja 15 todeta. Parametrit olivat edelleen taulukon 1 mukaiset.

Kun päästiin eroon ripplestä, alettiin tehoa säätää kunnolla. Tässä vaiheessa myös todettiin, että on varmaan hyvä käyttää laitteista löytyvää parametrointia tehon rajoittamiseen, jotta pysytään turvallisilla tehoalueilla eikä rikota vahingossa mitään. Tehorajojen parametrit olivat P2.5.2.1 ja P2.5.2.2. Näillä asetettiin rajat tehonsyötölle tasa- ja vaihtosuuntauksessa. Näiden lisäksi muutettiin jännitteen referenssiarvoa AFE2:sta, jolloin saatiin kuvioiden 16 ja 17 mukaisia tehoja siirtymään. Parametriarvot tässä tilassa on listattuna taulukkoon 2.



Kuvio 16. AFE1:n verkosta ottama jännite (yläosa) ja virta (alaosa), tilanne 3

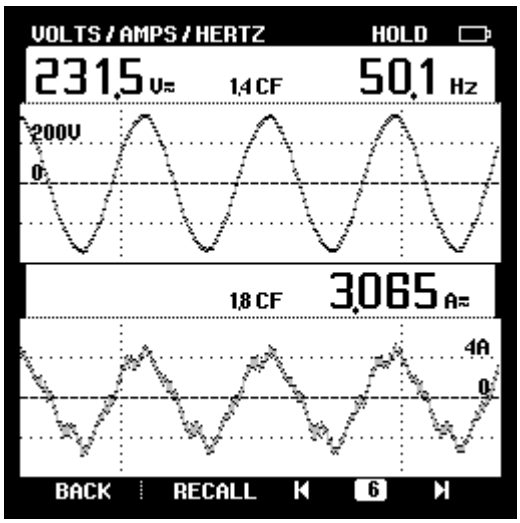


Kuvio 17. DC-piirin virta, tilanne 3

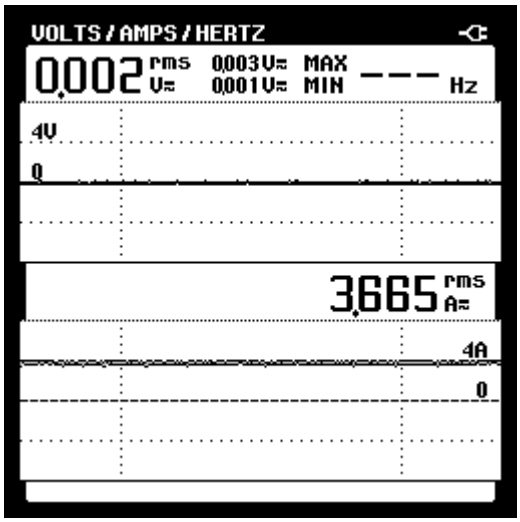
Taulukko 2. Parametriasetukset, tilanne 3

Parametrin tunnus	Parametrin nimi	AFE 1	AFE 2
P2.2.1	DC Voltage Ref.	113 %	106 %
P2.2.2	DC Voltage Drooping	20 %	20 %
P2.5.2.1	OutputPowerLim	100 %	100 %
P2.5.2.2	InputPowerLim	70 %	70 %

Tehon kasvu ei ollut suuri, mikä johtui droopin isosta arvosta. Droopia lähdettiin laskemaan portaittain 2 prosenttiyksikköä kerrallaan. Kuvioissa 18 ja 19 tilanteet, jossa droop on laskettu 6 %:iin.



