

Sähkökäyttöinä ja kuormina toimivat taajuusmuuttajat sekä niiden
ohjaus- ja mittaussympäristö

Petri Niinimäki

Sähkötekniikan opinnäytetyö
Sähkövoimatekniikka
Insinööri (AMK)

KEMI 2014

ALKUSANAT

Haluan esittää kiitokset mielenkiintoisesta ja haastavasta opinnäytetyöaiheesta työn tilaajalle Aila Petäjäjärvelle Lapin ammattikorkeakoulun Kemin yksikköön. Suuret kiitokset tämän työn valvojalle lehtori Jaakko Etolle ja koulutusohjelmavastaava Aila Petäjäjärvelle heidän arvokkaista kommenteistaan ja ohjauksestaan. Esitän myös isot kiitokset asennustöitä ja hankintoja tehneille Jouko Alanivalle, Juha-Matti Kvistille ja harjoittelijoille.

Haluaisin lopuksi vielä kiittää Outia, vanhempiani ja isovanhempiani kaikesta saamastani tuesta opintojen aikana. Teidän avullanne sain tämän ison haasteen suoritettua.

Oulussa 01.04.2014 Petri Niinimäki

TIIVISTELMÄ

LAPIN AMMATTIKORKEAKOULU, Teollisuuden ja luonnonvarojen osaamisala

Koulutusohjelma:	Sähkötekniikka
Opinnäytetyön tekijä:	Petri Niinimäki
Opinnäytetyön nimi:	Sähkökäyttöinä ja kuormina toimivat taajuusmuuttajat sekä niiden ohjaus- ja mittausympäristö
Sivuja (joista liitesivuja):	99 (27)
Päiväys:	20.5.2014
Opinnäytetyön ohjaaja:	DI Jaakko Etto, Lapin AMK
<p>Lähtöleveysuudessa on odotettavissa sähkön pientuotannon lisääntyminen tekniikan parantuessa ja laitteiden hintojen alentuessa. Myös tuulivoiman rakentaminen on vilkasta. Näissä tapauksissa taajuusmuuttajilla on vahva rooli tuotetun sähkön muuntamisessa sähköverkkoon sopivaksi. Lisäksi taajuusmuuttajien vahvat edut säädettävissä käytöissä ylläpitävät taajuusmuuttajien tarvetta eri sovelluksissa.</p> <p>Tämän opinnäytetyön aiheena oli Lapin ammattikorkeakoulun Kemian yksikköön toteutettavan taajuusmuuttajien ja moottorien oppimisympäristön suunnittelu ja käyttöönotto. Tavoitteena oli tarjota opiskelijoille ja yritysmaailman koulutettaville henkilöille monipuolinen mahdollisuus perehtyä taajuusmuuttajien ja oikosulkumoottorien toimintaan sekä niiden energian laatumittauksiin sähkökäytöissä.</p> <p>Työssä selvitettiin oikosulkumoottorien ja taajuusmuuttajien ominaisuuksia, ja millaisia toiminta-arvoja ja sähkönlaatuominaisuuksia niillä on. Oikosulkumoottorin toimintaa ja mitoitus tutkittiin sekä moottorina että generaattorina käytettäessä. Taajuusmuuttajien toimintaperiaatteista käytiin läpi tavalliset yksi-kaksikvadranttiset ja nelikvadranttiset mallit.</p> <p>Oppimisympäristön suunnittelussa huomioitiin laitteiston monipuoliset käyttötarpeet ja ratkaisujen joustavuus. Tarvittava laitteisto mahdutettiin olemassa oleviin rajallisiin testihuonetiloihin, missä voimavirtapistorasioiden ja -jatkojohtojen avulla toteutettiin eri laitteiden ja mittauspisteiden ristikytkentä. Käyttöturvallisuuden varmistamiseksi testihuoneen hätä-seis-toteutus laajennettiin kattamaan kaikki muutkin huoneen laitteita syöttävät järjestelmät. Valvomopisteitä suunniteltiin kaksi, joihin sijoitettiin etävalvonta ja -ohjausjärjestelmät sekä energian laatumittauspisteet. Asennustöiden ohjaus suoritettiin yksityiskohtaisten työpyyntöjen avulla.</p> <p>Työn keskeiset tavoitteet saavutettiin ja suunniteltu järjestelmä saatiin käyttöönotettua kevätkauden lopulla 2014. Järjestelmä voidaan ottaa opetuskäyttöön syyskaudella opettajien perehdytyksen ja harjoitustehtävien suunnittelun jälkeen.</p>	
<p>Asiasanat: sähkömoottorit, oppimisympäristö, sähkösuunnittelu, taajuusmuuttajat, sähkökäytöt, käyttöönotto.</p>	

ABSTRACT

LAPLAND UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES, Industry and Natural Resources

Degree programme:	Electrical Engineering
Author:	Petri Niinimäki
Thesis title:	Single Drives Performing as Electric Drives and Loads, and Their Control and Measurement Environment
Pages (of which appendixes):	99 (27)
Date:	May 20, 2014
Thesis instructor:	Jaakko Etto, M.Sc. (Tech.), Lapland UAS
<p>In the near future it is expected that small scale electricity production will increase due to improved technology and lower equipment prices. In addition, construction of new windmills is nowadays very lively. In these cases single drives have a strong role in transforming the produced electricity into a form which is accepted by the electric power transmission network. The significant benefits of single drives in adjustable drives maintain the high demand for single drives in different applications.</p> <p>The objective of this thesis was to design and implement a learning environment for single drives and squirrel-cage motors for the Lapland university of applied sciences unit in Kemi. Target was to offer versatile opportunity for students and trainees from external corporates to get acquainted with the operation of single drives and squirrel-cage motors including electricity quality measurements related to them.</p> <p>In the thesis work the characteristics of squirrel-cage motors and single drives were studied along with their operational values and electricity quality attributes. The operation of squirrel-cage motor was examined both as motor and generator. The operational principles of one/two-quadrant and four-quadrant single drive applications were covered as well.</p> <p>The design of the system addressed various ways of usage and flexibility and extendibility of the solutions. Required equipment was fitted into existing test room facilities. The existing emergency stop circuit was extended to cover all systems feeding power to the equipment. Two remote control locations were designed that hosted remote monitoring and controlling as well as energy quality measurement points. Installation work was guided through detailed work orders.</p> <p>Key targets of the thesis were fulfilled as the designed system was implemented successfully during the spring time. The system can be taken into educational usage in the beginning of autumn after staff training and designing the exercises.</p>	
<p>Keywords: electric motors, learning environment, electric design, frequency inverter, electric drives, commissioning.</p>	

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYSLUETTELO.....	5
KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET	7
1 JOHDANTO	8
1.1 Lapin ammattikorkeakoulu.....	8
1.2 Sähkökäyttöjen testaus- ja kuormitusjärjestelmä	9
2 SÄHKÖKONEET.....	11
2.1 Oikosulkumoottorit	11
2.1.1 Hyötysuhde	12
2.1.2 Momentti.....	14
2.1.3 Kentänheikennys	16
2.1.4 Lämpeneminen.....	17
2.1.5 Kuormitustyypit	18
2.2 Oikosulkugeneraattorit	19
3 SÄHKÖKÄYTÖT	21
3.1 Käyttösovellukset	21
3.2 Käyttötyypit.....	22
3.2.1 Suorat käytöt	22
3.2.2 Vaihtuvat käytöt.....	24
3.2.3 Säädettävät käytöt	25
3.2.4 Ohjauslogiikan mukaiset käyttötyypit.....	27
3.3 Tuulivoimakäyttö	27
4 TAAJUUSMUUTTAJAT.....	31
4.1 Kentänheikennys	33
4.2 Taajuusmuuttajan valinta	34
4.3 Kuormitettavuus	34
4.4 Jarrutus	35
4.4.1 Vuojarrutus.....	35
4.4.2 Ylijännitesäätö.....	36
4.4.3 Jarrukatkoja ja -vastus.....	36
4.4.4 Verkkoonjarrutus.....	37

4.5	Häiriöt.....	40
5	TURVALLISUUS	42
5.1	Koneturvallisuus.....	42
5.2	Sähkölaboratorio	43
6	SUUNNITTELU.....	45
6.1	Vaatimuksia.....	45
6.2	Järjestelmä	47
6.3	Moottorit.....	49
6.4	Taajuusmuuttajat	50
6.5	Kaapeloinnit	54
6.6	Valvomo	55
6.6.1	Etäohjaus- ja valvonta.....	55
6.6.2	Sähkön laatumittaus	56
6.7	Sähkösuunnitelmat	57
6.8	Hätä-seis-ratkaisut	58
7	TOTEUTUS.....	59
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	66
8.1	Toteutettu testiympäristö.....	66
8.2	Jatkokehityskohteet	66
9	POHDINTA.....	68
	LÄHTEET.....	70
	LIITTEET	72

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

AMK	ammattikorkeakoulu
CEE	sähköisten laitteiden sertifikaatti (Certification of Electrotechnical Equipment)
DTC	suora momentinsäätö esimerkiksi moottorijarrutuksessa (Direct Torque Control)
DOL	moottorin kytkeminen suoraan sähköverkkoon (Direct-On-Line)
dU/dt	sähkön suodatintyyppi (kuristin ja kondensaattori)
EMC	sähköinen yhteensopivuus (ElectroMagnetic Compatibility)
IEC	kansainvälinen sähköalan standardointijärjestö (International Electrotechnical Commission)
IGBT	tehoelektronikan komponentti (Insulated-Gate Bipolar Transistor)
LCL	sähkön suodatintyyppi (induktanssi-kapasitanssi-induktanssi)
MNSiS	ABB:n moottorikeskus
PID	säädintyyppi (Proportional-Integral-Derivative)
PTZ	valvontakameran tyyppi (Pan-Tilt-Zoom)
PWM	pulssinleveysmodulaatio (Pulse-Width Modulation)
STO	taajuusmuuttajan turvayksikkö (Safe Torque Off)

1 JOHDANTO

Sähköalan oppilaitosten haasteena on tarjota opiskelijoille turvallinen ympäristö perehtyä alaan liittyviin käytännön asioihin ja ilmiöihin. Opiskelijoiden pitäisi pystyä kokeilemaan asioita käytännössä ja syventämään sitä kautta luennoilta ja kirjallisuudesta opittua teoriaa.

Erityisesti sähköalalla tämä vaatii oppimisympäristöiltä paljon, sillä järjestelmien ja laitteiden jännitteet ovat hengenvaarallisia. Kuitenkin opiskelijoiden on päästävä näkemään ja kokeilemaan asioita enemmän, kuin tavalliselle ei-sähköalan ihmiselle on mahdollista.

Oppilaitoksissa pyritäänkin rakentamaan erilaisia oppimisympäristöjä, joissa opiskelijat voivat perehtyä sähköjärjestelmien ja -laitteiden toimintaan ja ominaisuuksiin turvallisesti jopa virheiden tekemisen kautta. Tätä mahdollisuutta ei yleensä työelämässä ole tarjolla ja siellä tehdyt virheet voivat aiheuttaa pahassa tapauksessa jopa satojen tuhansien ellei miljoonien eurojen vahingot.

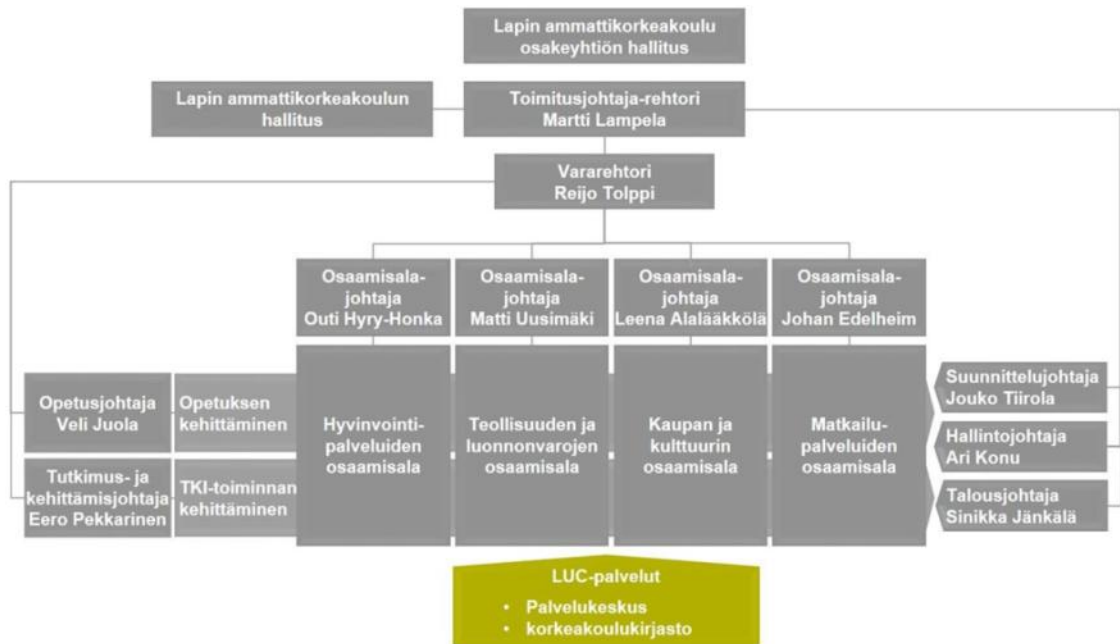
Viime vuosina Suomessa on alettu panostaa sähkön pientuotantoon ja sen tutkimiseen. Aurinkosähköpaneelien ja tuulivoimaloiden tuottama sähkö on saatettava yleisen sähköverkon vaatimaan muotoon, joten näiden järjestelmien sähköverkkoon tuottamat häiriöt ovat yksi tärkeä tutkimuskohde.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on ollut suunnitella ja rakentaa oppimisympäristö, jossa voidaan perehtyä sähkökäyttöinä ja kuormina toimiviin taajuusmuuttajiin sekä niiden ohjaus- ja mittausjärjestelyihin. Oppimisympäristön laitteilla voidaan myös toteuttaa säädettäviä moottorikuormia muille sähkövoimalaboratorion sähkökäyttöille.

1.1 Lapin ammattikorkeakoulu

Lapin ammattikorkeakoulu muodostettiin 1.1.2014 yhdistämällä Kemi-Tornion ja Rovaniemen ammattikorkeakoulujen toiminnot. Ammattikorkeakoulu toimii osakeyhtiömuotoisena ja sen organisaatio keskittyy neljän osaamisalan ympärille: hyvinvointipal-

velut, teollisuus ja luonnonvarat, kauppa ja kulttuuri sekä matkailupalvelut (kuvio 1). (Lapin AMK 2014, hakupäivä 20.4.2014.)



Kuvio 1. Lapin ammattikorkeakoulun organisaatio (Lapin AMK 2014, hakupäivä 20.4.2014)

Ammattikorkeakoululla on Kemin ja Rovaniemen päätoimipisteiden lisäksi toimipiste Torniossa. Kemin toimipisteessä osaamisaloista ovat edustettuina teollisuuden ja luonnonvarojen rinnalla hyvinvointipalvelut. (Lapin AMK 2014, hakupäivä 20.4.2014.)

Teollisuus ja luonnonvarat -osaamisala sisältää Kemin osalta AMK-tutkintoon johtavat kone- ja tuotantotekniikan, sähkötekniikan ja tuotantotalouden koulutusohjelmat sekä kaivosalan muuntokoulutuksen. Lisäksi on teknologiaosaamisen johtamisen koulutusohjelma, joka johtaa ylempään AMK-tutkintoon. Koulutusta annetaan Kemissä ammatillispainotteisesti myös aikuissovelluksena, jolloin tutkinto on mahdollista suorittaa työn ohessa. (Lapin AMK 2014, hakupäivä 20.4.2014.)

1.2 Sähkökäyttöjen testaus- ja kuormitusjärjestelmä

Opinnäytetyön tavoitteena oli sähkökäyttöjen testaus- ja kuormitusjärjestelmän suunnittelu, rakentaminen ja käyttöönotto Lapin ammattikorkeakoulun Kemin toimipisteen

sähkövoimalaboratorioon. Kemin toimipisteen laboratorioiden kehityshankkeissa on laitteistoja ajanmukaistettu huomattavasti viime vuosien aikana (Etto 2010, 47). Sähkövoimalaboratorion testihuoneeseen oli hankittu ja osin asennettukin muutamia laitteistoja Lapin energiakoulu -hankkeen puitteissa.

Laboratoriossa oli ennestään erilaisia moottoreita ja niiden testijärjestelmiä. Näiden moottorien koko rajoittui laboratorion tiloissa alle 5,5 kW:n ja testihuoneessa maksimissaan 5,5 kW:iin sähkönsyöttöratkaisujen ja relesuojausten vuoksi. Uudella järjestelmällä haluttiin käyttää isompia ja uudempia moottoreita sekä ohjata moottoreita useilla erilaisilla sähkökäyttöillä ja kuormilla.

Moottoreita syöttävinä järjestelminä toimivat 30 kVA:n dieselgeneraattori, ABB:n MNSiS-moottorikeskus ja 10 kV:n demojärjestelmä valmistuivat syksyn 2013 ja kevään 2014 välisenä aikana sähkövoimalaboratorion tiloihin. Samalla ajanjaksolla asennettiin myös moottori-generaattoriparien tuottamaa sähköenergiaa hyödyntävä Nocartsaarekekonvertteri.

Ympäristöä varten halutaan myös kaksi testihuoneen ulkopuolelle sijoitettavaa valvomopistettä, joissa on ohjaus- ja valvontajärjestelmät sekä sähkökäytön ja sähkönlaadun mittaussmahdollisuudet.

Opinnäytetyön piiriin kuuluvat uuden ympäristön järjestelmä- ja sähkösuunnittelu, hankintojen ohjaus, asennusten ja käyttöönoton ohjaus ja valvonta. Työn pohjalta järjestetään lopuksi oppilaitoksen henkilökunnalle koulutusta järjestelmän käyttöön.

2 SÄHKÖKONEET

Sähkökoneet voivat toimia sähköenergiaa mekaaniseksi energiaksi muuntavina moottoreina tai mekaanista energiaa sähköenergiaksi muuntavina generaattoreina. Sähkökoneet jaetaan tasa- ja vaihtosähkökoneisiin niiden toimintaperiaatteiden mukaan.

Tässä työssä keskitytään yleisimmin käytettyihin kolmivaiheisiin vaihtosähkökoneisiin. Ne voidaan jakaa edelleen seuraaviin alakategorioihin:

- 1) Epätahtikone (= induktio- tai oikosulkukone)
- 2) Tahtikone
 - a. Kestomagnetoitu
 - b. Vierasmagnetoitu.

2.1 Oikosulkumoottorit

Moottorien mitoittaminen perustuu ensisijaisesti kuormituksen ja ympäristön vaatimuksiin. Käyttöolosuhteista tarvitaan perustietoina käytettävissä oleva jännite ja sen taajuus.

Varsinaisen mitoituksen alkutietoina tarvitaan vaadittu momentti tai teho pyörimisnopeuden funktiona sekä käytöltä vaadittu pyörimisnopeusalue. Näiden avulla saadaan moottorin karkea mekaaninen teho vaatimus (kaava 1) (Hietalahti 2012, 25). Lisäksi on huomioitava lämpökuormitettavuus.

$$P_e = T \cdot \omega_m = T \cdot 2\pi \cdot f_m = T \cdot 2\pi \cdot \frac{n}{60}, \quad (1)$$

missä

T on tarvittava momentti, Nm

ω_m on koneen kulmataajuus

f_m on koneen pyörimistaajuus, Hz

n on koneen haluttu pyörimisnopeus, r/min.

Oikosulkumoottorin valintaan vaikuttaa kohteessa tarvittava nimellispyörimisnopeus, jonka avulla voidaan määrittää moottorille napapariluku (kaava 2). Oikosulkumoottorin

rakenne kestää sen nopeuden nostamisen yli nimellisnopeuden (standardeissa on asetettu vaatimus että moottorin on kestävä vähintään 20% nimellisnopeuden ylitys). Tämä kuitenkin kuluttaa moottoria ja lyhentää käyttöikää olennaisesti, joten nimellisnopeus on syytä sovittaa tarpeeseen sopivaksi. (Aura & Tonteri 2009, 310.)

$$p = \frac{f \cdot 60}{n_s}, \quad (2)$$

missä

f taajuus, Hz

n_s koneen magneettikentän (synkroninen) pyörimisnopeus, r/min.

Napaluku saadaan edelleen kertomalla napapari-luku kahdella. Napaluvuille 2, 4, 6 ja 8 löytyy vakiomoottoreita lähes kaikilta valmistajilta. Moottorin ja kuorman välillä voidaan käyttää myös vaihteistoa, jonka avulla voidaan poistaa moottorin nopeuden suora verrannollisuus kuorman näkemään nopeuteen. Näin voidaan hakea vapaammin muilta ominaisuuksiltaan (kuten paino, hyötysuhde, melu, runkokoko, hinta) tarpeeseen paremmin sopiva moottori.

Oikosulkumoottorin induktiotoimintaperiaatteesta johtuen se pyörii hieman nimellisnopeutta pienemmällä nopeudella. Moottorille voidaan määrittää suhteellinen jättämä (kaava 3).

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}, \quad (3)$$

missä

n_s koneen magneettikentän (synkroninen) pyörimisnopeus, r/min

n roottorin pyörimisnopeus, r/min.

2.1.1 Hyötysuhde

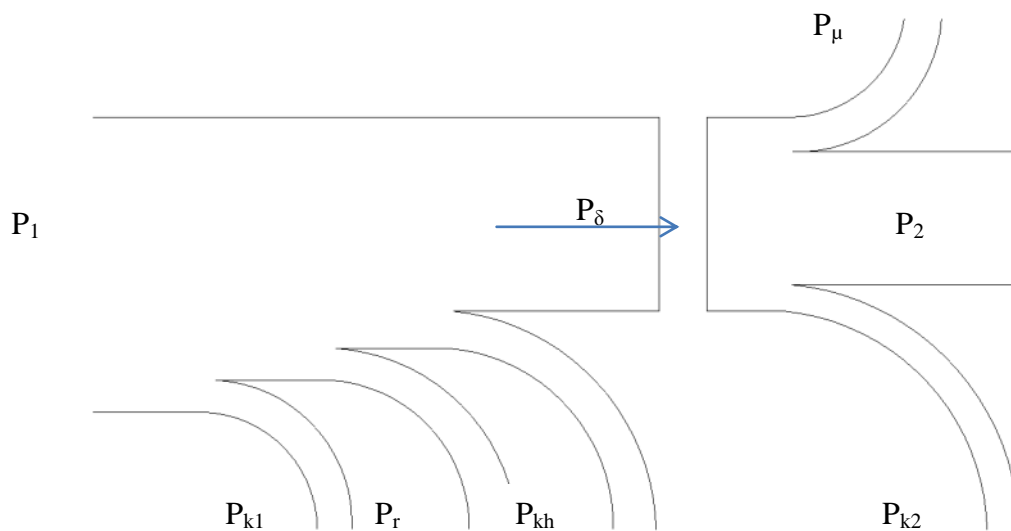
Moottorin hyötysuhde kuvaa sen kykyä muuntaa sähköinen energia mekaaniseksi energiaksi. EU:n alueella on hyötysuhteiden luokittelujärjestelmä, jossa oikosulkumoottorit on jaoteltu kolmeen eri luokkaan EFF3, EFF2, EFF1 (taulukko 1). Sähköalan standardointijärjestö IEC on taas määritellyt maailmanlaajuisesti oman luokittelunsa IE1, IE2, IE3 ja IE4. (Hietalahti 2013, 28.)

Taulukko 1. Sähkömoottorien hyötysuhdeluokittelut (Hietalahti 2013)

Hyötysuhteen taso	EU	IEC
Heikko	EFF3	
Standardi	EFF2	IE1
Korkea	EFF1	IE2
Premium		IE3
Super Premium		IE4

EU:n alueella on annettu velvoittava asetus 640/2009, jonka mukaan jäsenmaissa käytettävien moottorien on täytettävä vähintään IE2-luokka vuodesta 2011 lähtien. Vuodesta 2015 lähtien moottorien on täytettävä vähintään IE3-luokka tehoalueella 7,5-375 kW tai on käytettävä IE2-luokkaa ja taajuusmuuttajaa. Vuodesta 2017 lähtien IE3-luokan tehovaatimus laajenee alueelle 0,75-375 kW. (EU 640/2009, 6.)

Hyötysuhde on aina pienempi kuin yksi, eli moottorista ulos saatava teho on aina pienempi kuin sen sähköverkosta ottama teho. Hyötysuhdetta laskevat erilaiset häviöt (kuvio 2).