Kuvio 18. AFE1:n verkosta ottama jännite (yläosa) ja virta (alaosa), tilanne 6



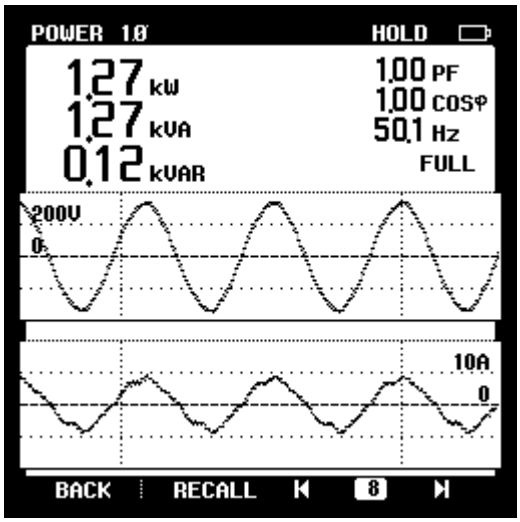
Kuvio 19. DC-piirin virta, tilanne 6

Taulukko 3. Parametriasetukset, tilanne 6

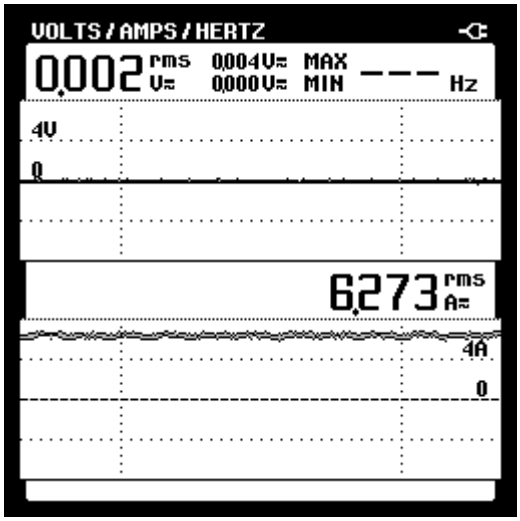
Parametrin tunnus	Parametrin nimi	AFE 1	AFE 2
P2.2.1	DC Voltage Ref.	113 %	106 %
P2.2.2	DC Voltage Drooping	6 %	6 %
P2.5.2.1	OutputPowerLim	100 %	100 %
P2.5.2.2	InputPowerLim	70 %	70 %

Droopia pudottamalla saatiin teho kasvamaan huomattavasti. Tehorajat eivät olleet vielä lähellä, joten tehoa haluttiin nostaa enemmän. Tätä varten droop pudotettiin 4 %:iin, jota alemmas ei kannata mennä. Lisäksi DC-piirin vastusarvoa pudotettiin ja kummankin laitteen jännitteiden referenssiarvojen eroa kasvatettiin. Uudet parametriarvot on

taulukoituna taulukkoon 4. Kuvioissa 20 ja 21 nähdään vaikutukset tehoissa uusilla asetteluilla.



Kuvio 20. AFE1:n verkosta ottama jännite (yläosa) ja virta (alaosa), tilanne 7



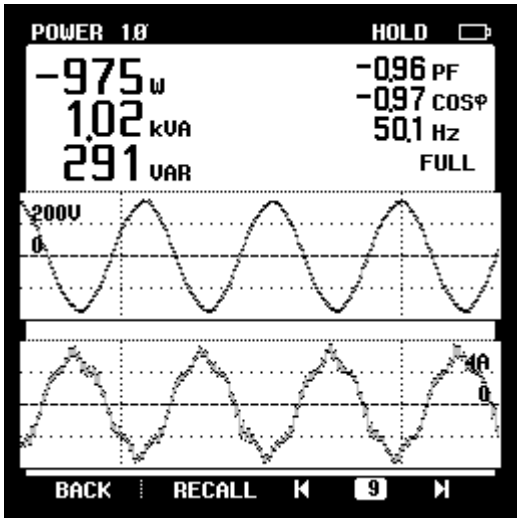
Kuvio 21. DC-piirin virta, tilanne 7

Taulukko 4. Parametriasetukset, tilanne 7

Parametrin tunnus	Parametrin nimi	AFE 1	AFE 2
P2.2.1	DC Voltage Ref.	115 %	105 %
P2.2.2	DC Voltage Drooping	4 %	4 %
P2.5.2.1	OutputPowerLim	100 %	100 %
P2.5.2.2	InputPowerLim	70 %	70 %

Vastusarvon pienentämisestä johtuen rippleä näkyy hieman enemmän. Ei kuitenkaan niin paljon, että se olisi haitaksi. Viimeiset mittausarvot, jotka tallennettiin, olivat tilanteesta, missä testattiin tehon suunnan kääntöä. Tätä varten jännitteen referenssiparamet-

reja vaihdettiin niin, että AFE1:ssä on pienempi referenssi kuin AFE2:ssa. Tilanteesta otettiin mittausarvot talteen vain havainnollistamaan tehon suunnan kääntymistä. Kuvio 22 on kyseisestä tilanteesta ja taulukkoon 5 on kerätty sen hetkiset parametriarvot.



Kuvio 22. AFE1:n verkosta ottama jännite (yläosa) ja virta (alaosa), tilanne 8

Taulukko 5. Parametriasetukset, tilanne 8

Parametrin tunnus	Parametrin nimi	AFE 1	AFE 2
P2.2.1	DC Voltage Ref.	105 %	110 %
P2.2.2	DC Voltage Drooping	4 %	4 %
P2.5.2.1	OutputPowerLim	100 %	100 %
P2.5.2.2	InputPowerLim	70 %	70 %

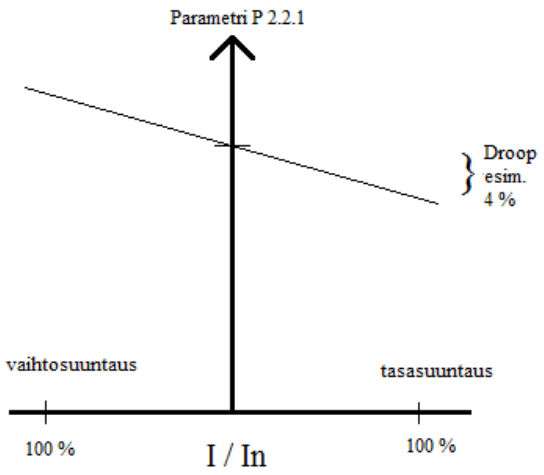
Kuten kuviosta 22 huomataan, teho on negatiivista eli virta kulki mittauspisteessä vastakkaiseen suuntaan.