Kuvio 2. Oikosulkumoottorin häviöt (Aura & Tonteri 2009, 330)

- P_1 moottorin ottama teho
- P_2 moottorin antama teho
- P_δ ilmaväliteho
- P_{k1} staattorin resistiivihäviöt

P_{k2} roottorin resistiivihäviöt

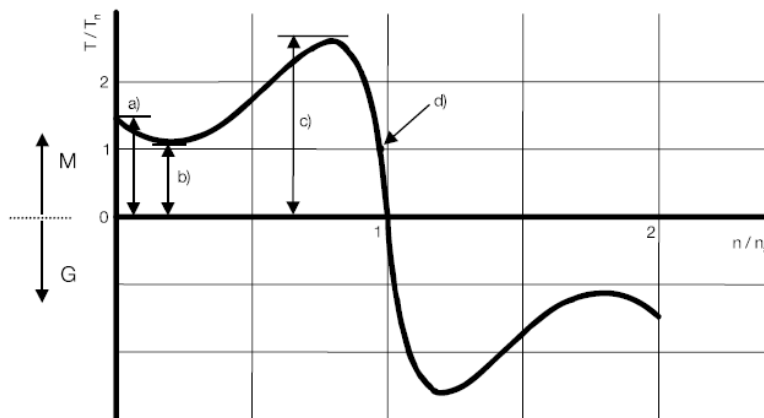
P_r rautahäviöt

P_μ mekaaniset häviöt

P_{kh} lisähäviöt

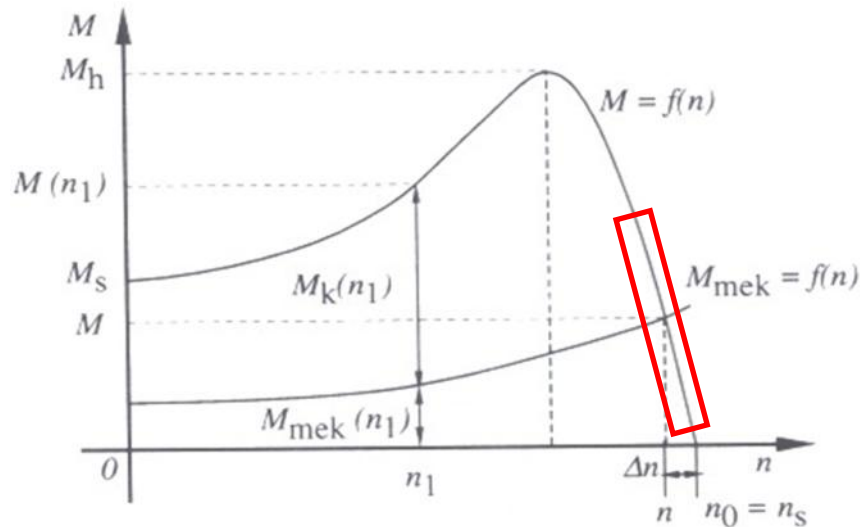
2.1.2 Momentti

Kun moottoria syötetään vakiojännitteellä ja -taajuudella, sen momentti/kierroslukukäyrä on jaettavissa kahteen toiminteeseen: positiivisella momentilla se toimii moottorina ja negatiivisella momentilla generaattorina (kuvio 3). Kuvassa a on lukitun roottorin momentti, b minimimomentti, c moottorin maksimimomentti ja d moottorin nimellistoimintapiste. (Tekninen opas 7 2001, 9.)



Kuvio 3. Oikosulkumoottorin tyypillinen momentti/kierroslukukäyrä (Tekninen opas 7 2001)

Oikosulkumoottorin käyntiinlähtö vaatii tietyn momentin M_s jolla voitetaan mekaaninen kuormittava momentti M_{mek} (kuvio 4). Moottorin tietyllä pyörimisnopeudella n_1 antaman momentin $M(n_1)$ ja sen hetkisen mekaanisen vastamomentin $M_{mek}(n_1)$ erotus antaa kiihdytysmomentin $M_k(n_1)$.



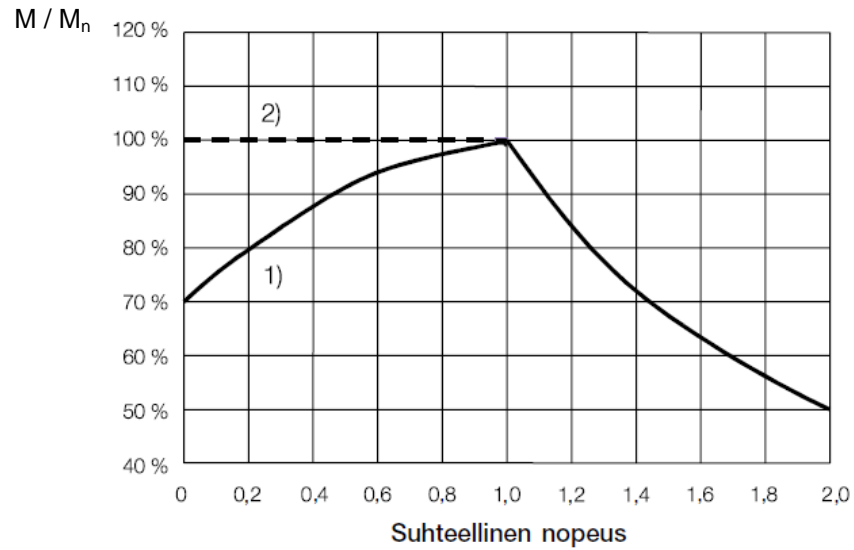
Kuvio 4. Oikosulkumoottorin momenttikäyrä (Aura & Tonteri 2009, 323)

Moottorille on määritelty nimellismomentti M_{mek} joka saadaan nimellisnopeudella n . Tällä momentilla voidaan moottoria kuormittaa ilman, että moottorin lämpötila nousisi yli sen suurimman sallitun lämpötilan.

Jos moottoria kuormitetaan nimellismomenttia suuremmalla momentilla, se ylikuormittuu ja kuumenee. Moottorit kestävät kyllä hetkittäistä ylikuormitusta, mutta se altistaa moottoria vioille ja lyhentää niiden elinikää.

Moottorin potentiaalinen toiminta-alue on nimellisyörimisnopeuden n läheisyydessä käyrän lähes pystysuoralla osuudella (kuvio 4). Alueen toinen pää on momenttikäyrällä nimellisnopeuden lähellä ja toinen pää noin $2/3$ maksimimomentista M_h . Jos momentti kasvaa toiminta-alueelta isommaksi kuin maksimimomentti M_h , moottori kippaa eli pysähtyy. Tyypillisesti tämä kippimomentti on 2-3 kertaa nimellismomentin suuruinen.

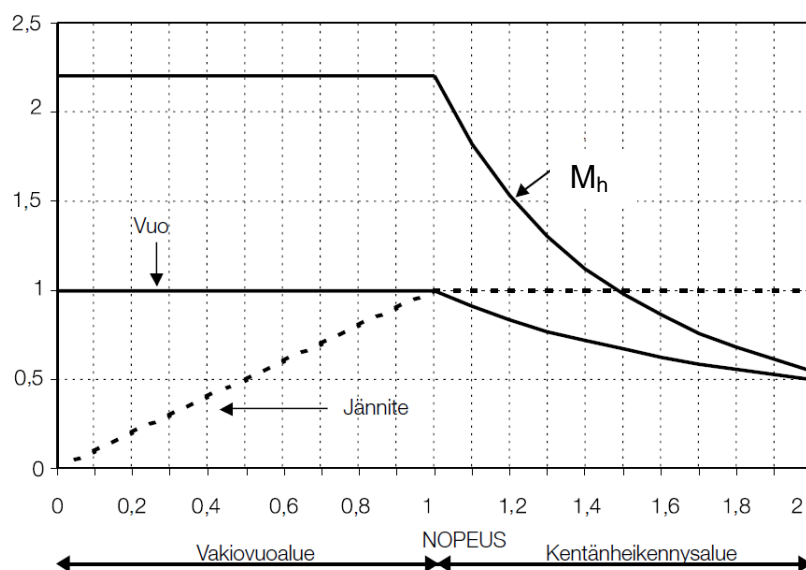
Moottorin kuormitettavuus M/M_n riippuu eri nopeuksilla olennaisesti moottorin jäähdytystavasta (kuvio 5). Jos moottori on itsejähdytteinen, on sen terminen kuormitettavuus alempi pienemmillä nopeuksilla (kuvion kuormituskäyrä 1). Erillisjäähdytteinen moottori taas pystyy toimimaan alhaisillakin nopeuksilla suurella momentilla (kuvion kuormituskäyrä 2).



Kuvio 5. Oikosulkumoottorin kuormitettavuus (Tekninen opas 7, 2001)

2.1.3 Kentänheikennys

Oikosulkumoottorin pyörimisnopeutta voidaan kasvattaa yli sen nimellinopeuden. Tällöin sen magnetointi kuitenkin pienenee, sillä jännitettä ei voida nostaa yli nimellisjännitteen. Tässä tilanteessa oikosulkumoottori käyttäytyy kuin tasasähkömoottori jonka magnetointia pienennetään. Tätä toiminta-aluetta kutsutaan kentänheikennysalueeksi (kuvio 6). (Aura & Tonteri 2009, 422.)



Kuvio 6. Kentänheikennysalue (Tekninen opas 7, 2001)

Pyörimisnopeuden nosto yli nimellisnopeuden tehdään käytännössä nostamalla taajuus suuremmaksi kuin moottorin nimellistaajuus on. Tällöin vuo kuitenkin pienenee. Koska maksimimomentin suuruus on suoraan verrannollinen vuon neliöön, heikkenee myös momentti nimellisnopeutta suuremmilla pyörimisnopeuksilla huomattavasti.

2.1.4 Lämpeneminen

Moottorin käynnistysvirralla on suurin hetkellisarvo eli sysäysvirta moottorin kytke-
mishetkellä (kaava 4). Nimellisvirtaan verrattuna oikosulkumoottori ottaa suorassa
käynnistyksessä tyypillisesti noin 5-8 -kertaisen käynnistysvirran. (Aura & Tonteri
2009, 322.)

$$i_s = 2\sqrt{2} \cdot I_k, \quad (4)$$

missä

I_k on moottorin oikosulkuvirta, A.

Moottorin käynnistysvaiheessa otettu suurempi virta aiheuttaa moottorissa lämpenemis-
tä. Mitä pidempään itsejäähdytteisen moottorin käynnistys kestää, sitä kuumemmaksi se
muuttuu. Valmistajat voivat määritellä moottoreille sallitun maksimikäynnistysajan,
jonka kuluessa moottorin on saavutettava käyntinopeutensa. Käytännön yleisenä sään-
tönä pidetään sitä, että käynnistysajan tulisi jäädä alle viiden sekunnin.

Moottorin kokonaiskäynnistysaika voidaan laskea osina (kaava 5) jakamalla se jaksoi-
hin, joissa kiihdyttävä momentti on vakio (kaava 6). Näin pystytään integroimaan tarvit-
tava aika ilman, että kiihdytysmomentin käyrää tarvitsee mallintaa tarkemmin.

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \dots + \Delta t_n \quad (5)$$

$$\Delta t_x = \frac{2\pi \cdot J}{\Delta M} (n_2 - n_1) = \frac{J}{\Delta M} (\omega_2 - \omega_1), \quad (6)$$

missä

J on pyöritettävän järjestelmän hitausmomentti, kgm^2

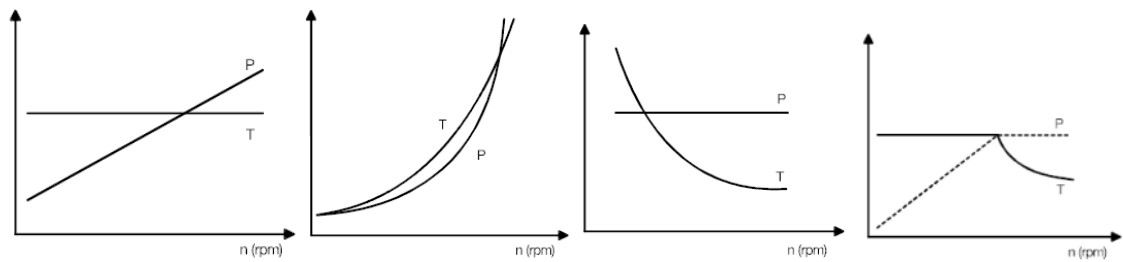
ΔM on kiihdyttävä momentti, Nm

$n_2 - n_1$ on pyörimisnopeuden muutos, r/s

$\omega_2 - \omega_1$ on kulmanopeuksien erotus.

2.1.5 Kuormitustyyppit

Teollisuudessa moottorien tyypillisiä kuormatyyppejä ovat: vakiomomenttikäyttö, neliöllinen momenttikäyttö, vakiotehokäyttö ja yhdistetty vakioteho- ja vakiomomenttikäyttö (kuvio 7). (Tekninen opas 7 2001.)



Kuvio 7. Erilaisia moottorien kuormitustyyppejä (Tekninen opas 7 2001)

Vakiomomenttikäytössä momentti pysyy vakiona pyörimisnopeudesta välittämättä. Tässä käyttötyypissä tehotarve kasvaa lineaarisesti nopeuden funktiona. Käytännön esimerkkinä voidaan mainita ruuvikompressorit ja nosturit. (Hietalahti 2012, 3.)

Neliöllisessä momenttikäytössä momentti kasvaa neliöllisesti nopeuteen nähden. Tällöin tehotarve on verrannollinen nopeuden kuutioon. Tämä kuormitustyyppi on kaikkein yleisin, kohteina esimerkiksi keskipakopumput ja -puhaltimet. (Hietalahti 2012, 4.)

Vakiotehokäytössä momentti on kääntäen verrannollinen nopeuteen (hyperbelin muotoinen kuormituskäyrä). Vakiotehoisia käyttökohteita ovat materiaalin rullaus, kun rullan halkaisija muuttuu sen myötä. (Hietalahti 2012, 4.)

Yhdistetyssä vakioteho- ja vakiomomenttikäytössä pyritään saamaan jatkuva teho suurella nopeudella. Tämä kuormitus on hyvin tyypillinen paperikoneilla. (Hietalahti 2012, 4.)

Edellä mainittujen peruskäyttötyyppien lisäksi niihin voi olla yhdistettynä myös erityisominaisuuksia. Esimerkiksi irtiottomomenttia vaativat kuormat tai momentin vaihtelu asentokulman tai ajan suhteen. Nämä erikoisuudet voivat olla säännöllisiä tai epäsäännöllisiä. Käytännön esimerkkinä toimivat valssaimet. (Hietalahti 2012, 4.)

2.2 Oikosulkugeneraattorit

Generaattorin tarkoituksena on tuottaa sähköenergiaa mekaanisesta energiasta, jota saadaan esimerkiksi tuulesta, lämmöstä tai virtaavan veden potentiaalienergiasta.

Oikosulkugeneraattorit pohjautuvat oikosulkumoottoreiden kanssa samoihin toimintaperiaatteisiin. Oikosulkumoottoria voi siten käyttää myös generaattorina, mikä helpottaa ilmiöiden mallintamista ja kokeiluja. Normaalisti generaattorin tapauksessa rakenteita hieman muunnetaan; esimerkiksi roottoreita vahvistetaan kestäämään ryntäystä.

Generaattorin tuottama sähkö on aina tahdistettava sähkönjakeluverkon kanssa. Jakeluverkkoon liitetyn oikosulkugeneraattorin taajuus ja jännite pysyvät oikean suuruisina automaattisesti, kunhan varmistetaan generaattorille riittävä magnetoinnin syöttö (tyypillisesti kondensaattori). (Pitkänen 2007.)

Oikosulkugeneraattoreissa on käytössä kahdenlaisia magnetointiperiaatteita: verkko- ja kondensaattorimagnetointi. Verkkomagnetoitu generaattori ottaa magnetoinnin suoraan sähköverkosta, jolloin verkon tulee olla jännitteinen. Tällöin generaattori ei ole itseheräävä. (Pitkänen 2007.)

Kondensaattorimagnetoitu generaattori ottaa taas magnetointivirran generaattorin napoihin asennetuista kondensaattoreista. Tällöin generaattori on itseheräävä ja voi toimia itsenäisenä generaattorina. (Pitkänen 2007.)

Generaattorin tuottamaan jännitteeseen vaikuttaa sekä roottorin pyörimisnopeus että magnetointivirran suuruus. Pyörimisnopeuden ollessa vakiona, kondensaattoreiden kapasitanssin suuruus vaikuttaa suoraan staattorikämiin indusoituvan jännitteen suuruuteen. (Pitkänen 2007.)

Häkkikäämitty oikosulkugeneraattori kuluttaa loistehoa riippumatta siitä, toimiiko se generaattorina vai moottorina. Myös toimittaessa nollateholla tarvitsee generaattori loistehoa. Tuotetun pätötehon kasvaessa lisääntyy myös verkosta otetun generaattorin magnetointiin tarvittavan loistehon määrä. (Kärkkäinen 2009, 19.)

Siirtoverkossa tapahtuva oikosulku pudottaa verkon jännitetasoa ja mikäli alueella on myös oikosulkugeneraattoreilla varustettuja tuulivoimaloita, pudottaa näiden tarvitsema loisvirta siirtoverkon jännitettä vielä lisää. Jännitepudotuksen ollessa tarpeeksi suuri, voi olla, että generaattorin sähköinen vääntömomentti ei enää riitä hallitsemaan turbiinin mekaanista vääntömomenttia. Generaattorista tulee tällöin epävakaata ja sen pyörimisnopeus alkaa kiihtyä, mistä voi seurata laiterikkoja. (Kärkkäinen 2009, 19.)

Saarekekäytössä tietty sähköverkon osa toimii erillään muusta verkosta ja saa syöttönsä muusta verkosta irrallaan olevalla laitteella. Oikosulkugeneraattorin saarekekäytössä on huolehdittava, että tuotettu ja kulutettu teho ovat koko ajan yhtä suuria pätö- ja loistehon osalta. (Pitkänen 2007.)

Jos saarekekäytössä tapahtuu nopeita kuormitusten poiskytkentöjä, alkaa generaattorin nopeus nousta. Tämä taas johtaa vaarallisiin ylijännitteisiin ellei magnetointia vähennetä nopeasti. (Pitkänen 2007.)

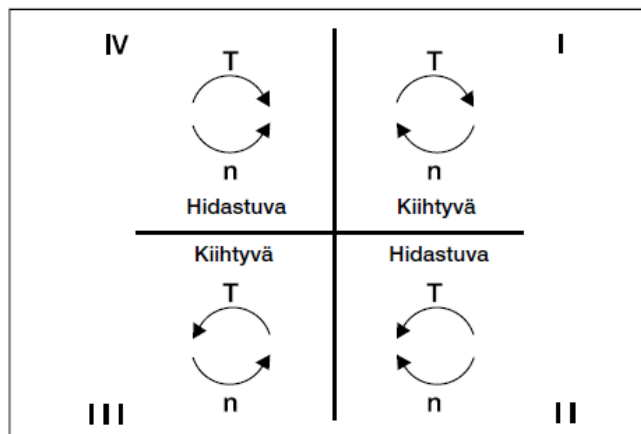
3 SÄHKÖKÄYTÖT

Sähkökäytöt tarkoittavat järjestelmiä, jotka muuttavat sähköenergiaa mekaaniseksi energiaksi tehoelektroniikan ja sähkömoottorien (sähkökoneiden) avulla mahdollistaen liikkeen ohjauksen (Aalto-yliopiston www-sivut 2014, hakupäivä 29.3.2014). Niiden käyttökohteina ovat esimerkiksi sähköiset pumppu-, puhallin- ja nosturisovellukset.

Sähkökäytön pääkomponentit ovat energiansäätö, moottori ja tehonsiirto. Niiden jokaisen kautta voidaan säätää nopeutta, minkä avulla saavutetaan energiansäästöjä kun moottori käyttää vain tarvittun määrän sähköenergiaa. (Tekninen opas 4, 2001.)

3.1 Käyttösovellukset

Käyttösovellukset voidaan jaotella neljään kvadranttiin nopeuden ja momentin mukaan. Niissä liike (nopeus) voi olla jompaankumpaan suuntaan ja samaan aikaan momentti voi olla joko myötä- tai vastasuuntaan itse liikkeeseen nähden. Näiden kahden tekijän yhteenlaskettu vaikutus kohteen liikkeeseen on siten kiihtyvä tai hidastuva. (kuvio 8)



Kuvio 8. Käyttösovellukset nopeuden ja momentin mukaan (Tekninen opas 8 2001)

Käyttösovellukset voidaan edelleen ryhmitellä kolmeen pääluokkaan sen perusteella kuinka montaa kvadranttia sovellus tukee.

Luokassa yksi oleva yhden kvadrantin sovellus on yleisin vaihtovirtakäyttöjen sovellus. Siinä nopeus ja momentti pyörivät aina samaan suuntaan ja teho (nopeus kertaa momentti) virtaa vaihtosuuntaajasta prosessiin. Tällaisia sovelluksia ovat esimerkiksi

pumppu- ja puhallinsovellukset, joissa kuormitusmomentti käyttäytyy neliöllisesti. (Tekninen opas 8 2001.)

Luokkaan kaksi kuuluvat kahden kvadrantin sovellukset. Niissä pyörimissuunta ei vaihdu, mutta momentin suunta voi vaihtua. Erityisesti hätäpysäytys voi vaatia kahden kvadrantin käytön, vaikka itse prosessi tarvitsisi vain yhden kvadrantin ratkaisun. (Tekninen opas 8 2001.)

Luokan kolme muodostavat neljän kvadrantin sovellukset, missä nopeuden ja momentin suunta voivat vaihdella vapaasti. Näitä sovelluksia ovat esimerkiksi nosturit, leikkaaminen, taivuttaminen ja koneen testaus. (Tekninen opas 8 2001.)

Tämän työn pääkohteena ovat neljän kvadrantin sovellukset, sillä niissä pystytään tutkimaan käyttöjen ja niihin liittyvien moottoreiden ilmiöitä laajimmin.

3.2 Käyttötyypit

Sähkökäytöt voidaan jaotella kolmeen pääryhmään: suorat, vaihtuvat ja säädettävät käytöt (SFS-käsikirja 16, 2003). Pääryhmä valitaan käytön tarpeita vastaaviksi.

Pääryhmien sisällä on edelleen valittavissa sopiva käyttö eri alaryhmistä. Valintoihin vaikuttavat muun muassa ryhmien ominaisuudet, hankintahinnat, suunnittelujen ja asennusten monimutkaisuus, tilavaatimukset, jäähdytysvaatimukset, laitteiston eliniän ajalta käyttämisen ja laitteiston vaatiman huollon hinta.

3.2.1 Suorat käytöt

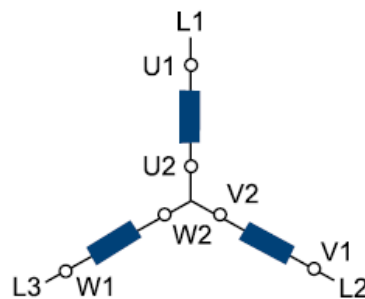
Jos moottori kytketään suoraan sähköverkkoon (DOL), luokitellaan se suoraksi käyttökäytökseksi. Tämä käyttötyyppi on yleisin sen pienen tilavaatimuksen ja yksinkertaisuuden vuoksi. Käytön pysäytystapa on myös suora. (Pehmokäynnistinopas, 2011.)

Suorassa käytössä moottori ottaa kuitenkin suuren käynnistysvirran, joka voi olla 6-8-kertainen nimellisvirtaan nähden (joskus jopa 14-kertainenkin). Myös moottorin tuotta-

ma momentti on suuri, mikä rasittaa siihen kytkettyjä mekaanisia laitteita usein tarpeettomasti. (Pehmökäynnistinopas, 2011.)

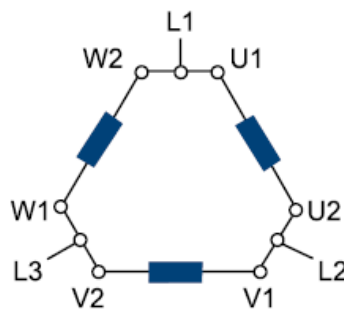
Moottori voi käytännössä olla joko tähti- tai kolmiokytkentäisenä. Tähtikytkentää käytetään tyypillisesti jos käynnistysmomentti on suuri. Kolmiokytkentää käytetään taas jos käynnistysmomentti on pieni.

Tähtikytkennän lisähyöty on sen muodostama nollapiste, jonka ansiosta symmetrisellä kuormalla (kuten moottori on) ei tarvita nollajohdinta (kuvio 9). Tämän johdosta kytkennät voidaan tehdä kevyemmällä kaapeleilla.



Kuvio 9. Tähtikytkentä (Pehmökäynnistinopas, 2011)

Kolmiokytkennässäkään ei ole tarvetta nollajohtimelle (kuvio 10). Kytkennästä saatava teho on olennaisesti suurempi, koska kolmiossa käämien ylitse vaikuttava jännite on pääjännite, kun taas tähtikytkennässä se on pienempi vaihejännite. Samoin käynnistysvaiheen virtapiikki on noin kolminkertainen.



Kuvio 10. Kolmiokytkentä (Pehmökäynnistinopas, 2011)

Valinta tähti- ja kolmiokytkennän välillä voi myös perustua käytettävissä olevaan jännitetasoon. Samaa moottoria voidaan käyttää eri jännitteillä vaihtamalla kytkentä toiseksi, esimerkiksi moottorin kolmiokytkennällä jännitetasona voi olla 400 V ja tähtikytkennällä 690 V.

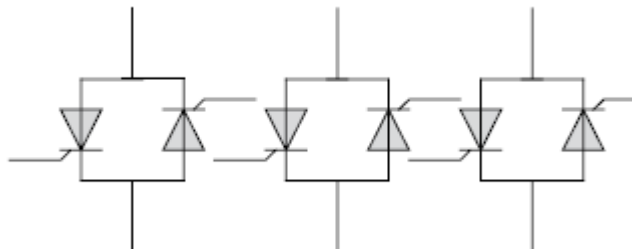
3.2.2 Vaihtuvat käytöt

Käytöt, joissa kytkentää vaihdetaan ajon aikana, kuuluvat vaihtuviin käyttöihin. Yleisimpiä niistä ovat tähtikolmio-, pehmo- ja suunnanvaihtokäynnistimet.

Tähtikolmiokäynnistimen tarkoitus on käynnistää moottori ensin tähtikytkentäisenä, jolloin sen käynnistysvirtapiikki on pienempi. Asetetun ajan jälkeen kytkentä vaihdetaan kolmiokytkentään, mistä aiheutuu myös oma käynnistysvirtapiikkinsä. Tämä toinen virtapiikki jää kuitenkin pienemmäksi kuin suoraan kolmiolla käynnistettäessä.

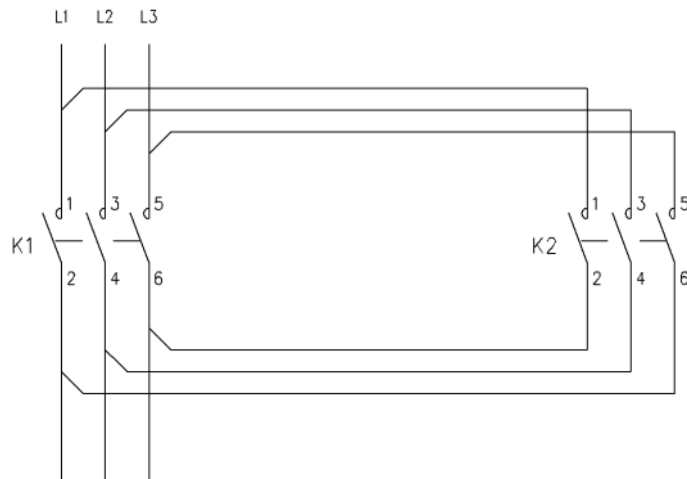
Tähtikolmiokäynnistin toimii kevyesti kuormitetuilla käytöillä. Raskaasti kuormitetuissa käytöissä tähtikytkennän tuottama momentti ei riitä käynnistysvaiheessa mekaanisen momentin voittamiseen.

Pehmokäynnistimessä on mallista riippuen joko kahdessa tai kaikissa kolmessa vaiheessa tyristoripari vastakkain (kuvio 11). Niiden toimintaa ohjaamalla voidaan säätää läpikäsevän jännitteen määrää ja näin pienentää käynnistysvirtapiikkiä. Samoin sen avulla pystytään hidastamaan moottorin nopeutta pysäytysvaiheessa pehmeästi ilman laitteistoja kuormittavaa jännitteen suoraa katkaisua.



Kuvio 11. Pehmokäynnistimen tyristoriperiaate (Pehmokäynnistinopas, 2011)

Suunnanvaihtokäynnistimen avulla voidaan vaihtaa moottorin pyörimissuunta toiseksi ajon aikana. Suunnan vaihtaminen toteutetaan yksinkertaisesti vaihtamalla kahden vaiheen (esimerkiksi L1 ja L3) paikkaa keskenään esimerkiksi kontaktoreiden (kuviossa K1 ja K2) avulla (kuvio 12).



Kuvio 12. Suunnanvaihtokytkenä

Suunnanvaihtokäynnistimessä ei ole käynnistystä tai pysäytystä pehmentävää tukea. Toiminta on siis kuten suorassa käytössä.

Vaihtuva käyttö voidaan myös toteuttaa kaksinopeusmoottorilla, missä moottoriin on toteutettu kaksi erilaista staattorikäymistä. Näillä eri käänityksillä saadaan moottoriin kaksi napamäärillä olevaa kytkentää ja niiden kautta eri nopeudet ja tehot.

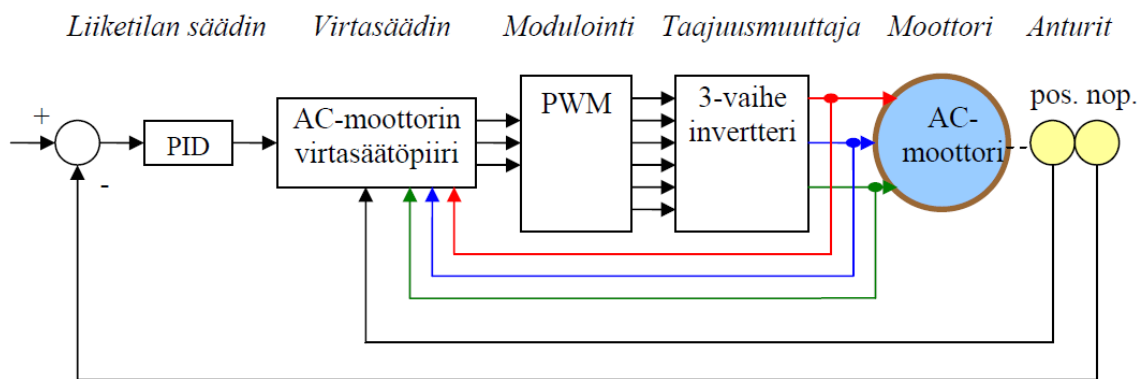
Kaksinopeusmoottoreilla voidaan toteuttaa kaksi erilaista toimintatehoa, esimerkiksi suurempi ilmanvaihto päivällä kuin yöllä. Nykyisin taajuusmuuttajat ovat kuitenkin suurilta osin korvanneet kaksinopeusmoottorit.

3.2.3 Säädetävät käytöt

Säädetäviin käyttöihin luetaan taajuusmuuttajat, servo- ja tasavirtakäytöt. Näistä yleisimpiä ovat taajuusmuuttajat.

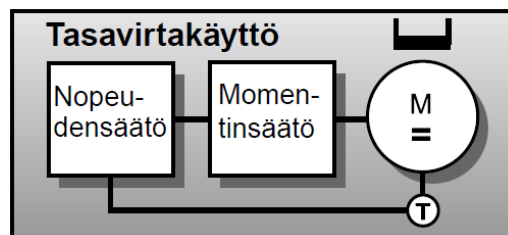
Taajuusmuuttajalla säädellään taajuutta jonka seurauksena moottorin nopeutta voidaan säätää pehmeästi käynnistys-, käyttö- ja pysäytysvaiheissa. Taajuusmuuttajia käsitellään tarkemmin kappaleessa 4.

Servokäyttö koostuu tyypillisesti moottoriin liitetystä takaisinkytkentäanturista, taajuusmuuttajasta ja ohjaus- sekä säätölogiikasta (kuvio 13). Servokäytön tärkein ominaisuus on sen suuri toimintatarkkuus, johon päästään asento- ja nopeustiedon takaisinkytkennän avulla. (Halme & Parikka 2005.)



Kuvio 13. Servokäytön rakenne (Halme & Parikka 2005)

Tasavirtakäytössä momenttia voidaan muuttaa helposti ankkurivirtaa säätämällä ja pitämällä samalla magnetointivirta vakiona. Myös nopeutta voidaan säätää ankkurivirran avulla (kuvio 14). (Tekninen opas 1, 2001.)



Kuvio 14. Tasavirtakäyttö (Tekninen opas 1, 2001)

Tasavirtakäytön momentti- ja nopeusvaste on hyvä ja tarkka ja sitä on helppo säätää. Säätösuureina käytettyjä ankkuri- ja kenttävirtoja mitataan suoraan moottorista. Moottorin heikkoutena on korkea hankintakustannus, mekaaninen monimutkaisuus ja säännöllisen huollon tarve. (Tekninen opas 1, 2001.)

Tasavirtakäyttöjä on hyödynnetty aikaisemmin teollisuudessa hyvinkin laajasti, mutta muut ratkaisut ovat nykyisin vallanneet alaa. Silti tasavirtakäyttöjä on edelleenkin käytössä erityisesti paperikoneissa, joissa tarvitaan tarkkaa momentin ja nopeuden säätöä.

3.2.4 Ohjauslogiikan mukaiset käyttötyypit

Toisaalta sähkökäytöt voidaan jakaa kolmeen ryhmään niiden ohjaustapoihin perustuen: erillis-, ryhmä- ja linjakäyttöihin (Nieminen 2003). Kaikki tässä työssä käsiteltävät käytöt ovat luonteeltaan erilliskäyttöjä.

Erilliskäytöt ovat yksittäisten laitteiden ohjaukseen tarkoitettuja käyttöjä. Käytöt voivat pohjautua suoraan kontaktoriohjaukseen (kuten suora- ja suunnanvaihtokäynnistin), pehmokäynnistimiin tai taajuusmuuttajiin. Näitä käyttöjä ovat esimerkiksi pumppu- ja puhallinkäytöt. (Nieminen 2003.)

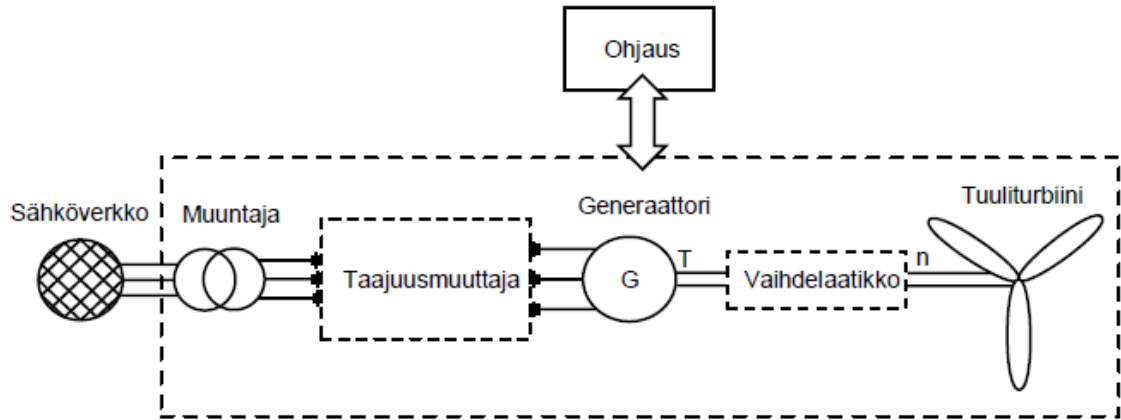
Ryhmäkäytöt muodostuvat useasta erilliskäytöstä, jotka on loogisesti kytketty toisiinsa. Käyttöjä voidaan syöttää yhdestä pisteestä ja jokaisella ryhmällä voi olla oma vaihtosuuntaajansa. Esimerkkinä voidaan mainita nosturikäyttö, missä kolme moottoria toimii yhteisen logiikan kautta yhteistyössä. (Nieminen 2003.)

Linjakäytöt ovat monimutkaisia ryhmäkäyttöjä, joiden ryhmät on kytketty mekaanisesti radan kautta toisiinsa. Ryhmällä on oltava yhteinen, nopeasti reagoiva logiikka ja keskinäisiä lukituksia. Linjakäyttöperiaatteella toimivassa taajuusmuuttajakäytössä on yhteinen tasavirtakiskosto ja osa käytöistä voi jarruttaa samaan kiskoon. Linjakäyttöjä löytyy paperi- ja metalliteollisuudesta. (Nieminen 2003.)

3.3 Tuulivoimakäyttö

Tuulivoimaloissa järjestelmä muuttaa mekaanista energiaa sähköiseksi energiaksi. Silti sitä voidaan mallintaa sähkömoottorikäyttöjen periaatteiden mukaisesti, sillä tuulivoimaloissa turbiinin pyörimisnopeus on yleensä irrotettu sähköverkon taajuuden määrästä akselinopeudesta. Tämän takia säädetyt käytöt ovat käyttökelpoisia ratkaisuja. (Hietalahti 2012, 17.)

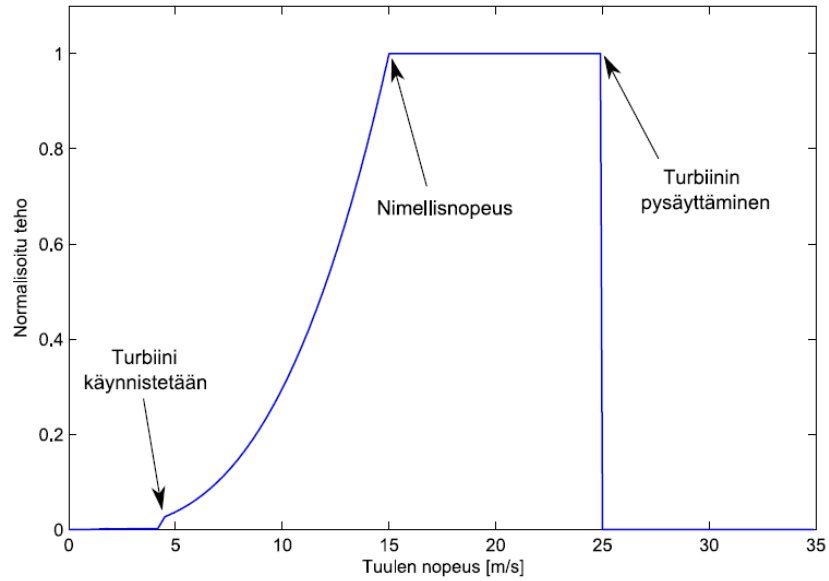
Tuulivoimakäyttö sisältää tuuliturbiinin, mahdollisen vaihdelaatikon, generaattorin, taajuusmuuttajan ja muuntajan (kuvio 15). Käytölle on myös oma ohjauksensa. (Haverinen 2008.)



Kuvio 15. Tuulivoimakäytön periaatekuva (Haverinen 2008)

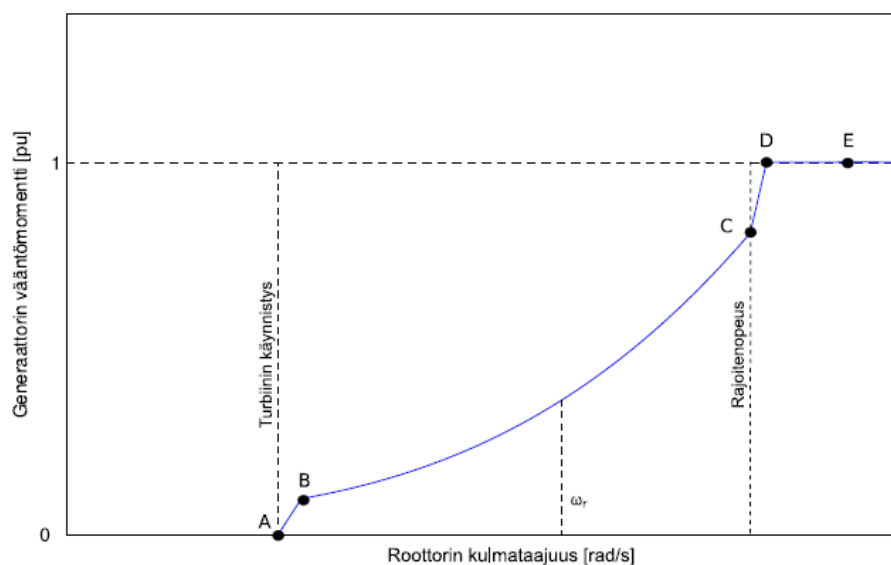
Yleensä tuulivoimaloissa käytetyt häkkikäämityt epätahtigeneraattorit ovat 2 tai 3 napaisia, joten staattorin tahti nopeus on 1000-1500 r/min. Tuuliturbiinin pyörimisnopeuden ollessa luokkaa 20 r/min, tarvitaan turbiinin ja generaattorin välille vaihteisto. Tuulivoimakäytössä tuotanto aloitetaan vasta generaattorin pyörimisnopeuden ollessa vähintään 15 %:a generaattorin nimellisa nopeudesta. (Kärkkäinen 2009, 19 ja 31.)

Tuulivoimalan nimellinen suorituskyky saavutetaan mitoitus tuulen nopeudella eli nimellisa nopeudella (kuvio 16). Tätä pienemmilla tuulen nopeuksilla tuulivoimalaa käytetään niin, että energian tuotto maksimoituu. Turbiinin kierrosnopeus ja napakulma optimoidaan tuulen mukaan. Nimellisa nopeutta suuremmilla tuulen nopeuksilla sähkö tuotto rajoittuu sähkökäytön mitoituksen mukaan vakioteho-ohjauksena. (Hietalahti 2012, 18.)



Kuvio 16. Tuulivoimalan tehokäyrä (Kärkkäinen 2009, 16)

Erittäin heikoilla tuulenopeuksilla generaattorin kulmataajuus on lähes vakio (väli A-B) (kuvio 17). Toimittaessa keskimääräisissä tuuliolosuhteissa (B-C) otetaan turbiinin kautta suurin mahdollinen saatavissa oleva energia pitämällä generaattorin vääntömomentin säädöllä hyötysuhde CP optimipisteessä. Käyrällä on turbiinin aiheuttaman melun takia rajoitepiste C, jossa generaattorin sähköistä vääntömomenttia lisätään nopeasti generaattorin nimellismomenttiin D. Kovilla tuulenopeuksilla turbiinin lapakulmasäätö rajoittaa turbiinin aikaansaamaa vääntömomenttia (D-E). (Kärkkäinen 2009, 11.)



Kuvio 17. Tuulivoimalan generaattorin vääntömomentin säätö (Kärkkäinen 2009, 12)

Jännitekuopan aikana tuulivoimaloissa on ongelmana suuntaajan välipiirin jännitteen nopea ja hallitsematon kasvaminen. Kun tuulivoimalan liityntäpisteen jännite laskee, heikkenee myös verkonpuoleisen vaihtosuuntaajan kyky siirtää pätötehoa verkkoon. Tuulivoimalan generaattorin energian tuottoa ei voida kuitenkaan rajoittaa yhtä nopeasti, joten ”ylimääräinen” energia nostaa välipiirin jännitettä. Kun vika poistuu verkosta syöttää tuulivoimalaitos pätötehoa verkkoon yli nimellistehollaan, kunnes välipiirin kondensaattorin lataus palautuu normaalin tasoonsa. (Kärkkäinen 2009, 42.)

Jännitekuopan tapahtuessa voimalat eivät saa irrota verkosta heti, vaan niiden on tuettava siirtoverkkoa syöttämällä sinne loisvirtaa. Tämä määräys koskee myös tuulivoimaloita. (Palmumaa, 2010.)

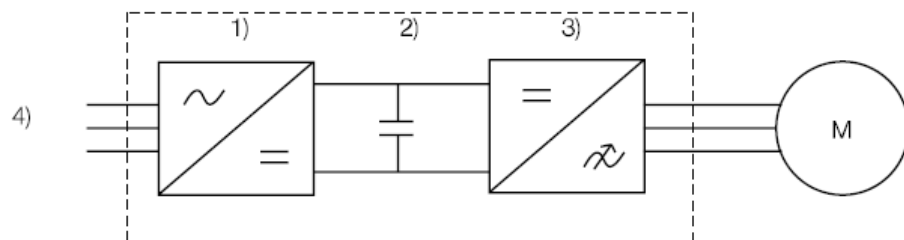
Perinteinen tapa hallita vikatilanteiden aikana syntyvää energiaa on kuluttaa energia välipiiriin tehokytkimen kautta liitetyllä jarruvastuksella. Vastuksen jännitteensäätö tapahtuu ohjaamalla tehokytkimen kytkentäsuhdetta. (Kärkkäinen 2009, 44.)

4 TAAJUUSMUUTTAJAT

Taajuusmuuttajalla muodostetaan siihen syötetystä kolmivaiheisesta vaihtojännitteestä tasajännitteen kautta uudestaan kolmivaiheinen vaihtojännite. Tuotettavan jännitteen lähtötaajuutta voidaan tässä yhteydessä säätää syöttävän verkon taajuudesta riippumatta. Koska jännitteen taajuuden muutoksen vaikutus on suoraan verrannollinen oikosulkumoottorien pyörimisnopeuteen, voidaan taajuusmuuttajalla säätää moottorin pyörimisnopeutta portaattomasti. Nykyaikaisissa taajuusmuuttajissa voidaan myös säätää vääntömomenttia siten, että pyörimisnopeus pysyy vakiona.

Taajuusmuuttaja pystyy säätämään taajuutta ja virtaa siten, että siihen kytketyn moottorin kiihdytys ja hidastus on prosessin kannalta edullisin. Pehmeä käynnistys ja pysäytys poistaa esimerkiksi pumppukäytössä nesteiden paineiskut putkistoissa. Samalla pienennetään moottorin normaalisti ottamaa suurta käynnistysvirtapiikkiä ja sähköverkon kuormitusta.

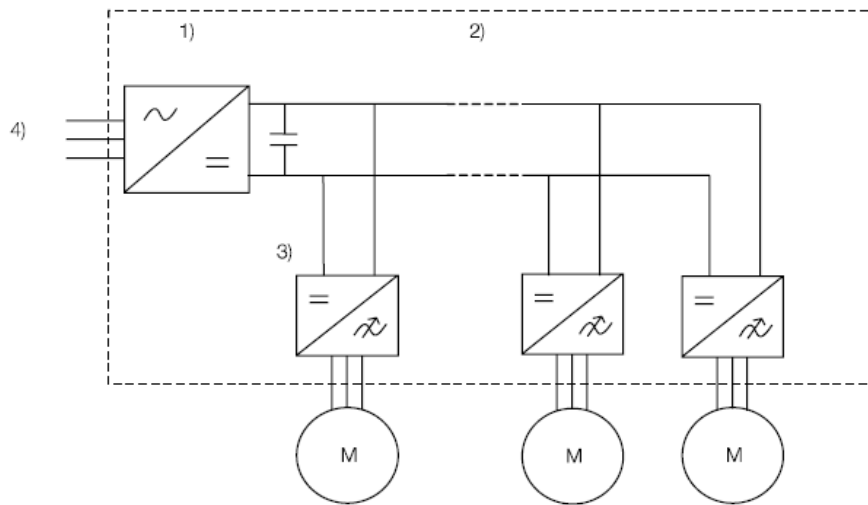
Taajuusmuuttajan rakenne voidaan jakaa seuraaviin osiin: 1) tasasuuntaaja, 2) välipiiri, 3) vaihtosuuntaaja ja 4) sähköön syöttö (kuvio 18). Lisäksi järjestelmään kuuluu edellä mainittuja ohjaava ohjaus- ja säätöpiiri. Sähköverkosta taajuusmuuttajaan syötetty sinimuotoinen vaihtojännite tasasuunnataan. Tämä sykkivä tasasähkö suodatetaan välipiirissä olevilla kondensaattoreilla, jotka tasoittavat jännitteen ja toimivat samalla energia-
varastona. Vaihtosuuntausyksikkö muuttaa suodatetun tasajännitteen halutun taajuiseksi vaihtojännitteeksi, joka syötetään moottorille. (Tekninen opas 7 2001.)



Kuvio 18. Taajuusmuuttajan rakenne (Tekninen opas 7 2001)

Jos sähkökäyttö sisältää itsessään monta linjakäyttöä, voidaan sähköverkon (kuvio 19, kohta 4) tarjoaman sähköön tasasuuntaus (kuvio 19, kohta 1) erottaa omaksi yksikökseen, joka palvelee kaikkia käyttäjiä. Silloin käyttöjen vaihtosuuntausyksiköt (kuvio 19, kohta

3) kytetään kaikille yhteiseen tasajännitevälipiiriin (kuvio 19, kohta 2). (Tekninen opas 7 2001.)



Kuvio 19. Taajuusmuuttajien yhteinen tasajännitevälipiiri (Tekninen opas 7 2001)

Myös moottorin pysähtymisaika voidaan säätää taajuusmuuttajan avulla prosessiin sopivaksi. Jos esimerkiksi ison hitausmomentin omaava laite täytyy pysäyttää nopeasti, ei taajuusmuuttaja kykene siihen ilman lisälaitteita. Tällöin sen yhteyteen voidaan asentaa jarrukatkoja ja -vastus, jotka muuttavat jarrutusenergian lämmöksi.

Toinen mahdollisuus jarrutuksessa on syöttää siinä muodostuva energia takaisin tasavirtakiskoon. Lisäksi linjakäyttöä syöttävä tasasuuntaaja voi olla myös kaksisuuntainen.