4.3 DC Droop

Droop on selitetty manuaalissa seuraavasti:

”Kun AFEja käytetään rinnakkain itsenäisessä käytössä, droopia voidaan käyttää virran tasapainottamiseen. DCV-jännitereferenssidroop säädetään prosentteina suhteessa aktiivivirtaan. Esimerkiksi, jos droop on asetettu 3 %:iin ja aktiivivirta on 50 %, silloin DC jännitereferenssiä vähennetään 1,5 %. Droopilla rinnakkaiset laitteet voidaan tasapainottaa säätämällä DC-jännitereferenssiä hieman eri arvoihin”

Tätä selitystä havainnollistamaan tehtiin kuvion 23 mukainen kuvaaja:



Kuvio 23. DC Droopin toiminta

Manuaalin mukaan rinnakkaiskäytössä droop pitää olla vähintään 4 %.

4.4 Tasasähkövoimansiirtotyö

Onnistuneiden kytkentöjen ja testausten jälkeen keskityttiin miettimään, mitä kaikkea pitää huomioida työn mahdollistamiseksi sähkövoimatekniikan laboratoriotyöt -opintojaksolla tehtävään opiskelijatyöhön. Huomiotavan arvoisia asioita olivat työhön sovitettavat mittaukset sekä eritoten kytkentöjen turvallisuus, johon kuului laitteiston kotelointi.

Työtä varten kehitettiin työohjeet (liite 5), jotka kirjoitettiin aiempien tasasähkövoimansiirtotyöohjeiden pohjalle. Aiemmat ohjeet on kirjoittanut Eerik Mäkinen. Työohjeisiin on sisällytetty mittauspisteet ja mitattavat suureet. Ohjeet mukailevat hyvin pitkälti aiempiakin ohjeita, mutta ohjeet eroavat käytettävän laitteiston osalta aiemmasta.

4.4.1 Kotelointi

Jotta kytkennöistä saadaan turvalliset, pitää laitteisto saada koteloitua siten, että koteloiden kansille tuodaan banaaniliittimet laboratoriossa käytettäville johdoille. Kotelointia ei tässä työssä suunnitella vaan sille esitetään ehdotelma, jonka mukaan kyseiset laitteistot voidaan koteloida turvallisesti. Kotelointia tarvitsevat laitteet ovat: AFE:t, suodattimet ja kontaktorit.

AFE:jen koteloinnissa tarvitsee huomioida, että kotelon kannelle tuodaan liittimet AC- ja DC-puolen, sisääntulojen sekä sisäisen releen liittimet. Laboratoriosta löytyy valmiiksi koteloituna ABB:n ACS 600 -taajuusmuuttajat, joissa kotelointi on suoritettu myös tässä työssä käytetyille laitteille sopivalla tavalla. Kuvat 1-4 ovat kyseisistä ABB:n laitteiden koteloinnista.