Joissain järjestelmissä on syytä välttää tiettyjä taajuuksia esimerkiksi laitteiston mekaanisten resonanssien takia. Taajuusmuuttajille voidaankin asettaa estotaajuuksia, joita ei käytetä ollenkaan ja näin vältetään resonoinneilta.

Taajuusmuuttajissa tapahtuu häviöitä, jotka johtuvat tehoelektroniikan lämpenemisestä kuormituksen yhteydessä. Esimerkiksi ABB:n ACS800-sarjan 15 kW:n taajuusmuuttajilla se on 3 prosentin verran (ACS800 2013). Tämä heikentää hieman taajuusmuuttajakäytön kokonaishyötysuhdetta.

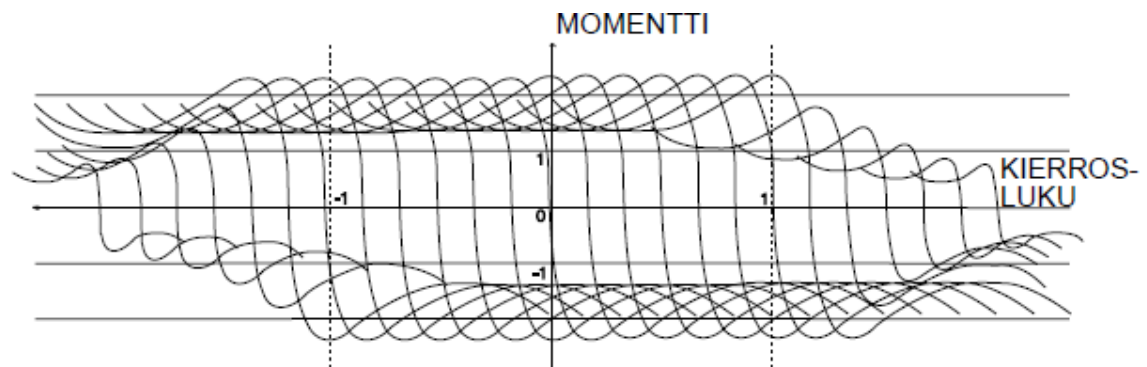
Yksi taajuusmuuttajakäyttöjen haasteista ovat laakerivirrat, joiden esiintyminen riippuu käytettyjen moottoreiden eristystasosta. Esimerkiksi ABB:n moottoreissa alle 500 V

nimellisjännitteillä ei laakerivirroista ole ongelmaa. Isommilla moottoreilla voidaan käyttää dU/dt -suotimia poistamaan laakerivirran ja jännitepiikkien ongelmia sekä taajuushäiriöitä. Laakereita voidaan myös eristää lisää. (ACS800 2013.)

4.1 Kentänheikennys

Oikosulkumoottorin nopeutta voidaan ohjata muuttamalla syöttöjännitteen taajuutta. Jos moottorin pyörintänopeutta halutaan nostaa yli nimellisnopeuden, sen magnetointi pienenee ja sen kautta myös moottorista saatava vääntömomentti pienenee. Tällöin moottori toimii kentänheikennysalueella. (Aura & Tonteri 2009.)

Taajuusmuuttajan avulla moottoria voidaan käyttää nimellistaajuuden ja -nopeuden yläpuolella kentänheikennysalueella. Tuolla alueella moottori voi toimia vakioteholla, mistä tulee alueen toinen nimitys vakiotehoalue. (Tekninen opas 7 2001.)



Kuvio 20. Taajuusmuuttajan syöttämän oikosulkumoottorin momentti/kierroslukukäyrät (Tekninen opas 7 2001)

Huippumomentti on käytettävissä lyhytaikaisesti kentänheikennyspisteen alapuolella. Moottoria voidaan siis käyttää maksimimomentilla, mutta yleensä taajuusmuuttajat rajaavat suurimmaksi arvoksi 70 % maksimimomentista. Kentänheikennyspisteen yläpuolella moottorin maksimimomentin lasku on taas kääntäen verrannollinen taajuuden neliöön. (Tekninen opas 7 2001.)

4.2 Taajuusmuuttajan valinta

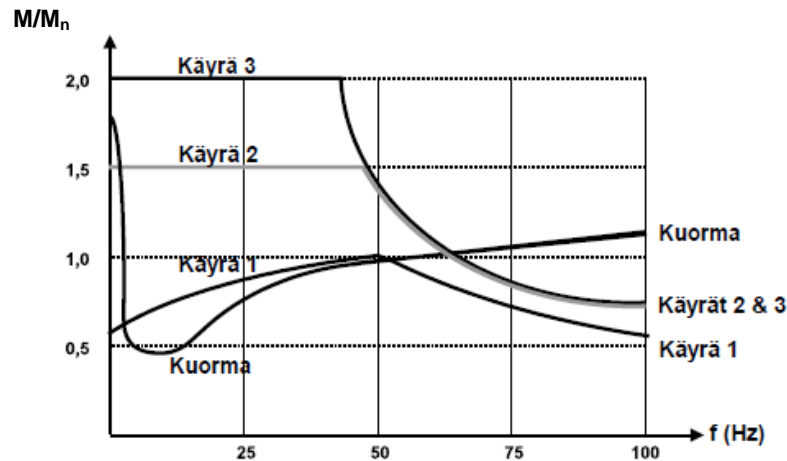
Hyvin usein taajuusmuuttaja valitaan muiden säätöratkaisujen sijasta, sillä sen avulla saavutetaan usein huomattavia kokonaissästöjä koko käytön elinkaaren ajalta. Esimerkiksi tavallisella sähkömoottori-pumppu-venttiilikuristus -ratkaisulla saadaan kyllä haluttu virtaus mutta häviöt ovat suuret verrattuna taajuusmuuttaja-pumppu -ratkaisuun.

Taajuusmuuttajan valintaan vaikuttavat kuormitustyyppi, jatkuva- ja maksimivirta sekä syöttöverkko. Kuormitustyyppin avulla pystytään tekemään valinta esimerkiksi sopiiko laitteistoksi tavallinen vai (verkkoon)jarruttava taajuusmuuttaja. Muiden arvojen avulla pystytään valitsemaan taajuusmuuttajalle sopiva kokoluokka.

Jos taajuusmuuttajalla ohjattua oikosulkumoottoria käytetään alle nimellisnopeudella ja vakiomomenttikäytössä, sen jäähdytystarve kasvaa. Itsejäähdytteiset moottorit joudutaan tuolloin varustamaan erillisillä tuuletuksella tai vaihtamaan isompi moottori ja taajuusmuuttaja.

4.3 Kuormitettavuus

Tyypillisimpiä kuormitustyyppejä on kahdenlaisia: vakiokuormitusmomentti ja neliöllinen kuormitusmomentti (Tekninen opas 8 2001, 12). Taajuusmuuttajakäytössä moottorin kuormitusta voidaan säätää (kuvio 21). Käyrä 1 on jatkuvasti käytettävissä oleva kuormitus, minkä moottori kestää normaalisti. Muiden käyrien käyttöaika on rajoituneempi moottorin vaatiman lisjäähdytyksen vuoksi. (Tekninen opas 4 2001.)



Kuvio 21. Moottorin kuormitettavuus taajuusmuuttajakäytössä (Tekninen opas 4 2001)

Itse taajuusmuuttajaa voidaan kuormittaa jatkuvasti sen nimelliskuorman verran. Ylikuormitukselle valmistajat antavat yleensä aikarajan kuinka kauan ja millaisilla aikaväleillä. Esimerkiksi ACS800-11-0016 -mallissa sallitaan ylikuormitusta minuutin ajan viiden minuutin välein (ACS800, 2013).

4.4 Jarrutus

Taajuusmuuttajalla voidaan jarruttaa moottoria ja siitä saatava teho johtaa joko jarrukatkojaan tai takaisin sähköverkkoon. Sähköisessä jarrutuksessa käytetyt laitteet mitoiteetaan jarrutustehon mukaan. Mekaaninen jarrutusteho riippuu jarrutusmomentista ja nopeudesta. Virta on ensisijainen pienjännitteisten vaihtovirtakäyttöjen kustannuksia määrittävä tekijä. (Tekninen opas 8 2001, 7.)

4.4.1 Vuojarrutus

Vuojarrutus on moottorin häviöihin perustuva jarrutusmenetelmä. Kun sähkökäytössä tarvitaan jarrutusta, vuota ja siten myös moottorissa käytettyä magnetointivirtaa kasvatetaan. Vuota voidaan helposti säätää suoran momentinsäädön (DTC) avulla. (Tekninen opas 8 2001, 13.)

Vuojarrutuksessa virrankasvu aiheuttaa lisähäviöitä moottorin sisällä. Myös moottorin jarrutusteho kasvaa, vaikka taajuusmuuttajan jarrutusteho ei kasva. Virrankasvu luo lisähäviöitä moottorin vastuksissa. Mitä suurempi vastusarvo on, sitä suurempi on jarru-

tusenergian häviö moottorin sisällä. Vuojaarrutus on siten tehokkainta pienitehoisissa moottoreissa. (Tekninen opas 8 2001, 13.)

Vuojaarrutuksen suurimmat edut:

- Suoraa momentinsäätöä käytettäessä ei tarvita lisäkomponentteja eikä lisäkustannuksia synny.
- Moottoria säädetään jarrutuksen aikana toisin kuin käytöille tyypillisessä DC-jarrutuksessa. (Tekninen opas 8 2001, 14.)

Vuojaarrutuksen suurimmat haitat:

- Moottoriin kohdistuu kasvava lämpörasitus, jos jarrutus toistetaan lyhyin aikaväleihin.
- Moottorin ominaisuudet kuten esimerkiksi vastusarvo rajoittavat jarrutustehoa.
- Vuojaarrutus on tehokasta erityisesti pienitehoisissa moottoreissa. (Tekninen opas 8 2001, 14.)

4.4.2 Ylijännitesäätö

Välipiirin tasajännitteen liiallinen nousu voidaan estää niin, että vaihtosuuntaaja itse estää tehovirtauksen prosessista taajuusmuuttajaan. Tämä tapahtuu rajoittamalla jarrutusmomenttia välipiirin vakiojännitetason säilyttämiseksi. Menetelmää kutsutaan ylijännitesäädöksi ja se on useimmissa käytöissä vakio-ominaisuus. (Tekninen opas 8 2001, 15.)

4.4.3 Jarrukatkoja ja -vastus

Välipiirin tasajännitteen liiallista nousua voidaan rajoittaa myös johtamalla jarrutusenergia vastukseen jarrukatkojan kautta. Jarrukatkoja on elektroninen kytkin, joka liittyy välipiirin tasajännitteen vastukseen, ja jossa jarrutusenergia muunnetaan lämmöksi. (Tekninen opas 8 2001, 15.)

Jarrukatkojan ja -vastuksen suurimmat edut ovat:

- Yksinkertainen elektroninen rakenne ja tunnettu tekniikka.

- Katkojan ja vastuksen alhaiset peruskustannukset.
- Katkoja toimii, vaikka vaihtovirran syöttö olisi poikki.
- Jarrutusta voidaan tarvita sähkökatkoksen aikana, esim. hisseissä tai muissa turvallisuuden suhteen kriittisissä sovelluksissa. (Tekninen opas 8 2001, 15.)

Jarrukatkojan ja -vastuksen suurimmat haitat ovat:

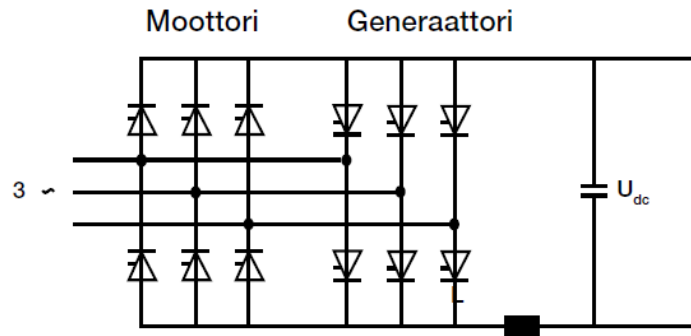
- Jarrutusenergia menee hukkaan, jos lämmitettyä ilmaa ei voida hyödyntää.
- Jarrukatkoja ja -vastukset vaativat tilaa.
- Lisäinvestointeja voidaan tarvita jäähdytyksen ja lämmön talteenottojärjestelmään.
- Jarrukatkojat mitoitetaan yleensä tietylle jaksolle, esim. 100 % teho yhden minuutin ajan 10 minuutin välein, pitkät jarrutusajat vaativat jarrukatkojan tarkempaa mitoitusta.
- Palovaara kasvaa kuumen vastuksen ja ympäröivässä ilmassa mahdollisesti olevan pölyn ja kemiallisten ainesosien seurauksena.
- Jarrutuksen aikana kasvanut välipiirin tasajännite aiheuttaa ylimääräistä jänniterasitusta moottorin eristykselle. (Tekninen opas 8 2001, 15.)

4.4.4 Verkkoonjarrutus

Teknisenä toteutuksena verkkoonjarrutuksessa voi olla joko vastarinnankytketty tyristorisilta tai IGBT-silta.

Vastarinnankytketty tyristorisilta

Taajuusmuuttajan dioditasasuuntaussillat voidaan korvata kahdella vastarinnankytketyllä tyristoritasasuuntaajalla (kuvio 22). Näin tasasuuntaussiltaa voidaan vaihtaa prosessin tarvitseman tehovirtauksen mukaan. (Tekninen opas 8 2001.)



Kuvio 22. Vastarinnankytketty tyristorisilta (Tekninen opas 8 2001)

Vain yksi silta toimii kerrallaan, jolloin toisen sillan toiminta on estetty. Tyristorin sytymishetkeä (ohjauksulmaa) säädellään jatkuvasti välipiirin jännitteen pitämiseksi halutulla tasolla. (Tekninen opas 8 2001.)

Vastarinnankytketyn tyristorisillan suurimmat edut ovat:

- Ratkaisu on tunnettu.
- Investointeja tarvitaan vähemmän kuin IGBT-ratkaisussa.
- Tasajännitettä voidaan säätää pienemmäksi kuin verkossa. Tämä on etu tietyissä erikoissovelluksissa. (Tekninen opas 8 2001.)

Vastarinnankytketyn tyristorisillan suurimmat haitat ovat:

- Kommutointimarginaalin säilyttämiseksi välipiirin tasajännite on aina alhaisempi kuin syötetty vaihtojännite. Moottoriin syötetty jännite pysyy siten alhaisempana kuin syötettävä vaihtojännite. Tämä voidaan kuitenkin välttää käyttämällä syöttöyksikössä jännitteennostomuuntajaa.
- Jos jännitesyöttö häviää, saattaa sulake palaa tyristorin estyneen kommutoinnin seurauksena.
- $\cos\phi$ vaihtelee kuormituksen mukaan.
- Harmoninen kokonaissärö on suurempi kuin verkkoonjarruttavissa IGBT-yksiköissä.
- Verkkovirran särö voi aiheuttaa ei-toivotun jännitesärön, jonka määrä riippuu syöttävän verkon impedanssista.
- Jarrutus ei ole mahdollista sähkökatkoksen aikana. (Tekninen opas 8 2001.)

IGBT-silta

Verkkoonjarruttavaa IGBT-yksikköä käytetään, kun:

- jarrutus on jatkuvaa tai usein toistuvaa
- jarrutusteho on suuri
- saavutetaan tilansäästöä jarruvastusratkaisuun verrattuna
- verkon yliaaltorajat ovat kriittisiä. (Tekninen opas 8 2001.)

IGBT-pohjaisilla verkkoonjarrutusyksiköillä on kolme yleistä säätötavoitetta. Ensimmäinen tavoite on pitää välipiirin tasajännite vakaana tehovirtauksen absoluuttiarvosta ja suunnasta riippumatta. Näin varmistetaan, että vaihtovirtamoottoreita syöttävät vaihtosuuntaajat voivat toimia optimaalisella tavalla toimintapisteestä huolimatta. Välipiirin tasajännite on vakaa, kun välipiiriin tuleva tehovirtaus vastaa välipiiristä lähtevää tehovirtausta. Sopiva tehovirtaus saavutetaan säätämällä kahden vaihtovirtajärjestelmän välistä tehokulmaa. (Tekninen opas 8 2001.)

Verkkoonjarruttavan IGBT-yksikön suurimmat edut ovat:

- Syöttövirran yliaaltojen alhainen määrä sekä moottori- että verkkoonjarrutustilassa.
- Hyvä dynamiikka tehovirtauksen muuttuessa nopeasti.
- Mahdollisuus nostaa tasajännitettä syötettävää vaihtojännitettä suuremmaksi. Näin voidaan kompensoida heikkoa verkkoa tai lisätä moottorin maksimimomenttia kentänheikennysalueella.
- Järjestelmän jännitehäviöiden kompensointi jännitteen nostokyvyn ansiosta.
- Mahdollisuus säätää tehokerrointa.
- Verkkokatkossäätö automaattisella synkronoitumisella verkkoon.
- Välipiirin tasajännite on suunnilleen sama moottori- ja jarrutustilassa. Jarrutus ei aiheuta moottorin eristyksille ylimääräistä jänniterasitusta. (Tekninen opas 8 2001.)

Verkkoonjarruttavan IGBT-yksikön suurimmat haitat:

- Suuremmat investointikustannukset

- Jarrutus ei ole käytettävissä sähkökatkoksen aikana
- Korkeasta kytkentätaajuudesta johtuvat suuritaajuiset jänniteylijännitteet. Nämä usean kilohertsin jännitekomponentit voivat herättää muiden sähkölaitteiden pienet kondensaattorit. Eri laitteita syöttävien muuntajien sopivalla suunnittelulla ja järjestelyllä tällaiset ilmiöt voidaan poistaa. (Tekninen opas 8 2001.)

4.5 Häiriöt

Sähkömagneettisen yhteensopivuuden (EMC) vaatimusten mukaan sähkölaitteilta edellytetään, että ne eivät häiritse muiden laitteiden toimintaa, eivätkä toisaalta häiriinny toisten laitteiden toiminnasta. Laitteiden on täytettävä standardin EN 61800-3 ohjeet ja määräykset.

Taajuusmuuttajat ovat EMC:n kannalta hankalia, sillä ne aiheuttavat suurtaajuisia sähkömagneettista häiriötä sähköverkkoon joko johtumalla tai säteilemällä. Näitä häiriöitä tuottavat erityisesti tehokomponenttien ja ohjauselektronikan nopeat kytkentäilmiöt. (Lilja 2011.)

Jotta EN 61800-3 täyttyisi, laitteiden valmistajat ohjeistavat asentajia ja käyttäjiä esimerkiksi seuraavilla tavoilla:

- häiriösuojattujen kaapelien käyttö
- kaapelien kuorinta ja kytkentä, 360-asteinen maadoitus
- kaapelin maksimipituus
- kaapelien keskinäinen sijoittaminen ja risteämiset
- suodattimet. (Lilja 2011.)

Verkkoon tehoa syötettäessä taajuusmuuttajan aiheuttamia häiriöitä on siis suodatettava. Siihen on kehitetty suodattimia (esimerkiksi L- tai LCL-suodatin), joiden tehtävänä on pienentää verkkovaihtosuuntaajan tehokytkimien kytkennöistä aiheutuvia harmonisia virtakomponentteja (Kärkkäinen 2009, 26).

Yleisesti käytetyn LCL-suodattimen etuja yksinkertaisempaan L-suodattimeen verrattuna ovat:

- Aiheuttaa itse vähän verkkohäiriöitä ja sen vaikutukset loistehoon ovat pieniä.
- Mahdollista virittää toimimaan myös melko alhaisille kytkentätaajuuksille.
- Resonanssihuippua suuremmilla taajuuksilla vaimennus 60 dB dekadille.

(Kärkkäinen 2009, 28.)

Suuritehoisiin käyttöihin on asennettu lisäksi LC-suodatin generaattorin ja taajuusmuuttajan väliin (Haverinen 2008).

5 TURVALLISUUS

Laitteiston on täytettävä lain vaatimat sähköturvallisuusmääräykset ja nämä todennetaan käyttöönottotarkastuksen yhteydessä. Normaalien sähköteknisten määräysten lisäksi on huomioitava erityisesti koneturvallisuuden ja laboratoriotilojen asettamat lisävaatimukset.

5.1 Koneturvallisuus

Järjestelmän sisältäessä moottoreita on huomioitava standardin SFS-EN 60204 vaatimukset. Ohessa tämän opinnäytetyön kannalta olennaisimmat tarpeet:

- Syötönerotuskytkin tarvitaan kaikkien koneiden syöttöpiireissä. Se voidaan myös korvata standardin IEC 60309-1 mukaisella pistokytkimellä.
- Kunkin poikkeuksellisesti jännitteisen virtapiirin läheisyyteen on kiinnitettävä varoituskilpi.
- Odottamattoman käynnistyksen estämiseksi on oltava auki-asennon varmistavat kytkinlaitteet, jotka estävät sekä paikallis- että kauko-ohjauksen.
- Jännitteiset osat sijoitettava koteloihin, jotka tarjoavat vähintään IP2X- tai IPXXB-suojaustason. (SFS-EN 60204, 2006, 50-56.)

Koteloiden avaaminen saa olla mahdollista vain, jos jokin ehdoista täyttyy:

- a) Avaimella tai työkalulla avattavissa, jos kotelon sisällä vähintään suojaustaso IP1X tai IPXXA.
- b) Kotelon sisäiset osat kytketään jännitteettömiksi ennen avausta esimerkiksi kotelon kannessa olevalla erotuskytkimellä, joka estää kotelon avaamisen ja aukiolon jännitteisenä.
- c) Ilman työkaluja avattavissa, jos kotelon sisällä vähintään suojaustaso IP2X tai IPXXB. (SFS-EN 60204, 2006, 58-60.)

Moottoreille vaadittu ylläampemissuojaus voidaan toteuttaa usealla tavalla:

- ylikuormitussuojaus, joka aiheuttaa suojaustoimenpiteen ohjauspuolella
- lämpötilasuojaus, joka aiheuttaa suojaustoimenpiteen ohjauspuolella
- virtaa rajoittava suojaus
- mekaanisesti ylikuorman rajoittava ratkaisu
- mitoittamalla moottorikäyttö riittävän isoksi. (SFS-EN 60204, 2006, 70.)

Jos moottorin automaattinen uudelleenkäynnistyminen verkkokatkoksen jälkeen voi aiheuttaa vaaratilanteen, on käynnistyminen estettävä jännitteen palautuessa.

Pysähtymistoiminne on valittava tilanteeseen ja laitteistoon sopivaksi seuraavista luokista:

- Luokka 0: valvoton pysäyttäminen poistamalla teho välittömästi koneen toimilaitteilta.
- Luokka 1: valvottu pysähtyminen, jossa toimilaitteilla on teho pysähtymisen aikaansaamiseksi, minkä jälkeen teho poistetaan toimilaitteilta.
- Luokka 2: valvottu pysähtyminen, jossa toimilaitteilla säilytetään teho. (SFS-EN 60204, 2006,84.)

5.2 Sähkölaboratorio

Koska kyseessä on laboratoriotila, on laitteiston täytettävä standardin SFS6000-8-803 asettamat lisävaatimukset (SFS600-1, 2012, 585). Olennaisimmat siinä esitetyt tämän opinnäytetyön alaisen osuuden turvallisuuteen liittyvät vaatimukset ovat:

- Kytkeäjäjohdot ja mittajohdot on oltava suojattu tahattomalta koskettamiselta. Paljaiden naparuuvien käyttö on kiellettyä.
- Laitteilla on oltava SFS6000-4-41 mukainen vikasuojaus. Tiloissa sijaitsevat enintään 32 A pistorasiat on suojattava enintään 30 mA mitoitustoimintavirtaisella vikavirtasuojalla.

- Työskentelyalueelta on voitava katkaista jännitteet erotuskytkimellä, jonka on oltava lukittavissa. Lisäksi on oltava hätäkytkin, jolla voidaan katkaista alueen jännitteet.
- Normaalien tarkastusten lisäksi on suoritettava määrävälein tarkastuksia ja testauksia, joilla varmistetaan suojausten toimivuus. (SFS600-1, 2012, 585-588.)

Laitteistojen kunnossapitotarkastusten osalta suosituksena on:

- silmämääräinen tarkastus aina ennen käyttöä
- vikavirtasuojien testipainikkeen testaus kuuden kuukauden välein
- hätäkytkinlaitteiden toiminnan testaus yhden vuoden välein
- vikavirtasuojien testaus testilaitteella enintään kahden vuoden välein
- eristysresistanssin mittaus ja suojajohtimien jatkuvuuden testaus enintään viiden vuoden välein. (SFS600-1, 2012, 588.)

6 SUUNNITTELU

Suunnittelun pohjana toimi syksyllä 2013 suoritettu harjoittelujakso, jonka aikana tilaajan tarpeet järjestelmälle tulivat tutuiksi. Järjestelmän ominaisuuksia kehitettiin ja laajuutta kasvatettiin myös suunnittelun aikana.