Kuva 1. ACS 600 –taajuusmuuttaja koteloituna edestä

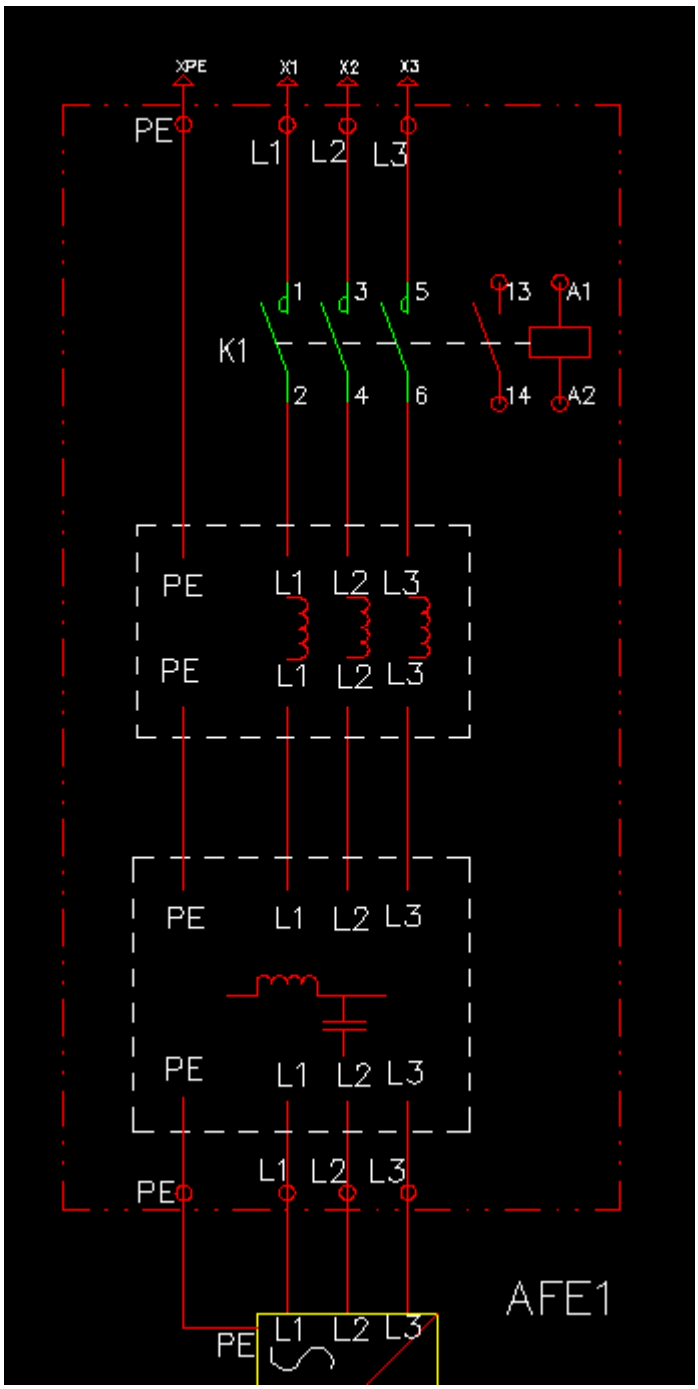
Kuva 2. ACS 600 –taajuusmuuttajan kotelon kanteen tuodut relelähtöjen liittimet

Kuva 3. ACS 600 –taajuusmuuttajan kotelon kanteen tuodut moottorilähdön liittimet

Kuva 4. ACS 600 –taajuusmuuttaja kotelon kanteen tuodut verkkosyötön liittimet

Suotavaa olisi, jos kaikki sisääntulot ja relelähdöt verkkosyötön sekä DC-liitäntien lisäksi saataisiin tuotua kotelon pintaan. Jos mahdollisuutta tähän ei ole, tarvitaan työn osalta ainoastaan sisääntulot 6 ja 14, kun tulo 8 jompataan kotelon sisällä suoraan tuloon 6. Verkkosyöttö maadoituksineen ja DC-lähtö tarvitsee kuitenkin tuoda kotelon pintaan.

Itse AFE-laitteiden lisäksi koteloitava on suotimet ja kontaktorit. Näiden osalta suositellaan kotelointiratkaisua, missä yhden AFE:n suotimien kanssa samassa kotelossa on kontaktori K1/K2 ja kotelon pintaan on tuotu liitännät suotimien maadoitukselle sekä kolmivaiheinen syöttö kontaktoripäätyyn ja kolmivaiheinen lähtö suotimien jälkeen. Muut kytkennät on liitteen 2 kytkentöjen mukaisesti kotelon sisällä. Asiaa hahmottamaan paremmin tehtiin kuvion 24 mukainen kytkentäkuva. Kuviossa punainen kaksoispistekatkoviiva kuvaa kotelon rajapintaa ja punaiset pallot kotelon pinnalle tuotavia liittimiä.



Kuvio 24. Koteloinnin (punainen katkoviiva ja pallot) kytkentäehdotelma

Kontaktorille K3 on rakennettava oma kotelo. Lisäksi kontaktorin K3 kanssa on huomioitava, että kontaktorin täytyy olla liitteen 2 mukaisista kytkennöistä poikkeavasti avautuvilla kärjillä.

5 POHDINTA

Vaikka työn aloittaminen lähti käyntiin hitaasti ja työ itsessään vastaanotettiin melko myöhään, onnistuttiin työssä hyvin. Työn tekeminen oli yksinkertaista Vaconin tarjoamien kytkentäehdotusten ansiosta. Niillä ja manuaalin hyvällä läpikäynnillä päästiin helposti alkuun, mikä vauhditti myöhemmin työn edistymistä. Työ oli rakenteeltaan hyvin suoraviivainen: rakennetaan kytkennät, testataan laitteiston toiminta ja kehitetään laitteiston toiminnan perusteella työohjeet opiskelijatyöhön.