Järjestelmän tarvitsemien laitteiden ja osien hankintalistaa tehtiin jo syksyn aikana, jolloin hankkeelle budjetoituja rahoja saatiin vielä käyttä. Rahoittajan hankinnoille asetama takaraja oli vuoden 2013 loppu, joten suurimmat hankinnat täytyi tehdä kyseisen syksyn aikana.

6.1 Vaatimuksia

Järjestelmän päätavoite oli tarjota samanaikaisesti kahdelle opiskelijaryhmälle moottoreiden testaus- ja mittausympäristö erilaisten sähkökäyttöjen tutkimiseen. Lisäksi kolmannelle ryhmälle olisi oltava mahdollisuus kuormittaa heidän tutkimaansa käyttöä testihuoneen taajuusmuuttajakäyttöillä. Laitteistolla tuli pystyä myös mallintamaan tuulivoimalan toimintaa ja tarjoamaan erilaisia isoja kuormia eri sähkökäyttöratkaisujen ja järjestelmien testauksiin.

Moottorien käyttöinä oli tuettava seuraavia laitteistoja:

- MNSiS-moottorikeskuksessa
 - o suora käynnistin 5,5 kW
 - o suunnanvaihdolla varustettu käynnistin 5,5 kW
 - o pehmokäynnistimet 5,5 ja 11 kW
 - o taajuusmuuttajat 7,5 ja 11 kW
- Siirrettäviä erillisiä taajuusmuuttajia eri valmistajilta 4-15 kW
- 10 kV:n kojeiston moottorilähtö
- 30 kVA:n dieselgeneraattori
- 15 kW:n verkkoonjarruttava taajuusmuuttaja.

Edellä mainittujen käyttöjen ohjaamien moottoreiden kuormina toimivat generaattori-moottorit piti pystyä kytkemään edelleen laitteistoihin:

- Nocart-saarekekonvertterin 5,5 ja 11 kVA:n generaattoriliitännöihin
- 15 kW:n verkkoonjarruttaviin taajuusmuuttajiin ja sitä kautta sähkövoimalaboratorion jakokeskukseen JK117.

Järjestelmän avulla piti pystyä tutkimaan useita eri asioita: taajuusmuuttajia, sähkömoottoreita, moottoreiden hyötysuhteita, suojausten toimintaa, moottoreiden toimintaa erilaisilla kuormilla ja niiden muutoksilla, oikosulkumoottoria generaattorina, taajuusmuuttajakäyttöä sähköntuotannossa. Myöhemmin voitaisiin tutkimuskohteeksi ottaa myös mahdollisesti tahtikoneen käyttö ja 5,5 kW:n älykkäät simocode- ja umc-moottorilähdöt.

Järjestelmän rakennusvaiheessa saarekekonvertterin käyttötapa muuttui sen teknisten rajoitteiden vuoksi. Saarekekonvertterilla ei pystytty ohjaamaan testihuoneen moottoreita, sillä sen syöttökyky rajaantui vain noin 15 metrin etäisyydelle ja kuorman kytkentä tapahtui turvalaboratoriojohtimilla laitteen kyljestä.

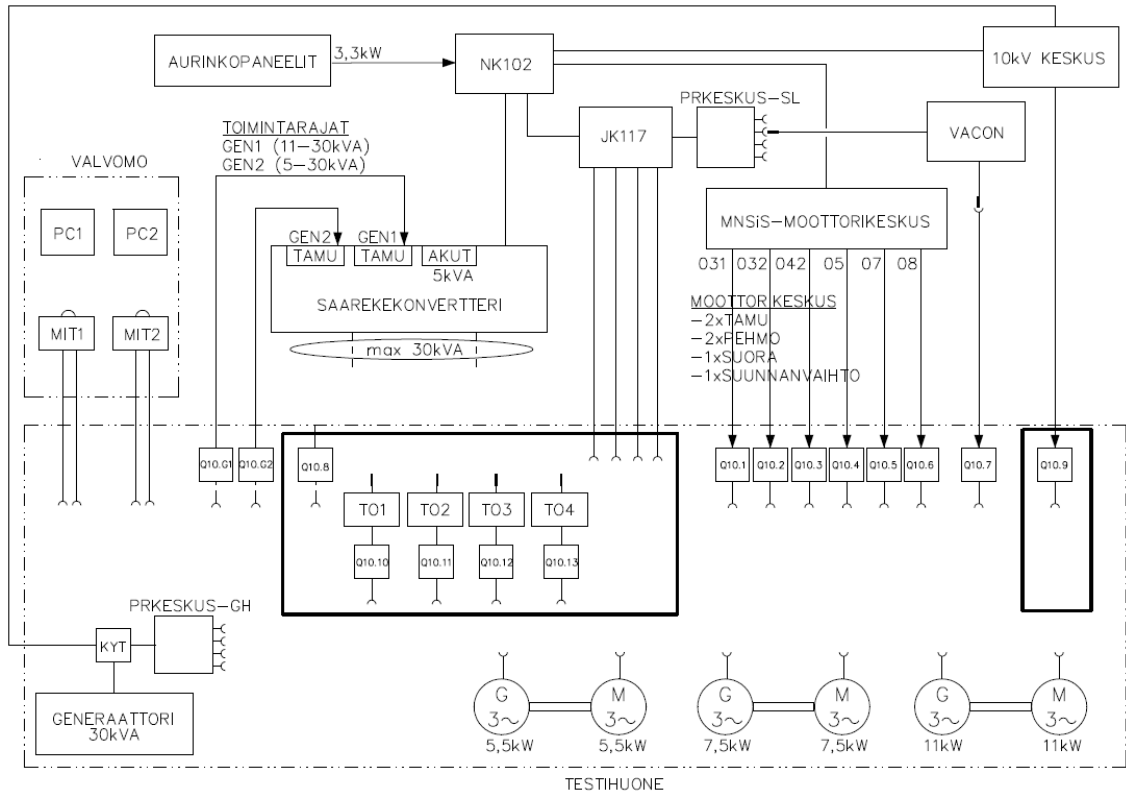
Lisäksi dieselgeneraattorin tuottamasta virrasta puuttui saarekekonvertterien taajuusmuuttajien toimiakseen tarvitsema vuokomponentti. Vuokomponentti muodostuu normaalisti oikosulkugeneraattoreissa. Tämän osalta pystyttiin ongelma ratkaisemaan suunnittelemalla tuki siihen, että dieselgeneraattorista syötetään moottorigeneraattoriparia ja sieltä edelleen saarekekonvertteria.

Energian säästämiseksi eri järjestelmien kuormitukseen kulutettu energia haluttiin syöttää takaisin verkkoon. Tämä ominaisuus oli yhtenevä tuulivoimalan simuloinnin periaatteiden kanssa. Aikaisemmin laboratoriossa moottorikäyttöjen tutkimisessa sähköenergiaa syötettiin tasasähkögeneraattorilla vastukseen häviöiksi.

Järjestelmän käyttämisen tuli olla turvallista, eli testihuoneen melulle ja dieselgeneraattorin pakokaasuille altistuminen oli minimoitava. Tavoite oli rakentaa järjestelmä niin, että testihuoneessa ei olisi tarvetta olla testausten aikana. Kaikki moottoreiden käynnissäolon aikana tarvittavat toimenpiteet olisi oltava hoidettavissa huoneen ulkopuolelta.

6.2 Järjestelmä

Kaikki järjestelmään liittyvät laitteistot hahmoteltiin suunnittelun kuluessa (kuvio 23). Eri laitteistojen hyödyntäminen pyrittiin tekemään mahdollisimman joustavaksi ja laajennettavuus huomioitiin kaikissa vaiheissa mahdollisuuksien mukaan.



Kuvio 23. Moottorien kuormitusjärjestelmä

Järjestelmä sijoittui sähkövoimalaboratorioon (Liite 1) ja sen yhteydessä olevaan testihuoneeseen (Liite 2). Pääosa järjestelmästä toteutettiin testihuoneeseen, missä laitteiden sijoittelussa oli isona haasteena rajallinen käytettävissä oleva tila.

Testihuoneen moottoreita pystytään ohjaamaan eri sähkökäyttöjen välityksellä, joista suurin osa on sähkövoimalaboratorion puolella. Käyttöjä on enemmän kuin moottoreita, joten testihuoneen peräseinälle suunniteltiin voimapistorasioiden avulla ristikytkentäkenttä (Liite 3). Siellä voidaan kytkeä voimajatkajojohdoilla halutut moottorit kiinni testauksen alla oleviin käyttöihin.

Saman ristikytkentäkentän avulla voidaan järjestelmän eri kohdista kierrättää päävirtapiiri valvomon mittauspisteen (Liite 4) kautta. Näin sähkön laatumittareiden käyttämi-

nen ja hyötysuhdemittaukset tapahtuvat valvomopöydällä (Liite 5) ergonomisesti paremmissa ja turvallisemmissa olosuhteissa.

Päävirtapiirien turvakytkimet (Liite 6, Liite 3) sijoitettiin testihuoneeseen suojaamaan henkilöitä kytkentätilanteissa. Niiden avulla eri laitteistoista tulevat voimapistorasioden syötöt voidaan tehdä turvallisesti jännitteettömiksi ennen kytkentöjen tekoa.

Tilassa jo olleiden taajuusmuuttajien sijoitusta korjattiin seinällä hieman ylemmäksi ja kauemmaksi toisistaan, jotta vähimmäisetäisyydet viereisiin laitteisiin täytyivät paremmin. Myös kaksi uutta taajuusmuuttajaa asetoitiin samalla tavalla. Lisäksi niiden kaikkien alle varattiin tila seinälle lappeelleen asennettavalle voimavirtakaapeleiden hyllylle. Jarruysiköt sijoitettiin taajuusmuuttajien yläpuolelle.

Testihuoneen dieselgeneraattorilla oli jo valmiina 63 A:n voimapistorasiasia, mutta se haluttiin korvata voimapistorasiasakeskuksella (Liite 7). Sen avulla saadaan kyseiselle generaattorille kytkettyä helpommin erilaisia kuormia käyttäen nykyisiä sähkövoimalaboratorion siirrettäviä kuormavastuksia, -kondensaattoreita ja -keloja sekä erilaisia moottorikäyttöjä.

Testihuoneen ulkopuolelle haluttiin myös voimapistorasiasakeskus (Liite 8) josta saadaan syötettyä olemassa olevia siirrettäviä taajuusmuuttajia. Samalle seinälle päätettiin sijoittaa uusi jakokeskus JK117, jotta kaapeloinnit olisivat lyhyitä.

Käyttöihin kytkettävien moottorien kuormitus päätettiin toteuttaa niihin akselien välityksellä kiinnitettävillä toisilla moottoreilla. Jarruttaviksi generaattorimoottoreiksi valittiin juuri samanlaiset moottorit kuin varsinaiset käyttömoottorit olivat. Näin moottoreiden yhteenkytkeminen on helpompaa, koska akselit ovat täsmälleen samassa tasossa.

Moottoreita oli pystyttävä käyttämään sekä itsenäisinä moottoreina että kiinni toisiinsa. Tähän kehitettiin ratkaisuksi moottoripetiin kiinnitettävä kiskosto, jonka päälle moottorit asennetaan omille liikutettaville alustoilleen, jotka voidaan lukita käyttötilanteessa paikoilleen.

6.3 Moottorit

Moottoriparien kokoluokiksi oli valittu 5,5, 7,5 ja 11 kW, sillä järjestelmään liittyvien käyttöjen koot vaihtelivat juuri tuolla välillä. Keskusteluissa oli myös selvästi isompienkin moottoreiden hankinta, mutta siihen ei ryhdytty tässä vaiheessa käytettävien tilojen rajoitteiden ja lisäkustannuksien takia. Kuitenkin järjestelmän suunnittelussa pyrittiin huomioimaan tämäkin tulevaisuuden vaihtoehto mahdollisuuksien mukaan.

Hankitut uudet moottorit ovat 4-napaisia ABB:n itsejäähdytteisiä alumiinimoottoreita (Liite 9). Yksi valinnan perusteista oli se, että tuulivoimaloissa on käytössä juuri sama 1500 r/min nopeus ja samalta valmistajalta oli järjestelmässä useita taajuusmuuttajia, joiden yhteensovitus oli yksinkertaisinta. Lisäksi kyseinen pyörimisnopeus on yleisin käytössä oleva pyörimisnopeus.

Moottorien liikuttelutarpeiden takia alumiiniset moottorit ovat parempia rautaisiin verrattuna niiden selvästi kevyemmän painon takia. Vertailun (Liite 10) muista moottorityypeistä 2-napainen olisi paras hyötysuhteeltaan, mutta sen melu taas suurin ja nopeus suuri. 6-napainen olisi hiljaisin ja pienimmän nopeuden omaava, mutta huomattavan paljon painavampi.

Uusien moottorien hyötysuhdeluokkana on IE2, joka on nykyisin vaadittu minimiluokka (Liite 11). Niiden käyttöiäksi arvioidaan 15 vuotta ja käyttöajan arvio on vuositasolla 500-1000 tuntia. Käytävissä on myös vanhempia, 1990-luvulla hankittuja, 5,5 kW sähkömoottoreita vertailun vuoksi.

5,5 kW:n moottorien kustannusvertailuesimerkin (taulukko 2) pohjalta IE2-luokan (=EFF1 taulukossa) tuoma taloudellinen hyöty ei ole suunnitellussa käytössä merkittävä alempaan IE1-luokkaan (=EFF2 taulukossa) nähden. Jatkuvassa pitkäaikaisessa käytössä kustannuksissa syntyy eroja kuitenkin enemmän. (Niinimäki 2013.)

Taulukko 2. Hyötysuhdeluokkien kustannusvertailuesimerkki (Liikola 2008)

	Moottori A	Moottori B	Moottori C
	UUSI	UUSI	VANHA
Hyötysuhdeluokka	eff1	eff2	eff ?
Teho kW	5,5	5,5	5,5
Hyötysuhde	89,4 %	86 %	80 %
Hankintahinta EUR	350	250	0
Käyntiaika h / vuosi	8000	8000	8000
Häviöt kWh / vuosi	5217	7163	11000
Energian hinta EUR / MWh	45	45	45
Häviöt EUR / vuosi	235	322	495

Vielä parempi hyötysuhde olisi IE3-luokan moottoreissa, mutta niiden hankintahinta nousee huomattavasti suuremmaksi (1500-1800 euroon). Arvioidussa vähäisessä käytössä sellaisen moottorin takaisinmaksuaika nousee jo kymmeneen vuosiin, eikä hankinta ole kustannusten osalta perusteltua. Kuitenkin opetuskäytössä näitäkin moottoreita olisi syytä tutkia ja verrata vanhempien hyötysuhdeluokkien moottoreihin. (Niinimäki 2013.)

Käytettyjen moottoreiden kuormitettavuus ACS800-taajuusmuuttajakäytössä rajoittuu itsejäähdytetyisyyden takia pienillä nopeuksilla (eli taajuusmuuttajan pienillä taajuuksilla). Kuormitusta saa olla vain 60% nimelliskuormasta lähellä nolaa olevilla nopeuksilla. Lämpötilannousumallina käytetään raskainta vaihtoehtoa B (Liite 12, kuva 4a), sillä testihuoneen lämpötila voi nousta normaalia korkeammaksi laitteiden tuottaman lisälämmön vuoksi. Yhtenä ratkaisuna on myös jäähdytyksen parantaminen tilojen ja itse moottoreiden osalta.

6.4 Taajuusmuuttajat

Testihuoneeseen oli jo aikaisemmin hankittu ABB:ltä kaksi 15 kW:n nimellistehoista, nelikvadranttista verkkoonjarruttavaa ACS800-16-3 taajuusmuuttajaa. Järjestelmää päätettiin laajentaa hankkimalla toiset kaksi samanlaista taajuusmuuttajaa lisää, jotta kahden opiskelijaryhmän yhtäaikaisten testaukset olisivat mahdollisia.

Toinen lisähankintaa puoltanut tekijä oli se, että näin pystytään testaamaan jopa kolmea käyttöä yhtä aikaa niin, että jokaisesta niistä voidaan syöttää kuormituksen tuottama teho takaisin sähköverkkoon.

ACS800-sarja oli hankintoja tehtäessä suurilta osin uudistunut jo ACS880-sarjaksi, mutta verkkoonjarruttavia malleja ei oltu vielä uudistettu. Näin jouduttiin käyttämään edelleen vanhan ACS800-sarjan laitteita. Kuitenkin jo ACS800-taajuusmuuttajissa on sisäänrakennettuina häiriöiden suodatus ja kuristimet, mikä pitää laitteiden tarvitseman tilan ja kaapelointimäärän pienenä.

Valittu ACS800-16-3 -taajuusmuuttaja on pienin neljän kvadrantin verkkoonjarruttava versio ABB:ltä ja sen toiminta pohjautuu IGBT:hen ja DTC:hen, mitä tarvitaan testikäytössä tapahtuvan jatkuvan jarruttamisen vuoksi. Taajuusmuuttajiin kytkettiin lisäksi erilliset STO-turvayksiköt, joilla voidaan estää moottorien käynnistys esimerkiksi siivoamisen yhteydessä.

Taajuusmuuttajien 15 kW:n tehonkesto on hieman suurempi kuin järjestelmään suunnitellun suurimman 11 kW:n moottorin teho. Näin järjestelmään voidaan tuoda kokoluokkaa suurempikin moottori ilman että järjestelmän kalleimpia komponentteja joudutaan uusimaan.

Moottoreita suurempitehoisten taajuusmuuttajakäyttöjen käyttäytymistä voidaan järjestelmän avulla tutkia myös osatehoilla. Lisäksi järjestelmään voidaan lisätä 500 V ja 690 V jännitesyötöt, joiden kautta päästään tutkimaan myös eri nimellisjännitteisiä taajuusmuuttajia ja niiden moottorikäyttöjä.

ACS800-taajuusmuuttajien etäohjaukseen oli valmistajalta tarjolla kaksi ohjelmistoa: DriveAP ja DriveWindow. Näistä päädyttiin DriveWindow-ohjelmistoon koska sillä pystyi hallitsemaan taajuusmuuttajia täydellisemmin ja monipuolisemmin.

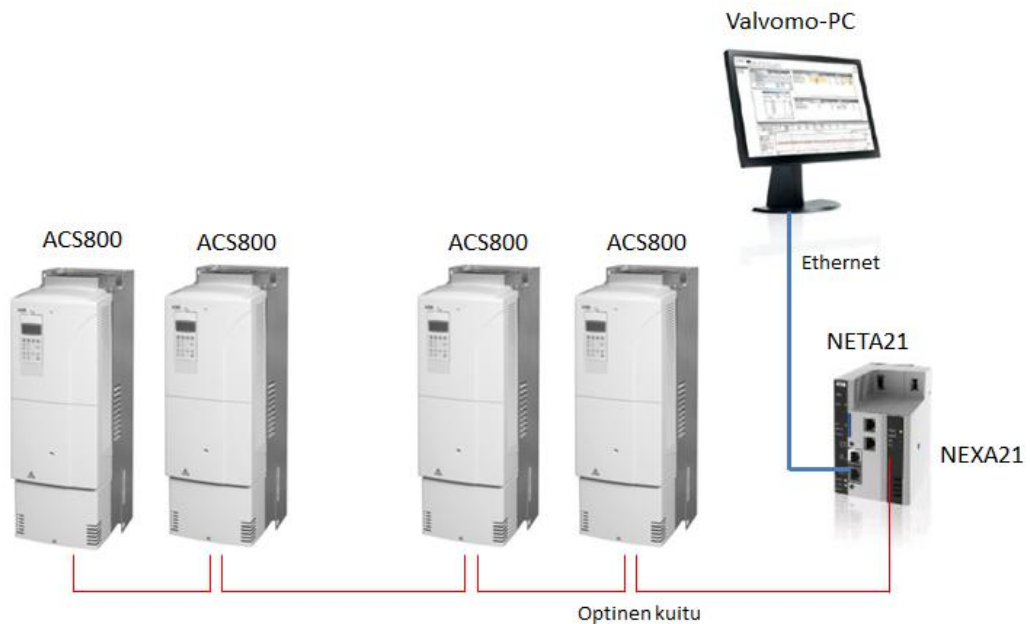
DriveWindow-ohjelmiston avulla voidaan ottaa taajuusmuuttaja käyttöön, asetella asetuksia ja seurata laitteen tilatietoja reaaliajassa. Tilatietoja voi seurata graafisesti tai numeromuodossa. Se tukee ACS800:n lisäksi myös useita muitakin malleja kuten ACS600, ACS1000 ja ACS6000.

Valvomon ja laitteiden suhteellisen lyhyt välimatka (alle 15 metriä) olisi sallinut kuitupohjaisen suoran hallintayhteydenkin käyttämisen, mutta silloin PC:n yhteys olisi rajoittunut aina vain kahteen määrättyyn testihuoneen taajuusmuuttajaan kerrallaan. Suunni-

tellun hallintaratkaisun myötä tämä rajoitus pystyttiin poistamaan ja PC:llä voidaan hallinnoida mitä tahansa testihuoneen taajuusmuuttajia.

Ohjauksen toteutukseen valittiin ABB:n ethernet-pohjainen ratkaisu, joka sallii ohjattavien laitteiden vaihtamisen ohjelmallisesti ilman fyysisten kaapeleiden irrottamista ja kytkemisiä. Tämän ratkaisun myötä valvomopisteitä voi tarvittaessa siirtää kauemmaksi ilman hallintakaapeloinnin uusimista.

Hallintayhteyksien häiriöiden minimoimiseksi taajuusmuuttajien pään toteutettiin kuituyhteyksillä. Sitä varten ACS800-taajuusmuuttajiin asennettiin RDCO-03 -moduulit, joiden avulla taajuusmuuttajat kytkettiin optisten kaapeleiden välityksellä ketjuun keskenään. Kuituyhteyden muuntaminen ethernet-pohjaiseksi tapahtui NEXA-21- ja NETA-21-moduleilla (kuvio 24).



Kuvio 24. ACS800-taajuusmuuttajien etähallintaratkaisu

Hallintayhteyksien kuitukaapelit asennettiin taajuusmuuttajien alapuoliseen kaapelikouruun ja nostettiin siitä läpivientikumien suojaamina jokaisen taajuusmuuttajan RCDO-03 -moduuleille. Hallintayhteyden muuntomoduulit NETA-21 ja NEXA-21 sijoitettiin 24 V:n muuntajan kanssa huoneen peräseinän nurkkaan. Näin moduulit ja kuituyhteydet suojattiin.

tukaapelit olisivat pois alueelta, jossa tehdään paljon voimavirtakaapelien kytkemisiä ja siirtelyitä.

ACS800-taajuusmuuttajissa on myös omat paikalliset ohjauspaneelinsa koteloiden etuosassa. Nämä ohjauspaneelit voidaan irrottaa koteloista ja kytkeä ethernet-jatkokaapelien avulla taajuusmuuttajiin. Näin pystytään testihuoneessa ja sen ulkopuolella käyttämään ohjauspaneelija ergonomisesti paremmalla tavalla.

MNSiS-moottorikeskuksessa oli kolme moottoreille kytkettävissä olevaa tavallista ACS850-taajuusmuuttajaa tehoiltaan 1,5, 7,5 ja 11 kW. Niistä hyödynnettiin kahta isompaa sillä testihuoneen moottorit olivat tehoiltaan suurempia kuin pienin 1,5 kW:n taajuusmuuttaja.

Näiden taajuusmuuttajien ohjaukseen oli vastaavanlaiset paikalliset ohjauspaneelit, jotka pystyi ottamaan irti ja käyttämään ethernet-jatkojohdon avulla kauempaa. Koska valvomopiste sijoittui hyvin lähelle moottorikeskuksen päätyyn, suunniteltiin paneeleille hankittavan viiden metrin jatkokaapelit, jotka yltyvät valvomopöydille asti.

ACS850-taajuusmuuttajan tietokoneella tapahtuva etähallinta vaatii oman DriveStudio-nimisen ohjelmiston. Lisäksi on tarjolla DriveSPC-ohjelmisto, jolla voidaan tehdä taajuusmuuttajaan omia ohjelmistoja ja asetuksia. Kummatkin ohjelmistot hankittiin molempiin valvomon tietokoneisiin.

DriveStudio-ohjelmiston avulla voidaan hallita RS232-liitännän kautta ACS850-taajuusmuuttajia graafisen käyttöliittymän avulla. Käyttöliittymällä voidaan selata ja muuttaa taajuusmuuttajan asetuksia.

DriveStudiassa voidaan myös seurata taajuusmuuttajan tietoja monitorointi-ikkunan kautta graafeina. Näytettävät graafit voidaan valita itse ja niihin voidaan halutessa liittää monipuolisia liipaisuehtoja. Lisäksi tietoja voidaan tallentaa ja tutkia myöhemmin tiedostoista.

DriveSPC-ohjelmisto taas tarjoaa graafisen käyttöliittymän jolla pystytään kytkeytymään taajuusmuuttajaan ja muokkaamaan sen sisäistä ohjelmistoa logiikkatasolla. Jos tietokoneella on yhteys useampaan taajuusmuuttajaan, voidaan niitä jokaista varten ava-

ta oma ikkunansa. Ohjelmisto näyttää reaaliajassa järjestelmän ohjelmistoblokkien sisäänmenojen ja ulostulojen tilat.

6.5 Kaapeloinnit

Käyttöjen kaapeloinnissa huomioitiin kuormituksen kasvattamismahdollisuus ja asennustavan aiheuttamat vaatimukset. Pienempien 5,5 kW:n käyttöjen osalta kaapelien poikkipinnaksi valittiin 6 mm² ja niitä isompien käyttöjen tapauksessa 16 mm².

Kaapelityyppeinä käytettiin käyttöjen ja moottoreiden välillä häiriösuojattua MCCMK-kaapelia ja taipuisaa häiriösuojattua Ölflexin servokaapelia. Näiden valintojen myötä kaapeleiden hyödyntäminen olisi helppoa jatkossakin kaikkiin käyttötarpeisiin. Lisäksi näin varmistuttiin siitä, että nämä kaapelit eivät ottaisi häiriötä muista sähkölaboratorion voimakaapeleista ja energian laatumittausten tulokset olisivat luotettavia.

Ohjauspiirien ja muiden laitteiden syöttökaapeloinnissa hyödynnettiin tavallisia MMJ- ja MMO-kaapeleita. Taajuusmuuttajien 24 V ohjauspiirin kaapeloinnissa käytettiin tavanomaisten NOMAK- ja JAMAK-kaapelien sijaan MMJ-kaapelointeja valmistajan ohjeiden mukaisesti häiriöiden vähentämiseksi.

Voimapistorasioiksi valittiin 63 A:n seinäpistorasiat lähinnä kaapelien suuren poikkipinnan vuoksi. Vaikka joissain käytöissä olisi voinut hyödyntää pienempääkin kokoa, käytettiin kaikissa yhtä ja samaa kokoa jotta ristikytkentämahdollisuuksia ei rajoitettaisi. Näin joidenkin käyttöjen syöttökaapeleina on ohuempi kaapeli, mutta ristikytkentä suoritetaan paksummalla kaapelilla.

Turvakytkimet mitoitettiin sekä virtakestoisuuden tarpeen että käytettyjen kaapelien poikkipinnan avulla. Käytetty paksumpi kaapelipoikkipinta-ala olisi vaatinut kokoluokkaa isomman turvakytkimen, mutta turvakytkinten läpivientien laajentimilla (M32 suuren kokoon M40) saatiin turvakytkinten kotelokoko pidettyä pienempänä.

Voimapistorasiaskeksia asennettiin kaksi kappaletta. Yksi tuli sähkölaboratorion puolelle syöttämään siirrettäviä taajuusmuuttajia ja toinen testihuoneeseen tarjoamaan dieselgeneraattorille monipuolisemman kuormituspisteen. Pistorasiaskeksiksi valittiin

Voima 1113 -malli, joka tarjoaa laajan valikoiman eri pistorasiakokoja: CEE-voimapistorasiat 1x63 A, 1x32 A ja 1x16 A sekä 3x16 A:n suko-pistorasioita.

Moottorien ja voimapistorasioiden välisiin kytkentöihin käytettiin häiriösuojattuja kaapeleita. Kiinteästi asennetuille moottoreille kaapelityypiksi valittiin MCCMK ja siirrettäville taipuisa Ölflex. Isompien 11 kW:n moottorien kaapelien poikkipinta-alaksi valittiin 16mm² ja pienempien moottoreiden 6 mm².

6.6 Valvomo

Testihuoneen laitteiston melutason, ahtauden ja generaattorin tuottamien huomattavan lämmön ja pakokaasujen vuoksi kyseisissä tiloissa oleskelu minimoitiin käytön aikana. Tämän saavuttamiseksi suunniteltiin seuraavat ratkaisut mittauksiin sekä etäkäyttöön ja -valvontaan:

- kaikkien kuormina toimivien sähkökäyttöjen ohjaus
- laitteiden visuaalinen seuranta
- keskusteluyhteys tilassa mahdollisesti oleviin henkilöihin
- sähkön laatumittaukset järjestelmän eri kohdista
- laitteiden pysäytys ongelmatilanteessa.

6.6.1 Etäohjaus- ja valvonta

Testihuoneen ulkopuolelle järjestettiin ohjausmahdollisuus kappaleessa 6.1 mainituille järjestelmää syöttäville laitteille. Suurin osa laitteista oli testihuoneen ulkopuolella, jolloin niiden nykyratkaisut riittivät. Testihuoneen taajuusmuuttajat vaativat kuitenkin valvomo-ohjauksen ja samanlainen ohjausmahdollisuus järjestettiin MNSiS-moottorikeskuksen taajuusmuuttajia varten.

Testihuoneessa sijaitsevia verkkoonjarruttavia ACS800-taajuusmuuttajia päätettiin hallita valvomo-PC:illä. Samoilla PC:illä tuettiin myös moottorikeskuksen ACS850-taajuusmuuttajien seuranta.

Testihuoneen laitteistoa piti pystyä valvomaan testihuoneen ulkopuolelta käsin visuaalisesti. Lisäksi tuli tarjota mahdollisuus keskusteluyhteyden valvomon ja testihuoneen välillä. Toistaiseksi valvomo on hyvin lähellä testihuonetta, mutta tulevaisuudessa sijoittelut voivat muuttua.

Testihuoneen visuaaliseen valvontaan hankittiin dome-tyyppinen PTZ-valvontakamera, jossa on sisäänrakennettu mikrofoni ja äänen ulostuloliitin. Kameran välittämää kuvaa voi seurata useasta pisteestä yhtä aikaa tavallisen nettiselaimen kautta.

Kameraan kytkettiin erilliset kaiuttimet, jolloin sen avulla pystytään valvomosta käsin kommunikoimaan tilassa olijoiden kanssa. Valvomon yhteen PC:hen hankittiin erillinen mikrofoni ja kaiuttimet, joilla voidaan muodostaa kommunikointiyhteys valvontakameran mikrofoniiin ja kaiuttimiin.

6.6.2 Sähkön laatumittaus

Jotta sähkön laatua voitiin mitata testihuoneen ulkopuolella, kierrätettiin mitattava energia kaapelilla valvomopisteiden kautta. Kummallekin valvomolle tuotiin oma mitattava kaapelinsa. Niihin pystytään testihuoneessa kytkemään päävirtapiiristä haluttu kohta.

Valvomon mittauspisteessä tarvittiin varsinaista sähkön laatumittaus varten virtamittaus- ja jännitemittausmahdollisuus kaikista vaiheista ja maadoitusjohtimesta. Tähän suunniteltiin oma mittauslaatikkonsa, jonka kylkeen tuli turvalaboratoriolohkot (Liite 4).

Virtamittauksen osalta haluttiin varautua suuriin virtoihin, jotka vaativat virtamuuntajien käyttämistä. Niiden asentamiseen oli vaihtoehtoina kiinteä ja irrotettava ratkaisu, joista joustavuuden nimissä valittiin irrotettava ratkaisu. Siinä erilliset laboratoriovirtajohtimet kytketään aina mittauksen valmisteluvaiheessa kotelon kyljessä oleviin laboratorioturvaholkkeihin. Johtojen muodostamiin ulkoisiin virtalenkkeihin voidaan asentaa joko virtamuuntajat tai kiinnittää virtamittauspihdit.

6.7 Sähkösuunnitelmat

Verkkoonjarruttavien taajuusmuuttajien syöttönä oli suunnittelun alkuvaiheessa sähkölaboratorion jakokeskus JK108, mutta siellä olevien herkkien releasetteluiden takia sitä ei olisi voinut kuormittaa suunnitellun 32 A:n kokoluokan laitteilla.

Näin jouduttiin suunnittelemaan nousukeskus NK102:lta suoraan 63 A:n virralla syötettävä uusi JK117, josta taajuusmuuttajat ja voimapistorasiaskeskus saivat syöttönsä. JK117:n sisälle sijoitettiin taajuusmuuttajien vaatimat 40 A:n etusulakkeet sekä pistorasiaskeskuksen suojaksi 50 A:n etusulakkeet.

Turvakytkimiltä välitettiin asentotieto moottorikeskuksen lähtöihin ja muiden turvakytkinten asentotiedon välitykselle tehtiin valmius.

Testihuoneen valvontakamera ja siihen liitetyt kaiuttimet vaativat oman syöttönsä suoraan sähkölaboratorion JK108:lta, jotta tiloja pystytään valvomaan myös hätä-seislauskaisun jälkeen.

Järjestelmän suunnittelun tuloksena oli MNSiS-moottorikeskuksen lähtöihin liittyviä piirikaavioita (Liite 13, Liite 14, Liite 15). Piirikaavioihin koottiin kyseiseen lähtöön liittyvät kojeet ohjauspiireineen aina voimapistorasialle saakka. Siitä eteenpäin oleva moottorien piirikaavio-osuus oli kaikille testihuonetta syöttäville järjestelmille sama ja sille luotiin oma piirikaavionsa (Liite 16).

Testihuoneen verkkoonjarruttavien taajuusmuuttajien piirikaaviot koottiin myös yhteen piirikaavioon niiden keskinäisen samankaltaisuuden vuoksi (Liite 17). Näille taajuusmuuttajille ei suunniteltu erillistä ohjauspiiriä, mutta sellainen voidaan rakentaa jatkokehityksenä.

10 kV:n kojeistolta hyödynnettiin yksi moottorilähtö ja sen osalta suunniteltiin piirikaavio ja ohjauspiiri (Liite 18). Vastaavalla tavalla suunniteltiin siirrettävien taajuusmuuttajien (Liite 19) osuus.

JK117 suunniteltiin NK102:n lähdöstä alkaen testihuoneen voimapistorasioille yhteen piirikaavioon ohjauspiireineen (Liite 20).

6.8 Häätä-seis-ratkaisut

Testihuoneessa oli alun perin häätä-seis-painikkeet sekä itse tilan pistorasioita että dieselgeneraattoria varten. Koska tilaan tuotiin useita syöttöjä muista järjestelmistä, oli tilan häätä-seis-ratkaisut suunniteltava uusiksi kattamaan kaikki testihuonetta syöttävät järjestelmät. Häätä-seis-laukaisun piiriin tuli näin 11 laitteistoa tai järjestelmää.

Laajennettu häätä-seis-ratkaisu muodostui rinnakkaisista kontaktoreista joille otettiin ohjaukset olemassa olevasta tilan häätä-seis-piiristä sekä kummankin uuden valvomo-pöydän häätä-seis-painikkeista. Kontaktoreilla ohjattiin kaikkien tilaan sähköä syöttävien laitteistojen häätä-seis-toiminteita erillisinä piireinä.

Aluksi oli suunnitelmana asentaa uudet kontaktorit vanhan häätä-seis-piirin rinnalle, mutta testausvaiheessa todettiin että jännitehäviöt olivat liian isot eivätkä kontaktorit jaksaneet vetää. Näin jouduttiin ottamaan piirin laajennukselle oma syöttönsä JK108:lta.

Häätä-seis-piirin osalta suunnittelu dokumentoitiin edellisessä kappaleessa mainittuihin piirikaavioihin. Niiden lisäksi luotiin yksi koostepiirikaavio, jossa koko häätä-seis-piiri näkyy kerralla (Liite 21). Tällä pyrittiin luomaan selkeämpi kokonaiskuva koko piirin logiikasta.

7 TOTEUTUS

Suunnitelmien toteutuksessa oli käytettävissä yhdestä kolmeen asennuksia tekevää henkilöä. Työt välitettiin tekijöille työpyynnöillä, joissa oli yksityiskohtainen ohjeistus työn tekemiseen (Liite 22). Jokaiseen työpyyntöön kirjattiin yksityiskohtaisesti mitä työn sisältö, aikataulu, tarvittavat työvälineet ja komponentit, sekä kytkennät. Tarvittaessa oli myös valokuvia asennuskohteista.

Työpyynnöissä muistutettiin myös työturvallisuuteen liittyvistä seikoista, kuten raskaiden nostojen apuvälineistä, nostoasunnoista, henkilökohtaisista turvavälineistä, tarvittaessa jännitteettömäksi tekemisestä ja sen varmistamisesta. Näin pyrittiin huolehtimaan, että työt tehdään turvallisesti vaikka asennustöitä tekevien henkilöiden osaamistaso ja työkokemus oli lähtötasoltaan erilainen.

Töiden etenemistä pystyttiin seuraamaan työpyyntöjen avulla ja poikkeamat voitiin kirjata työpyyntölomakkeelle. Työpyyntöjen erillisellä kuittaamisella haettiin vahvistusta, että asentajat ovat tehneet kaikki osuudet. Kun asennukset olivat valmiita, saatettiin sähkösuunnitelmat ajan tasalle vastaamaan asennuksia.

Asennustöiden aikana suunnitelmia käytiin asentajien kanssa läpi useasti. Suunnitelmia muutettiin, jos esitetty ratkaisu ei ollut käytännössä toimiva, tai se olisi ollut liian työläs tai olisi aiheuttanut hankaluuksia muilla osa-alueilla. Joissain tapauksissa suunnitelmia myös täydennettiin asentajien esittämien lisäideoiden pohjalta.

Työpyyntöjen välityspaikkana toimi Lapin AMK:n Kemin yksikön Moodle-järjestelmässä ollut projekti. Sinne tallennettiin myös sähkösuunnitelmien väliversioita sekä DRW- että PDF-muodoissa. Lopulliset suunnitelmat tallennettiin Moodlen lisäksi sähkölaboratorion sähköpiirustusten kansioon intranetissä.

Asennustöissä käytettiin aina periaatetta että liittäminen olemassa olevaan laboratorion jännitteeseen syöttöverkkoon jätettiin tekemättä. Näin kaikki asennukset tapahtuivat turvallisesti jännitteettöminä ilman sähköturvallisuuden vaarantumista hyvin myöhäiseen vaiheeseen asti. Asentajille oli näin myös selvempää, että asennuksen kohteena olevassa järjestelmässä ei ollut jännitteisiä osuuksia.

Testihuoneen peräseinälle oli alun perin suunniteltu asennettavaksi kaapelihyllyjä pystyyn tukemaan kaapeleita, mutta asennusvaiheessa todettiin että c-kisko toimii paremmin ja lopputulos on paljon siistimpi (kuva 1). Kaapelien taivutussäteet tulivat useassa kohdin haasteeksi, mutta lopulta kaikki kaapelointien mutkakohdat onnistuivat sallituilla minimisäteillä.



Kuva 1. Testihuoneen peräseinän asennukset

Peräseinän alaosassa olevia moottoreiden voimapistorasioita ei vielä tässä vaiheessa kytketty, sillä moottorien kiinnityskiskostoa ei vielä oltu toimitettu. Moottorit asennetaan kiskoston päälle pareiksi, joista oikeanpuoleinen on aina kiinteästi paikoillaan. Vasemmanpuolimmaista moottoria voidaan taas siirrellä vapaasti kiskoston päällä.

Taajuusmuuttajien sijoittelussa ei jäänyt ylimääräistä tilaa, vaan kaikki käytettävissä ollut tila oli hyödynnettävä (kuva 2). Sijoittelussa pyrittiin mahdollisuuksien mukaan symmetrisiin ratkaisuihin ja siinä onnistuttiinkin hyvin. Taajuusmuuttajien yläpuolelle saatiin juuri ja juuri mahdutettua STO-turvayksiköt vaaka-asentoon. Kuvan keskellä näkyy ulkoisten syöttöjen turvakytkimet ja oikeassa reunassa saarekekonvertterille menevien syöttöjen turvakytkimet. Alareunassa on seinän toiselta puolelta JK117:lta tulevat taajuusmuuttajien syötöt.



Kuva 2. Testihuoneen taajuusmuuttajat ja ulkoisten syöttöjen turvakytkimet

Testihuoneen ulkopuolelle (kuvan 2 seinän toiselle puolelle) asennettiin pistorasiakeskus, jolla pystytään syöttämään tarvittaessa jopa 50 A:n virtaa sähkövoimalaboratorion laitteisiin (kuva 3). Pistorasiakeskuksen kaapelointi jäi vielä toteutettavaksi hieman myöhemmin, sillä alkuperäinen kaapelointireitti kaapelikanavan kautta osoittautui liian ahtaaksi.



Kuva 3. Testihuoneen ulkopuolinen syöttöpiste ja voimapistorasiakeskus

Pistorasiakeskuksen kautta voidaan syöttää esimerkiksi laboratoriossa entuudestaan käytössä olleita siirrettäviä taajuusmuuttajia tai muina toimeksiantoina testattaviksi tulevia taajuusmuuttajia. Taajuusmuuttaja voidaan edelleen kytkeä kuvan voimapistorasiakaan ja siitä kaapelointi menee testihuoneen turvakytkimen kautta moottoreille.

Testihuoneen taajuusmuuttajia ja huoneen ulkopuolista pistorasiakeskusta syöttävä JK117 asennettiin lattianrajaan, missä kaapelien vedot onnistuivat sujuvimmin (kuva 4). Jakokeskukseen tuli 40 A:n kahvasulakkeet testihuoneen neljän taajuusmuuttajan syötöille ja 50 A:n kahvasulakkeet pistorasiakeskukselle. Keskuksen syöttö tuotiin lattiakanavan kautta NK102:lta.



Kuva 4. JK117 testihuoneen ulkopuolisella seinällä

Sähkövoimalaboratorion puolella olevasta MNSiS-moottorikeskuksen oikeanpuoleisesta voimavirtapuolen kuilusta vedettiin kuusi syöttöä testihuoneen turvakytkimille (kuva 5). Kyseisten lähtöjen asennusten aikaiset lukitukset näkyvät kuvassa. Vasemmanpuoleisen ohjauspuolen kuilun kautta tuotiin turvakytkinten ja hätä-seis-piirin tilatiedot kullekkin lähdölle.



Kuva 5. MNSiS-moottorikeskuksen lähtöjä

Valvomopisteet toteutettiin kahdelle selät vastakkain asetetulle pöydälle. Niiden taka-reunalle asennettiin kaapelikourua josta saatiin pöydän mittalaitteille jännitteet sekä ethernet-verkko (kuva 6). Pöytien toiselle reunalle sijoitettiin PC ja toiselle reunalle mittauspisteet ja hätä-seis-painikkeen sisältävä asennuskotelo.



Kuva 6. Valvomo 2 mittauspisteinen jonka takana valvomo 1 sijaitsee symmetrisesti

Voimapistorasioihin ja laitteisiin tehtiin merkinnät, jotka yksilöivät virtapiirien eri komponentit ja niiden liityntäpisteet. Lisäksi voimapistorasioihin merkittiin millaisen kuormituksen ne kestävät. Näin pyritään ennaltaehkäisemään vääriä kytkentöjä ja myös osaltaan helpottamaan valvovan opettajan tekemää kytkennän tarkistusta ennen jännitteiden kytkemisluvan antamista.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

8.1 Toteutettu testiympäristö

Työ saatiin tehtyä suunnitellusti kevään 2014 aikana vaadittuun tasoon saakka. Järjestelmä ehdittiin käyttöönottotarkastaa tarvittavilta osin juuri ennen kesän alkua ja valvon työasemiin saatiin asennettua vaaditut ohjelmistot.

Järjestelmä on näin ollen valmis syksyn jatkokehitystä ja opetuskäyttöä varten. Yhtenä toiveena oli että taajuusmuuttajien asetukset olisi ehditty tehdä moottorigeneraattoriparien ohjaukseen, mutta asennukset veivätkin odotettua enemmän kalenteriaikaa.

Moottoreiden kiinnityskiskoston osalta tuli ongelmaksi se, että sen toteuttamiseksi ei saatu yhtään tarjousta, vaikka tarjouspyyntö lähetettiin hankintasääntöjen mukaisesti useisiin yrityksiin. Toistaiseksi moottorit kiinnitettiin moottoripetiin väliaikaisilla ratkaisulla.

8.2 Jatkokehityskohteet

Olenneisimpana jatkokehityskohteena on suunnitella erilaisia harjoitustöitä, joilla opiskelijat pystyvät tutkimaan toteutettuun järjestelmään liittyvien laitteistojen ilmiöitä. Harjoitustöiden tavoitteina voisi olla:

- moottorikeskuksen eri käyttöihin tutustuminen ja niiden yhteydessä sähkönlaatumittaukset
- 10 kV:n demojärjestelmän kuormittaminen moottorilla niin että 10 kV:n suojaukset toimivat
- taajuusmuuttajien (mukaan lukien verkkoonjarruttavien tyyppien) asetukset ja sähkönlaatumittaukset
- moottorien käynnistysvaiheiden sähkönlaatumittaukset eri käyttötyypeillä
- dieselgeneraattorin käyttäminen moottorien syöttönä

- generaattoreina toimivien moottorien tuottaman sähkön siirto saarekekonverterilla hyödynnettäväksi
- tuulivoimalan simulointi
- moottorien tyhjäkäynti- ja kuormituskokeet, hyötysuhteen tutkiminen.

Itse järjestelmää voidaan jatkokehittää seuraavilla osa-alueilla:

- moottorien kiinnityskiskoston rakentaminen
- testihuoneen valaistuksen pakko-ohjaus valvomosta käsin, ohittaen liiketutkan
- asentotiedon välittäminen valvomoon kaikista turvakytkimistä
- moottorin ja generaattorin väliin momenttianturi ja pyörintänopeusmittaus
- moottoreiden lämpötilan mittaustiedon välitys valvomoon
- moottorien akselin lukitusmahdollisuus
- 15 kW:n moottoriparin ja muiden moottoreiden hankinta (eri hyötysuhteilla)
- eri pysäytysluokkien toteuttaminen käyttöihin
- tuulivoimageneraattoreiden hankinta ja kytkentä järjestelmään
- 30 kVA:n dieselgeneraattorin liittäminen hätä-seis-piiriin ja pistorasiakeskuksen asennus sille kuormituspisteeksi
- tahtikoneen sekä simocode- ja umc-lähtöjen liittäminen järjestelmään
- moottori-generaattoriparien taajuusmuuttajien toimivien asetusten hakeminen simulointia varten
- kaikki laitteistot kattavan ohjeistuksen luominen.

9 POHDINTA

Työ oli mielenkiintoisen haastava, sillä siinä joutui sovittamaan uusia laitteita ja kaape-lointeja olemassa olevien yhteyteen, paikoin hyvinkin rajallisiin tiloihin. Työtä tehdessä oppi, kuinka huolellista suunnittelu on loppujen lopuksi oltava, jotta pystytään hankki-maan ennen asennuksia kaikki oikeat tarvittavat osat, laitteet ja kaapelit.

Suunnittelussa tuli eteen paljon teollisuuden käyttämiä kojeita ja tarvikkeita, joihin opinnäytetyön tekijä ei ollut aikaisemmin tutustunut. Tiedonhankinta olikin merkittä-vässä roolissa suunnittelun edetessä. Suunnittelun osatehtävissä oli syytä olla tarkkana mekaanisten mittojen ja sähköisten mitoitus- ja erilaisten toimintarajoitusten suh-teen. Lisähaasteita tuotti muiden järjestelmään liittyvien laitteistojen asennusten pääl-lekkäisyys tämän työn kanssa. Tästä johtuen muiden laitteistojen sähkökuvat saatiin vasta asennusten loppuvaiheessa.

Asennusvaiheen seuranta ja ohjaus toi oman uuden näkökulmansa missä sai peilata, kuinka hyvin projektiin liittyvät asiat oli huomioitu teoreettisesti suunnitteluvaiheessa ja käytännön näkökulmasta asennus- ja käyttövaiheessa. Tässä vaiheessa esiintulleita on-gelmia joutui ratkomaan asentajien kanssa useampaan otteeseen.

Suunniteltu järjestelmä pystyttiin toteuttamaan lähes kokonaan suunnitelmien mukaises-ti. Asennusten aikana tehtiin pieniä muutoksia ja lisähankintoja, mutta päätökset osoittautuivat toimiviksi.

Järjestelmä myös laajeni suunnittelun ja asennusten aikana alkuperäisestä, sillä lisätar-peita tuli esille aika ajoin keskustelujen yhteydessä ja ne otettiin suunnitelmiin mukaan. Yksittäinen muutos saattoi aiheuttaa ketjureaktion monen asian uudelleensuunnittelun.

Työn lopputuloksia voidaan hyödyntää opetuskäytössä seuraavan lukukauden alusta alkaen. Tuolloin voidaan käyttää suunniteltuja laitteistoja ja kehittää opiskelijoille mo-nipuolisia tutkimustehtäviä eri kurssien teorian syventämiseksi. Seuraavina opiskelijoi-den projektitöinä pyritään toteuttamaan valmistuneiden oppimisympäristöjen laboraati-oita ja rakentamaan siihen liittyviä uusia toteutusvaihtoehtoja.

Suunnitellun ja toteutetun järjestelmän jatkokehityskohteita on huomattava määrä ja niistä saa muodostettua useammankin lopputyöaiheen. Järjestelmää voidaan laajentaa nykyisestäkin vielä paljon laajemmaksi ja monipuolisemmaksi.