Lähtökohtana työssä ei ollut etsiä ongelmia ja työtä aloittaessa ei mahdollisista ongelmista ollut mitään ajatustakaan. Näitä kuitenkin ilmeni työn edetessä aina välillä, mikä oli hyvä homma. Työ sai lisäarvoa yllättävistä virheistä ja ongelmista. Löydetyt ongelmat ja ratkaisut auttoivat työn mukauttamista opiskelijatyöhön. Turvallisuutta saatiin myös kasvatettua tekemällä virheet työn aikana. Kaikkia ongelmia ei todennäköisesti löydetty tämän työn yhteydessä, mutta löydettyjen ongelmien kartoittaminen mahdollistaa työn turvallisen tekemisen Sähkövoimatekniikan laboratoriotyöt -opintojaksolla.

Kotelointiratkaisujen jääminen selittelytasolle on hieman kyseenalaista. Laitteisto tullaan mitä varmimmin koteloimaan ammattimaisesti, koska sitä tekevät henkilöt ovat tietoisia turvallisuusvaatimuksista. Se, että koteloinnista saadaan opiskelijatyöhön sopiva, voi jäädä saavuttamatta, jos selitykset eivät aukea koteloinnin tekijälle.

Opiskelijatyötä varten kehitetty työohje oli vaikeampi tehdä, kun ainoa näkemys laboratoriossa tehtäviä töitä kohtaan on itse tekijän näkökulmasta. Ohjeisiin jätettiin aikaisemmista ohjeista hyvin paljon vanhoja tekstejä tuomaan opettajan näkökulmaa.

LÄHTEET

Dixon, J. Three-Phase Controlled Rectifiers. Pontificia Universidad Católica de Chile.

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot 1. Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. Helsinki: Otatieto.

Esala, M. Transistoreiden merkinnät. Luettu 27.03.2014. http://www.kolumbus.fi/mikko.esala/transistorit.pdf

Hietalahti, L. 2011. Tehoelektroniikan perusteet. Tampere: Amk-Kustannus Oy, Tammertekniikka

Kelly, R. Active Front End Variable Frequency Drives. Luettu 24.03.2014 http://www.pump-zone.com/topics/instrumentationcontrols/active-front-end-variable-frequency-drives

Laiti, P. 2010. Taajuusmuuttajaan perustuva voimantuotannon liittäminen heikkoon sähköverkkoon. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Metropolian ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

Niiranen, J. 1997. Tehoelektroniikan komponentit. Helsinki: Otatieto.

Partanen, J. 2011. Sähkönsiirtotekniikka. Tasasähkövoimansiirto. Lappeenrannan yliopisto.

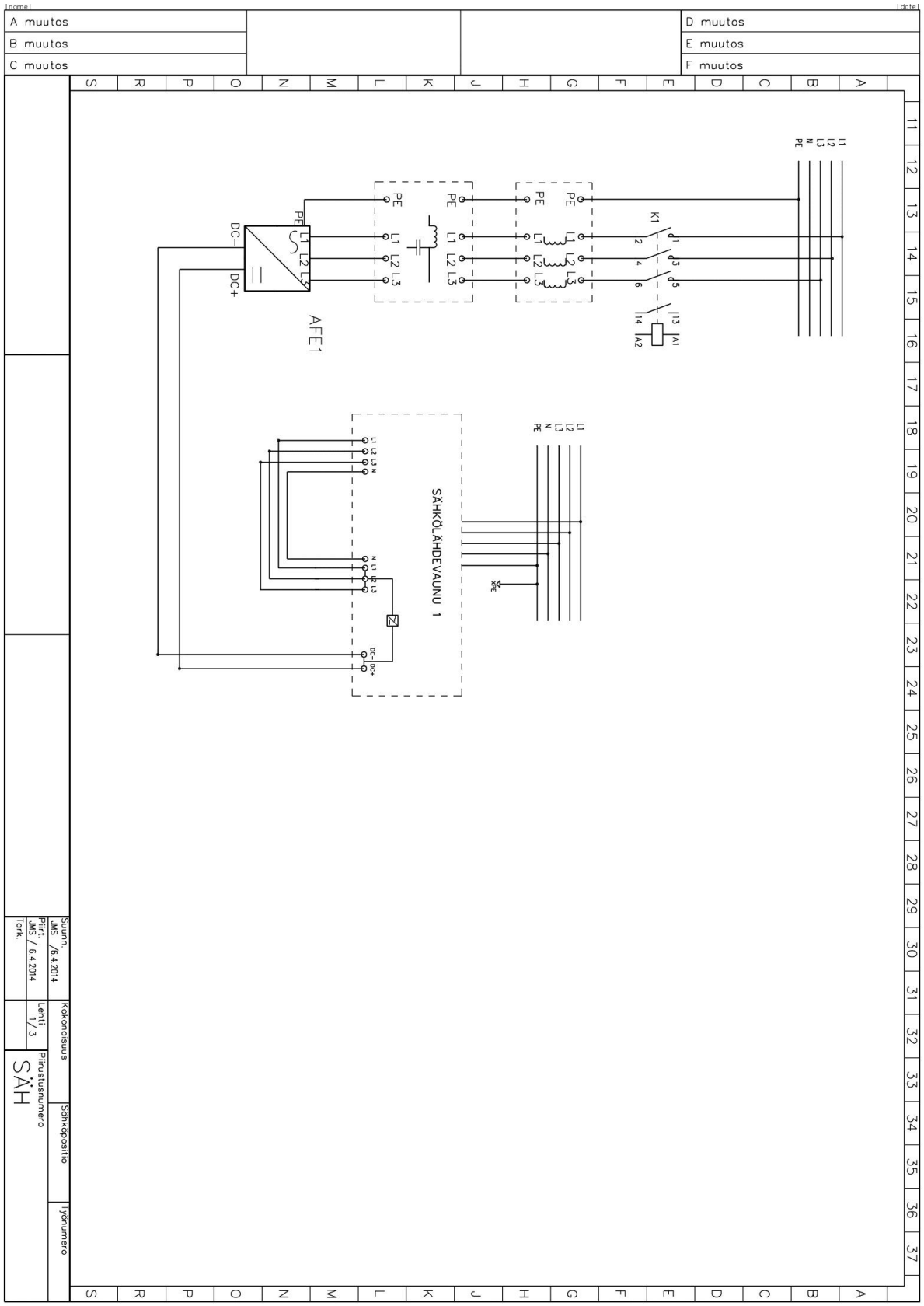
Sattar, A. 2001. IGBT Basics 1, IXYS Corporation. Luettu 27.03.2014 http://www.ixys.com/Documents/AppNotes/IXYS_IGBT_Basic_I.pdf