Jatkokehitystä voi tosin hankaloittaa käytettävissä olevan testihuoneen rajoitteet. Tämän työn myötä testihuoneesta hyödynnettiin kaksi seinäpintaa hyvinkin tarkasti. Muiden testihuoneen seinäpintojen hyödyntämistä estävät osittain nyt asennetut moottorit ja dieselgeneraattori. Yhtenä vaihtoehtona on jatkossa tutkittava ullakkotilojen hyödyntämistä.

Tilaaaja on ollut tyytyväinen suunnitellun järjestelmän laajuuteen ja monipuolisuuteen. Järjestelmä mahdollistaa nykyaikaisen, tasokkaan opetuksen antamisen tuleville sähköinsinööreille ja myös ulkopuolisten yritysten henkilöstöille tarjottavien kurssien kautta.

Rakennettu järjestelmä on myös olennainen osa Lapin AMK:n sähköalan opetuksen modernisointiprojektia. Useat tahot ovat todenneet, että tämän ja projektin muiden parannushankkeiden myötä Lapin AMK:n tarjoamat koulutusmahdollisuudet ovat Suomen huippuluokkaa.

LÄHTEET

- Aalto-yliopiston www-sivut 2014. Aalto-yliopiston sähkökäyttöjen tutkimusryhmän www-sivut. Hakupäivä 29.3.2014. <<http://elen.aalto.fi/fi/tutkimus/sahkokaytot/>>
- ACS800, 2013. ACS800-11 Drives, Hardware Manual. ABB, Helsinki. Hakupäivä 20.4.2014.
<[http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/0551753119e73e51c125779100407b4d/\\$file/EN_ACS800_01_HW_J_scrres_with%20suppl_pages_and_UpdateNotice.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/0551753119e73e51c125779100407b4d/$file/EN_ACS800_01_HW_J_scrres_with%20suppl_pages_and_UpdateNotice.pdf)>
- ACS850, 2013. ACS850-04 drive modules, Hardware Manual. ABB, Helsinki. Hakupäivä 20.4.2014.
- Aura, Lauri & Tonteri, Antti J. 2009. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. 6. painos. Helsinki: WSOYpro Oy.
- Etto, Jaakko 2010. Sähkötekniikan insinöörikututuksen oppimisympäristöjen kehittäminen. Opinnäytetyö. Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, Kemi.
<<http://www.theseus.fi/handle/10024/21549>>
- EU 640/2009. Commission regulation (EC) 640/2009. Hakupäivä 30.3.2014.
<<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02009R0640-20090812&rid=1>>
- Halme, Jari & Parikka, Risto 2005 . AC-servomoottori -rakenne, vikaantumisen ja havainnointimenetelmät. Tutkimusraportti BTUO43-051348. VTT, Espoo.
- Hietalahti, Lauri 2012. Säädettyt sähkömoottorikäytöt. Tampere: Amk-Kustannus Oy, Tammertekniikka.
- Hietalahti, Lauri 2013. Teollisuuden sähkökäytöt. Tampere: Amk-Kustannus Oy, Tammertekniikka.
- Kärkkäinen, Vesa 2009. Tuulivoimakäyttö sähköverkon vikatilanteissa. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Lappeenranta. Hakupäivä 29.4.2014.
<<https://www.doria.fi/handle/10024/44079>>
- Lapin AMK 2014. Lapin AMK:n esittely. Hakupäivä 20.4.2014.
<<http://www.lapinamk.fi/fi/Esittely>>
- Liikola, Tommi 2008. Energiatehokkaat taajuusmuuttajat ja moottorit. Luentomateriaali. ABB, Helsinki.
- Lilja, Kari 2011. Sähkökäyttö ja sähkömagneettinen yhteensopivuus. SähköTele-lehti 4/2011. Sähköinsinööriliitto ry.
- Low voltage general performance IE2 high efficiency motors, 2013. ABB. Hakupäivä 28.3.2014.
<[http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/11c6e0af95bf9782c1257c010036a39a/\\$file/General%20performance%20IE2%20motors%20EU%20MEP%20S%209AKK105789%20EN%2001_2013%20Rev%20A.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/11c6e0af95bf9782c1257c010036a39a/$file/General%20performance%20IE2%20motors%20EU%20MEP%20S%209AKK105789%20EN%2001_2013%20Rev%20A.pdf)>
- Nieminen, Juha 2003. Sähkökäyttöjen ohjauksjärjestelmät -kurssin materiaali. Vaasan ammattikorkeakoulu, sähkö- ja automaatiotekniikan osasto.
- Niinimäki, Petri 2013. Tuulivoimalan simulointi -projektityö sähkökäyttöjen kurssille. Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, sähkötekniikan osasto.
- Palmumaa, Petteri 2010. Tuulivoimalan verkkomääräykset Euroopassa ja Yhdysvalloissa sekä niiden kehittyminen tulevaisuudessa älykkäiden sähköverkkojen kannalta. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Lappeenranta.
- Pehmokäynnistinopas, 2011. ABB. Hakupäivä 29.4.2014.
<[http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/d11f99611045fef8c125796e00473a8a/\\$file/OPAS%20Pehmokaynnistys%20FI12_01.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/d11f99611045fef8c125796e00473a8a/$file/OPAS%20Pehmokaynnistys%20FI12_01.pdf)>
- Pienjännitemoottorit - Käyttöohje, 2010. ABB. Hakupäivä 29.3.2014.

[http://www05.abb.com/global/scot/scot259.nsf/veritydisplay/742083e5ed30ca63c12579ed003dbee/\\$file/Standard Manual Low Voltage FI revE%20lores.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot259.nsf/veritydisplay/742083e5ed30ca63c12579ed003dbee/$file/Standard%20Manual%20Low%20Voltage%20FI%20revE%20lores.pdf)

Pitkänen, Ismo 2007. Epätahtigeneraattori osana jätevedenpuhdistamon sähköjärjestelmää. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu.

<https://www.theseus.fi/handle/10024/9845>

SFS-EN 50160, 2010. Yleisestä sähköverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. 4.painos. Suomen Standardoimisliitto SFS, Espoo.

SFS-EN 60204, 2006. Koneturvallisuus. Koneiden sähkölaitteisto. Osa 1: yleiset vaatimukset. 3.painos. Suomen Standardoimisliitto SFS, Espoo.

SFS-käsikirja 16, 2003. Moottorikeskukset ja ohjelmoitavat ohjaukset. 5.painos. Suomen Standardoimisliitto SFS, Espoo.

SFS600-1, 2012. Sähköasennukset. Osa 1: SFS 6000 pienjännitesähköasennukset. 1.painos. Suomen Standardoimisliitto SFS, Espoo.

Tekninen opas 1, 2001. Suora momentinsäätö. ABB. Hakupäivä 28.3.2014.

Tekninen opas 4, 2001. Nopeussäädettyjen käyttöjen opas. ABB. Hakupäivä 28.3.2014.

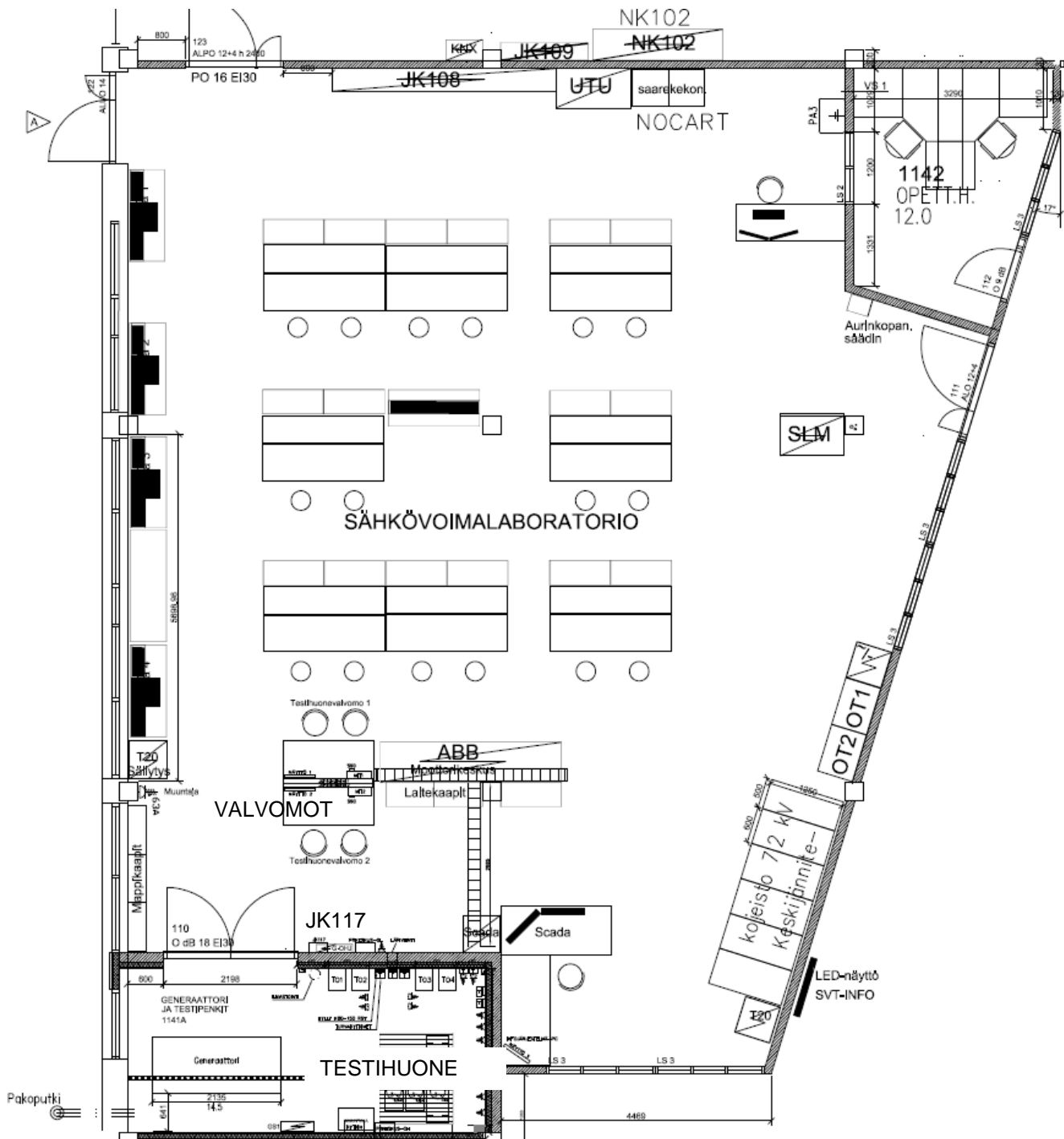
Tekninen opas 7, 2001. Sähkökäytön mitoitus. ABB. Hakupäivä 28.3.2014.

Tekninen opas 8, 2001. Sähköinen jarrutus. ABB. Hakupäivä 28.3.2014.

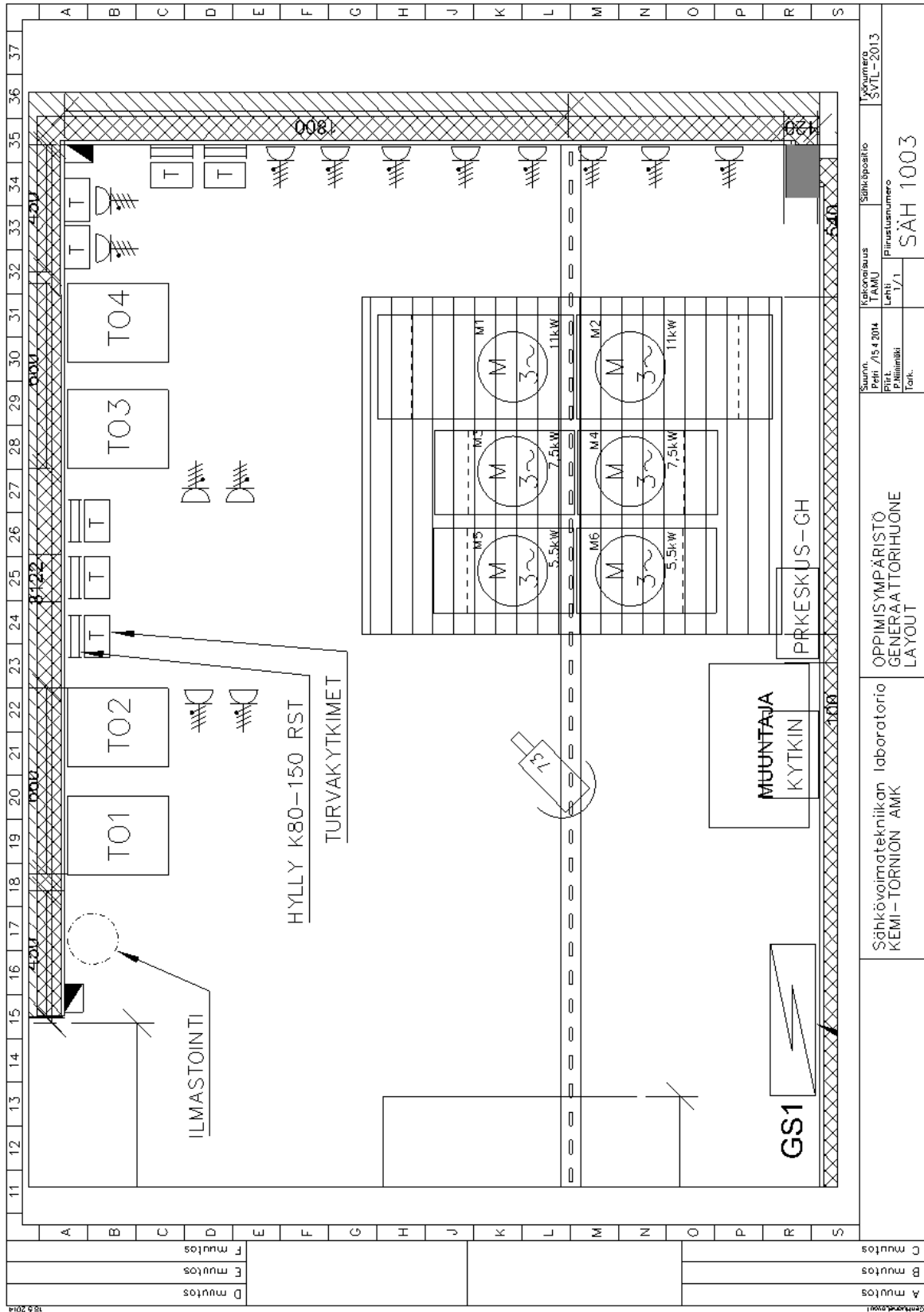
LIITTEET

- Liite 1. Laboratoriotilojen layout
- Liite 2. Testihuoneen layout
- Liite 3. Testihuoneen peräseinän layout
- Liite 4. Valvomon mittauspisteen layout
- Liite 5. Valvomon layout
- Liite 6. Testihuoneen vasemman seinän layout
- Liite 7. Testihuoneen oikean seinän layout
- Liite 8. Testihuoneen ulkopuolisen seinän layout
- Liite 9. ABB:n moottorien ominaisuudet DriveSize-ohjelmasta
- Liite 10. ABB:n 7,5 kW:n moottoreiden vertailu
- Liite 11. IEC-hyötysuhdeluokittelu 4-napaisille moottoreille
- Liite 12. Moottorien kuormitettavuuskäyrät DTC-säädetyille ACS800 taajuusmuuttajille
- Liite 13. MNSiS-moottorilähdön piirikaavio - suora käynnistin
- Liite 14. MNSiS-moottorilähdön piirikaavio - pehmokäynnistin
- Liite 15. MNSiS-moottorilähdön piirikaavio - taajuusmuuttaja
- Liite 16. Moottorien piirikaavio
- Liite 17. Testihuoneen taajuusmuuttajien piirikaavio
- Liite 18. 10 kV:n kojeiston moottorilähdön piirikaavio
- Liite 19. Siirrettävän taajuusmuuttajan piirikaavio
- Liite 20. JK117 piirikaavio
- Liite 21. Hätä-seis-piirin piirikaavio
- Liite 22. Työpyyntöesimerkki

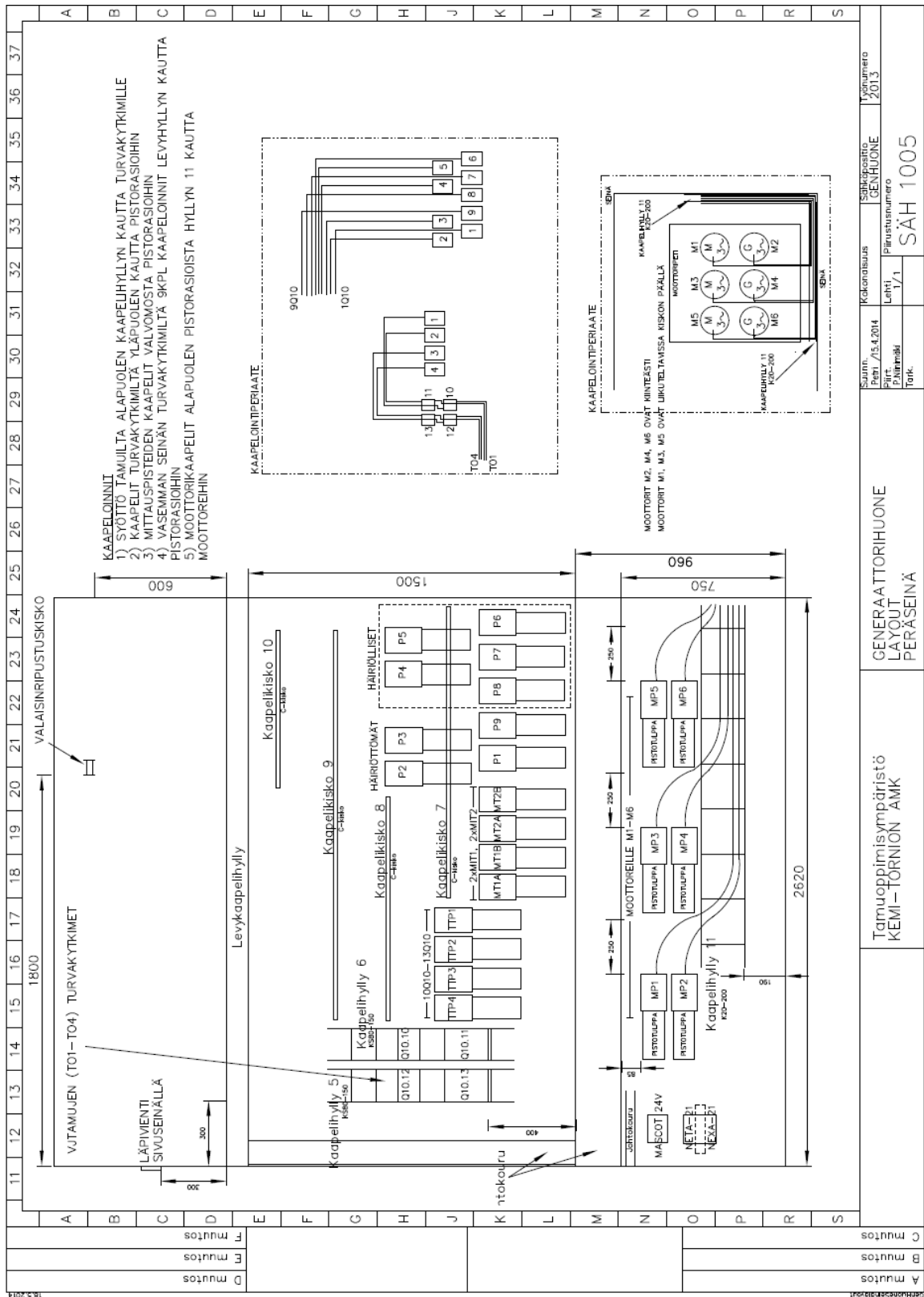
Laboratoriotilojen layout



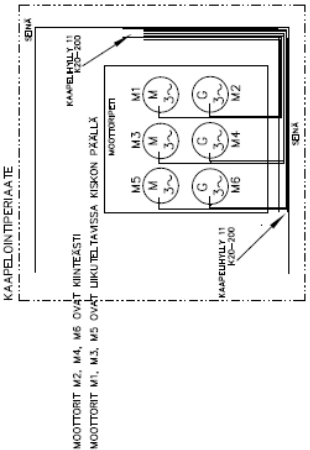
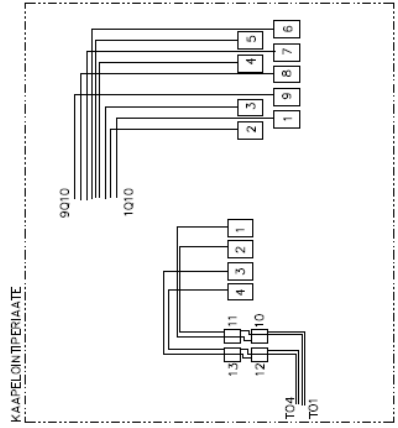
Testihuoneen layout



Testihuoneen peräseinän layout



KAPELONNIT
 1) SYÖTTÖTAMUILTA ALAPUOLEN KAPELUIHLLYN KAUITTA TURVAKYTKIMILLE
 2) KAPELIT TURVAKYTKIMILTÄ YLÄPUOLEN KAUITTA PISTORASIOIHIN
 3) MITTAUSPISTEDEN KAPELIT YALVOMOSTA PISTORASIOIHIN
 4) VASEMMAN SEINAN TURVAKYTKIMILTÄ 9KPL KAPELONNIT LEVYHLLYN KAUITTA PISTORASIOIHIN
 5) MOOTTORIKAPELIT ALAPUOLEN PISTORASIOISTA HLLYN 11 KAUITTA MOOTTOREIHIN

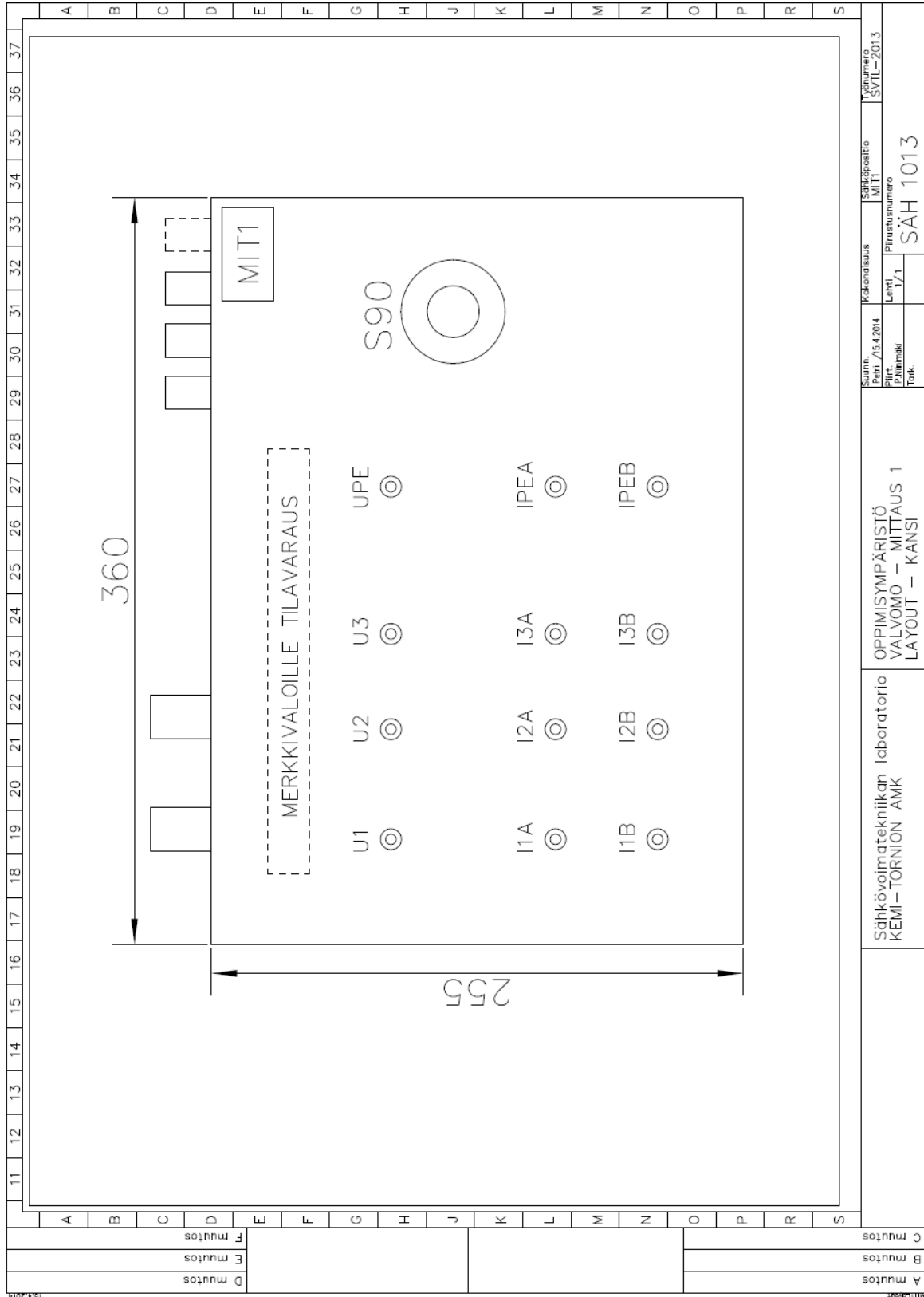


A muutos	Tamuuoppimisympäristö KEMI – TORNION AMK	Summ. Eten./15.4.2014	Kokonaisuus	SBK-projektio GENHUONE	Hyönuumero 2013
B muutos	GENERAATTORIHUONE LAYOUT PERÄSEINÄ	Lehti Pöytäkirja	Lehti	Piirustusuunero	
C muutos		Tark.	17/1	SÄH 1005	