TDE MACNO. A.F.E. (Active Front End) Characteristics. Luettu 31.03.2014 http://www.tdemacno.com/en/53-appl-afe.html

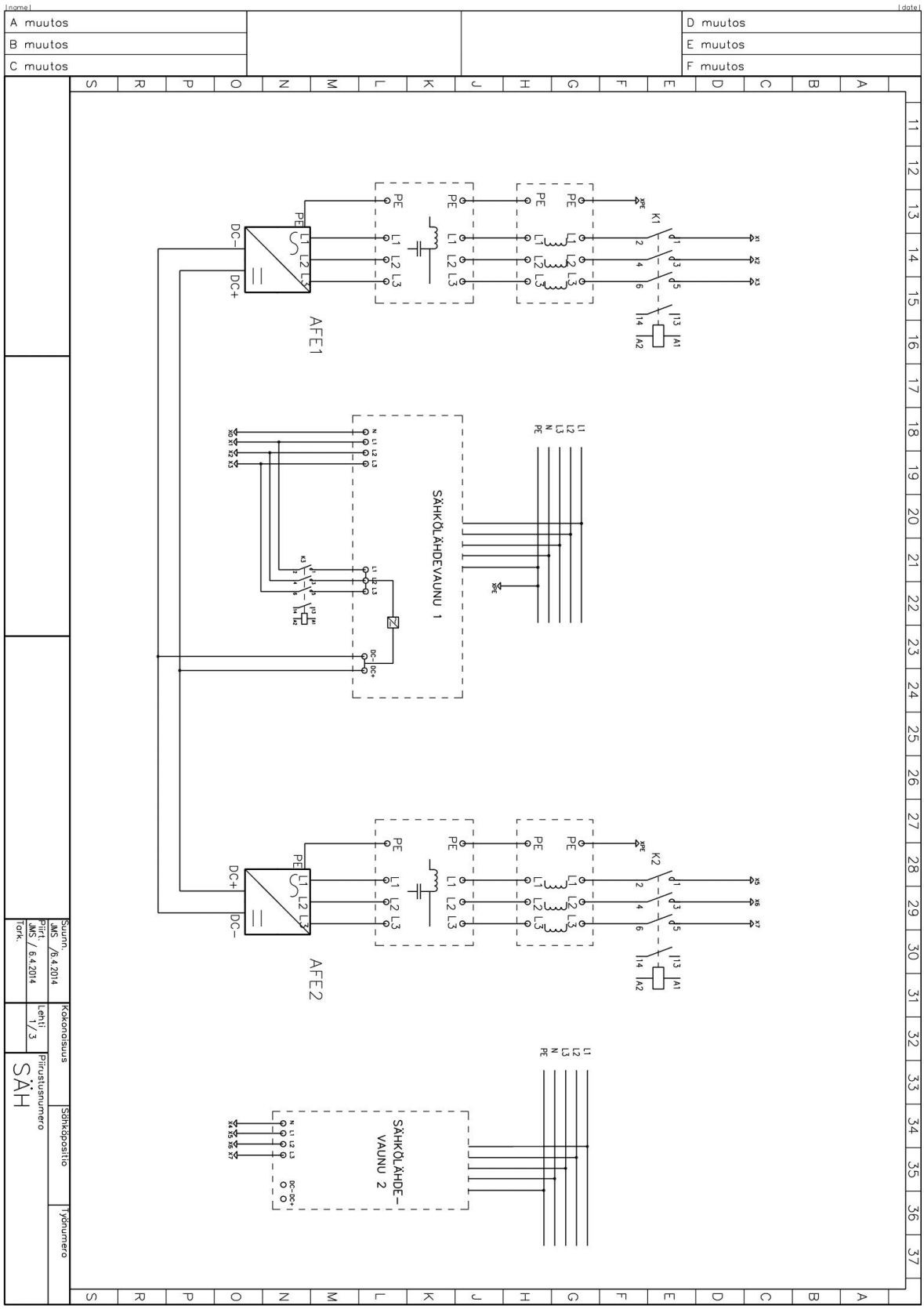
Vacon Oyj. Active Front End (AFE) Application Manual. Tulostettu 03.02.2014 http://www.vacon.com/ImageVaultFiles/id_3284/cf_2/Vacon-NXP-AFE-ARFIFF02-Application-Manual-DPD00905.PDF?635179592322000000

LIITTEET

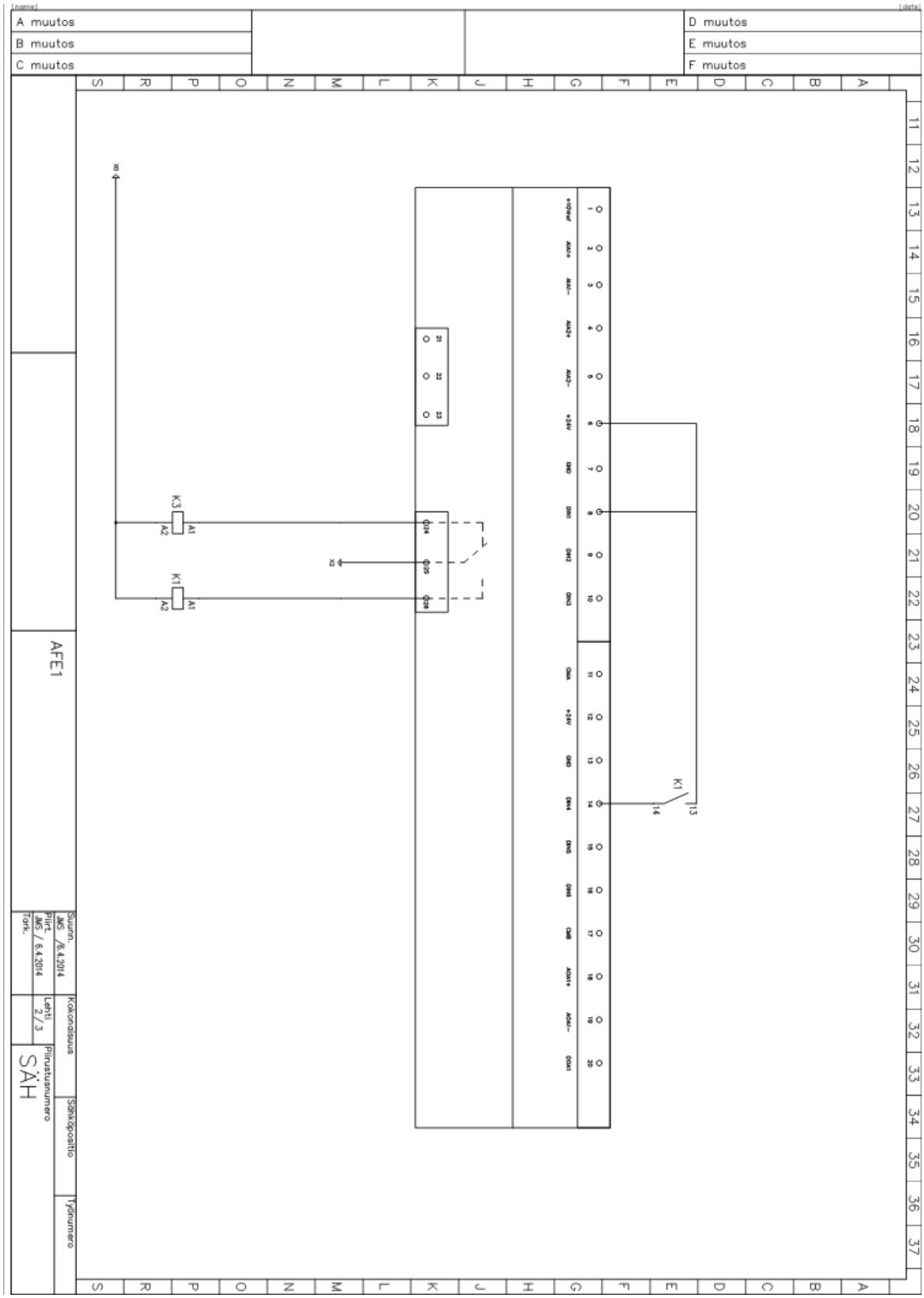
Liite 1. AFEn yksipuoleinen kytkentä



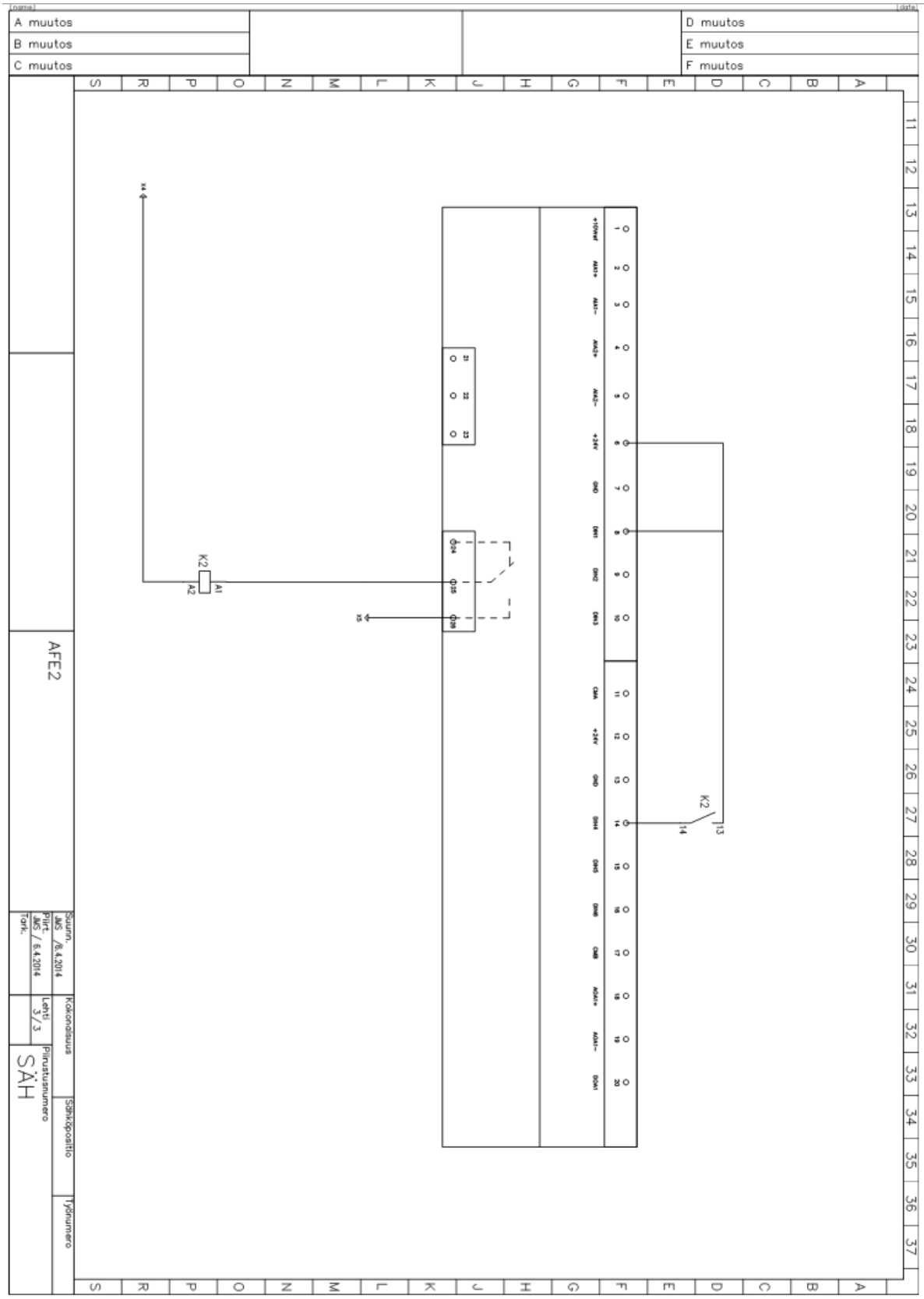
Liite 2. Tasasähköyhteyden lopullinen kytkentä ilman mittauspisteitä



Liite 3. AFE1:n sisääntulojen ja sisäisen releen kytkennät



Liite 4. AFE2:n sisääntulojen ja sisäisen releen kytkennät



Liite 5. Tasasähkövoimansiirtotyöohje