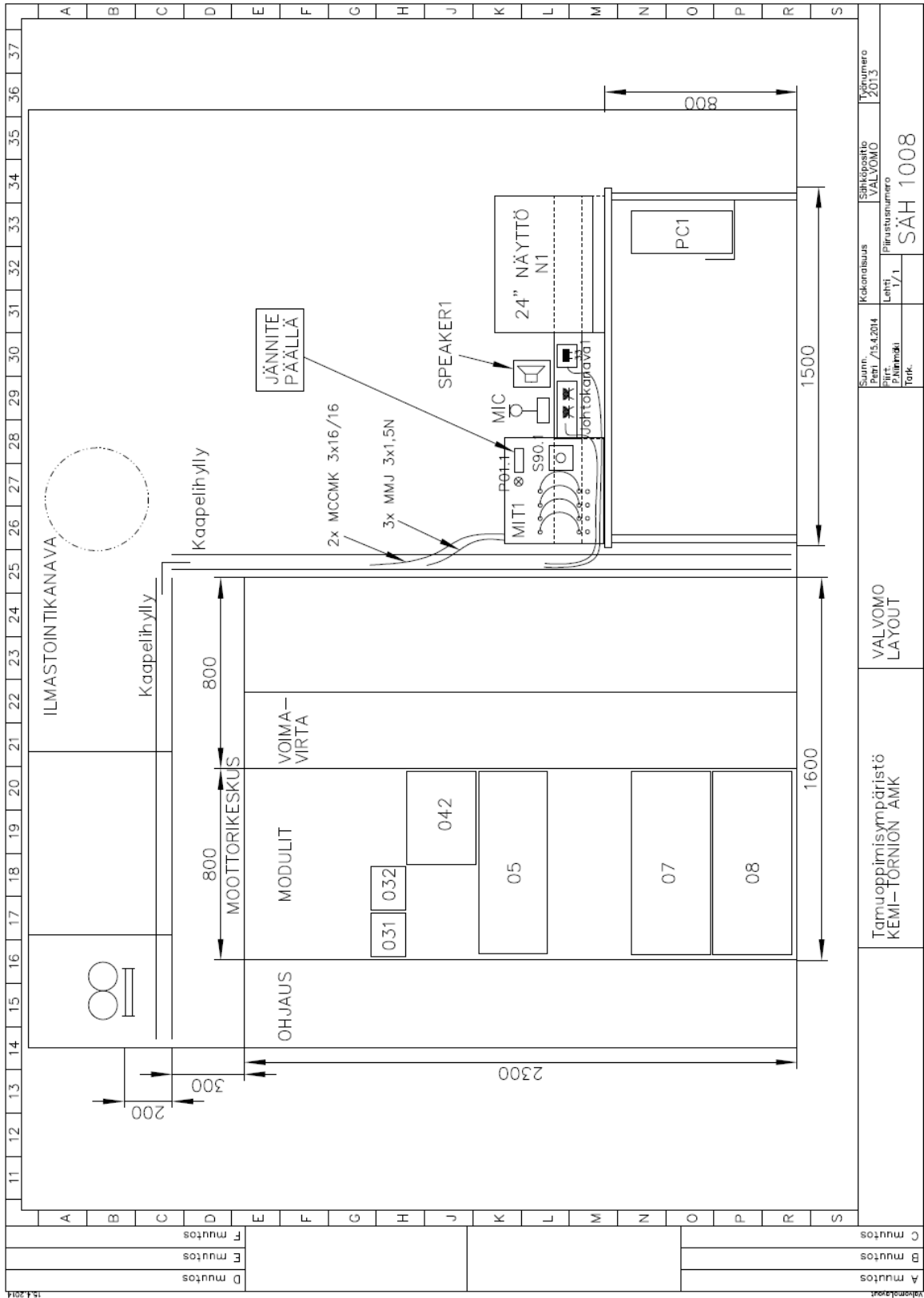
16.5.2014

GenHuoneSBK1005

Valvomon mittauspisteen layout



Valvomon layout



15.4.2014

A muutos	Tamuoppimisympäristö KEMI- TORNION AMK		VALVOMO LAYOUT	Suunn. Pentti /15.4.2014	Kokonaisuus	Sähköpiirros VALVOMO	Työnumero 2013
B muutos				Piir. P. Hirvonen	Lehti 1/1	Piirustusnumero SÄH 1008	
C muutos				Tark.			

Testihuoneen oikean seinän layout

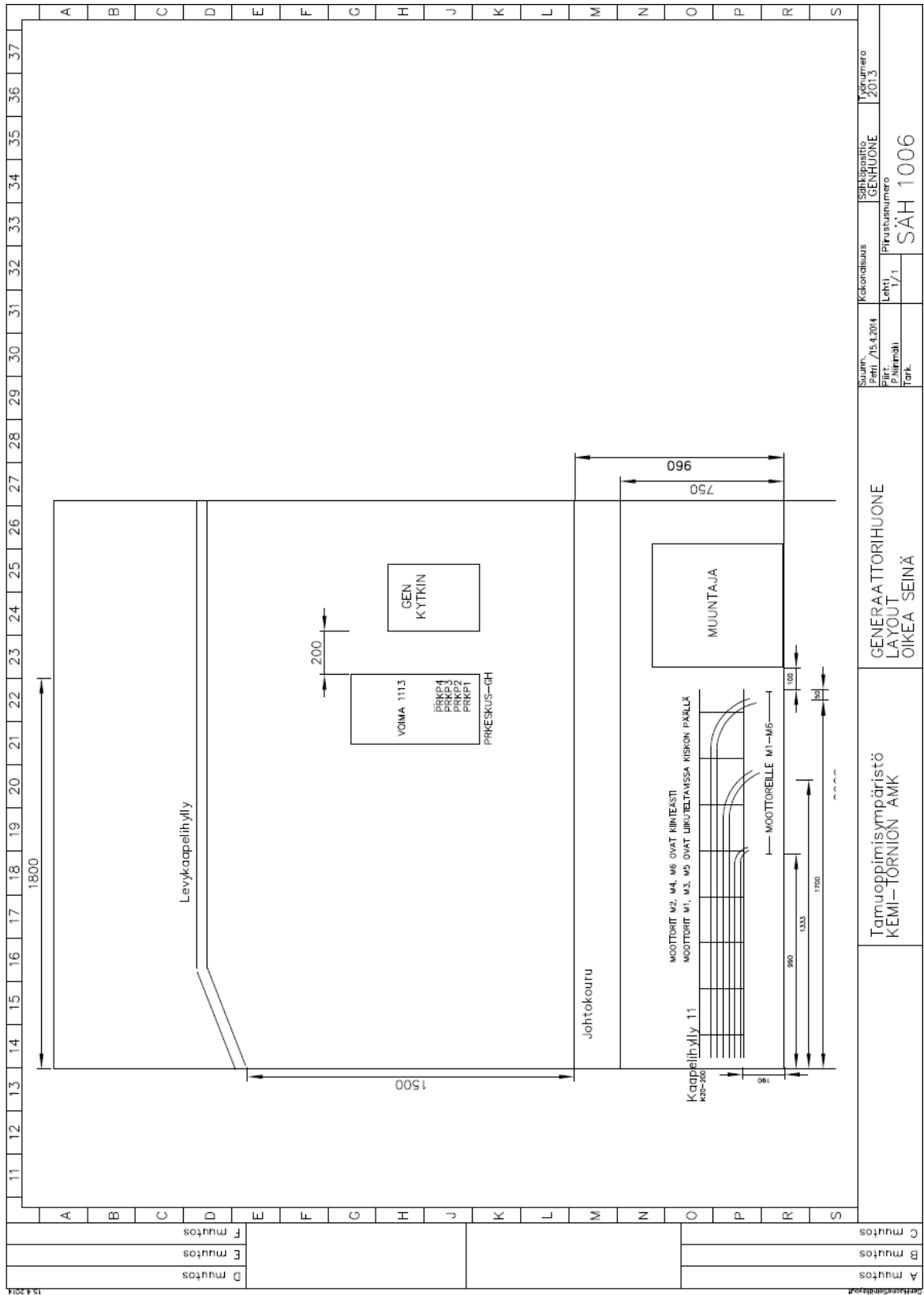


ABB:n moottorien ominaisuudet DriveSize-ohjelmasta

5,5 kW

Motor load & specifications

Load type: Pump/fan load

Overload type: Simple cyclic

	Min	Base	Max
Speed [rpm]	1500	1500	1500
Power [kW]	4	4	4
Overload [%]		100	100
Overload time [s]	10	every [s]	600

Name	[undefined]
No. of motors	1
Motor type	IEC 34 catalog
FrameMaterial	Aluminum
Family	M2AA
Polenumber	Automatic
Efficiency	IE2
Design	CENELEC
Connection	Not specified
IP class	IP55
IC class	IC411 self ventilated
IM class	IM1001, B3(foot)
Max. speed rule	Standard
Temp. rise	B (<80 K)
Tmax margin	43 %

Selected motor data

Selection: DriveSize

Type Code: M2AA 132 M 4

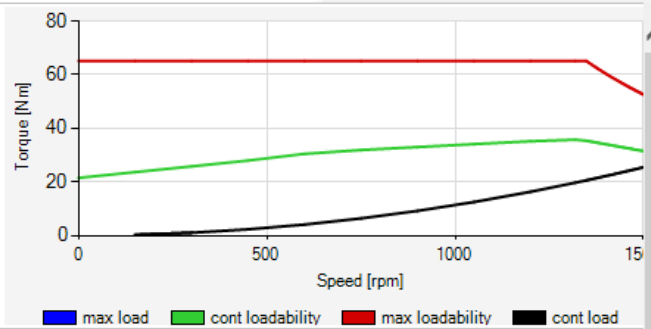
Product Code: 3GAA 132 212-AXE (ES)

Catalogue Data

Voltage [V]	400
Frequency [Hz]	50
Power [kW]	5.5
Poles	4
Speed [rpm]	1465
Max mech. speed [rpm]	4500
Current [A]	11.2
Torque [Nm]	35.8
Tmax/Tn	2.6
Power factor	0.79
Efficiency [%]	89
Temperature rise class	B
Insulation class	F
Inertia [kgm ²]	0.038

Selection data:

	Required	Result	Margin
Torque [Nm]	25.5	31.5	24 %
n base	4	4.95	24 %
Overload [Nm]	25.5	52.6	107 %



Losses [W]:

speed [rpm]	Load%				
	4%	16%	36%	64%	100%
300	96	100	119	170	280
600	121	126	145	199	310
900	155	160	180	236	360
1200	200	205	227	290	410
1500	239	246	270	350	520

Total losses [W]:

speed [rpm]	Load%				
	4%	16%	36%	64%	100%
300	205	210	234	296	425
600	230	237	262	329	463
900	264	272	299	371	524
1200	310	318	349	431	587
1500	345	356	392	499	717

7,5 kW

Motor load & specifications

Load type: Pump/fan load

Overload type: Simple cyclic

	Min	Base	Max
Speed [rpm]	1500	1500	1500
Power [kW]	5	5	5
Overload [%]		100	100

Overload time [s]: 10 every [s]: 600

Name	[undefined]
No. of motors	1
Motor type	IEC 34 catalog
FrameMaterial	Aluminum
Family	M2AA
Polenumber	Automatic
Efficiency	IE2
Design	CENELEC
Connection	Not specified
IP class	IP55
IC class	IC411 self ventilated
IM class	IM1001, B3(foot)
Max. speed rule	Standard
Temp. rise	B (<80 K)
Tmax margin	43 %

Selected motor data

Selection: DriveSize

Type Code: M2AA 132 MA 4

Product Code: 3GAA 132 214-AXE (ES)

Catalogue Data

Voltage [V]	400
Frequency [Hz]	50
Power [kW]	7.5
Poles	4
Speed [rpm]	1460
Max mech. speed [rpm]	4500
Current [A]	15.3
Torque [Nm]	49
Tmax/Tn	2.6
Power factor	0.79
Efficiency [%]	89.1
Temperature rise class	B
Insulation class	F
Inertia [kgm ²]	0.048

Selection data:

	Required	Result	Margin
Torque [Nm]			
n base	31.8	43.1	35 %
Power [kW]			
n base	5	6.77	35 %
Overload [Nm]			
n base	31.8	71.5	125 %



Losses [W]:

speed [rpm]	Load%				
	4%	16%	36%	64%	100%
300	128	134	156	217	350
600	159	164	188	250	390
900	200	206	230	300	440
1200	250	260	290	350	500
1500	300	310	340	430	630

Total losses [W]:

speed [rpm]	Load%				
	4%	16%	36%	64%	100%
300	249	256	283	356	511
600	280	287	317	394	559
900	321	330	362	449	620
1200	371	385	425	506	694
1500	416	431	474	593	845

Efficiency Repc

11 kW

Motor load & specifications

Load type: Pump/fan load

Overload type: Simple cyclic

	Min	Base	Max
Speed [rpm]	1500	1500	1500
Power [kW]	9	9	9
Overload [%]		100	100

Overload time [s]: 10 every [s]: 600

Name	[undefined]
No. of motors	1
Motor type	IEC 34 catalog
Frame/Material	Aluminum
Family	M2AA
Polenumber	Automatic
Efficiency	IE2
Design	CENELEC
Connection	Not specified
IP class	IP55
IC class	IC411 self ventilated
IM class	IM1001, B3(foot)
Max. speed rule	Standard
Temp. rise	B (<80 K)
Tmax margin	43 %

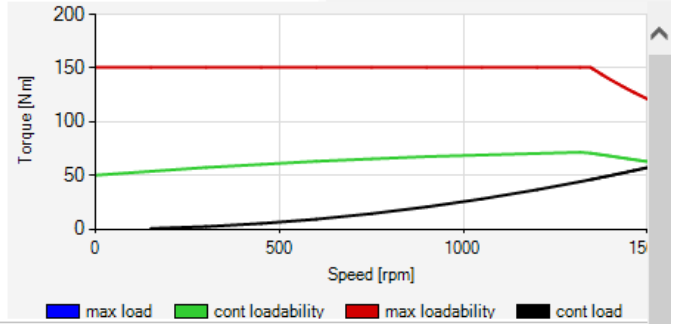
Selected motor data

Selection: DriveSize
 Type Code: M2AA 160 MLA 4
 Product Code: 3GAA 162 043-ADG (SE)

Catalogue Data	
Voltage [V]	400
Frequency [Hz]	50
Power [kW]	11
Poles	4
Speed [rpm]	1463
Max mech. speed [rpm]	4500
Current [A]	20.7
Torque [Nm]	71.7
Tmax/Tn	3
Power factor	0.85
Efficiency [%]	90.2
Temperature rise class	B
Insulation class	F
Inertia [kgm2]	0.084

Selection data:

Torque [Nm]	Required	Result	Margin
n base	57.3	62.9	10 %
Power [kW]			
n base	9	9.88	10 %
Overload [Nm]			
n base	57.3	121	112 %



Losses [W]:

speed [rpm]	Load%				
	4%	16%	36%	64%	100%
300	127	137	181	300	550
600	171	181	227	350	620
900	229	240	290	420	700
1200	310	320	370	510	810
1500	380	400	470	660	1060

Total losses [W]:

speed [rpm]	Load%				
	4%	16%	36%	64%	100%
300	281	294	350	496	790
600	325	340	400	554	880
900	383	401	468	633	970
1200	465	482	553	735	1110
1500	529	559	657	901	1400

Efficiency Repc

ABB:n oikosulkumoottorien vertailu

Taulukko 1. ABB:n moottorien vertailu kokoluokassa 7,5 kW

Materiaali	Navat	Nopeus (r/min)	Hyötysuhde IEC 100%	cos φ	Paino (kg)	Melu (dB)
Alumiini	2	3000	88,5	0,87	56	73
Alumiini	4	1500	89,1	0,79	59	63
Alumiini	6	1000	87,6	0,79	105	61
Valurauta	2	3000	88,6	0,84	70	70
Valurauta	4	1500	89,3	0,81	73	64
Valurauta	6	1000	87,6	0,79	141	61

(Low voltage general performance IE2 high efficiency motors, 2013)

IEC-hyötysuhdeluokittelu 4-napaisille moottoreille

Taulukko 1. IEC:n vaatimukset nimellishyötysuhteille

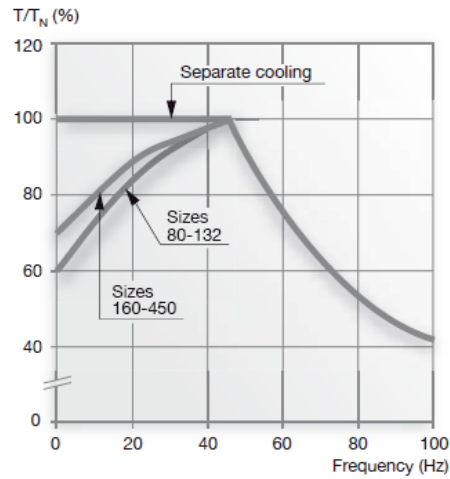
Teho (kW)	Navat	Hyötysuhde IEC2	Hyötysuhde IEC3
5,5	4	87,7	89,6
7,5	4	88,7	90,4
11	4	89,8	91,4

(EU 640/2009, 8-9.)

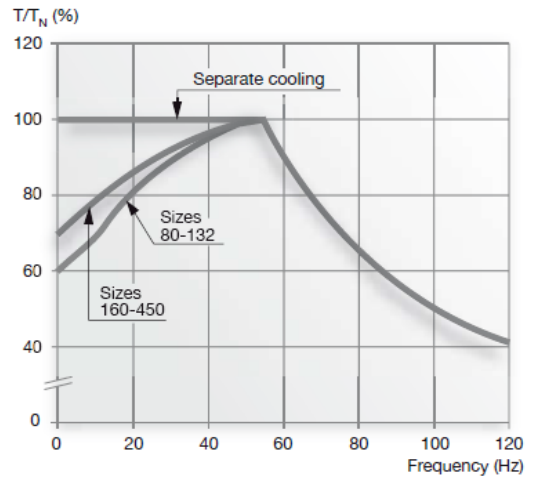
Moottorien kuormitettavuuskäyrät DTC-säädetyille ACS800 taajuusmuuttajille

Käytettyjen moottorien kokoluokat: 132 (5,5 ja 7,5 kW) ja 160 (11 kW) kuvasta 4a.

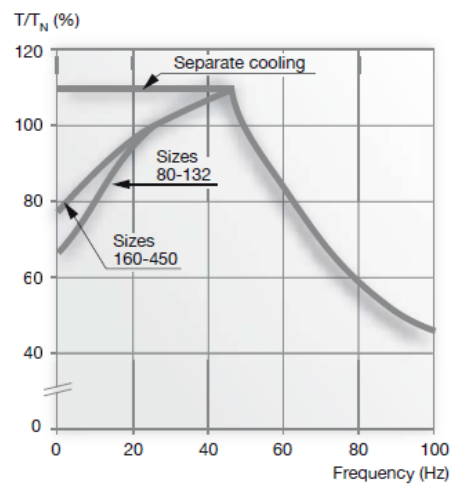
4a ACS800/50 Hz, Temperature rise B



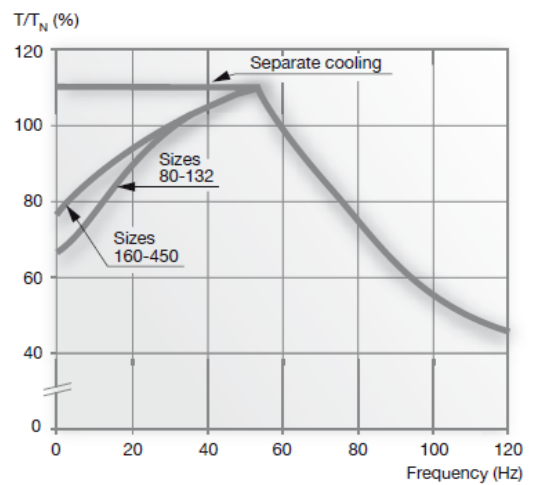
4b ACS800/60 Hz, Temperature rise B



4c ACS800/50 Hz, Temperature rise F

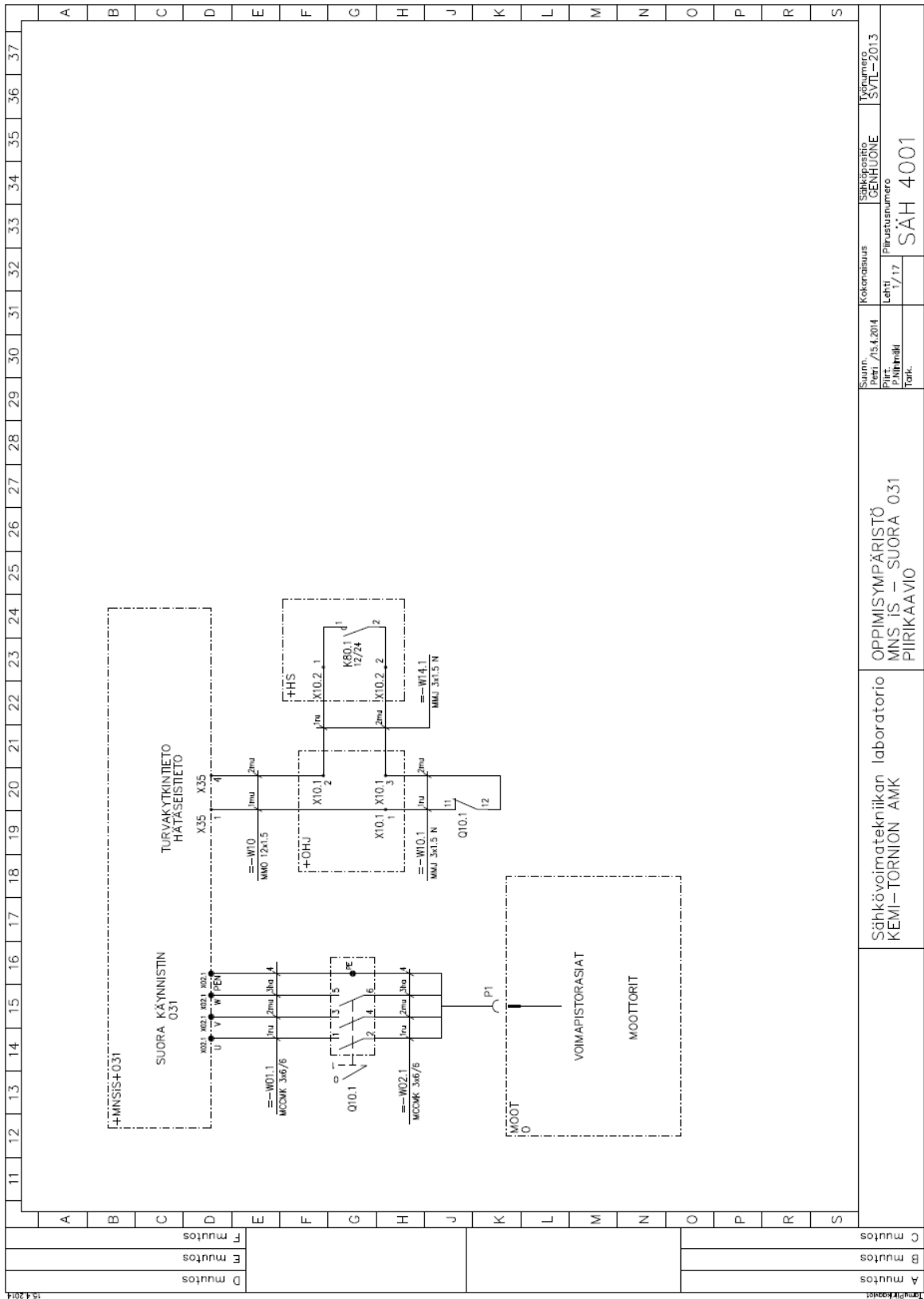


4d ACS800/60 Hz, Temperature rise F



(Pienjännitemoottorit - Käyttöohje, 2010)

MNSiS-moottorilähdön piirikaavio - suora käynnistin



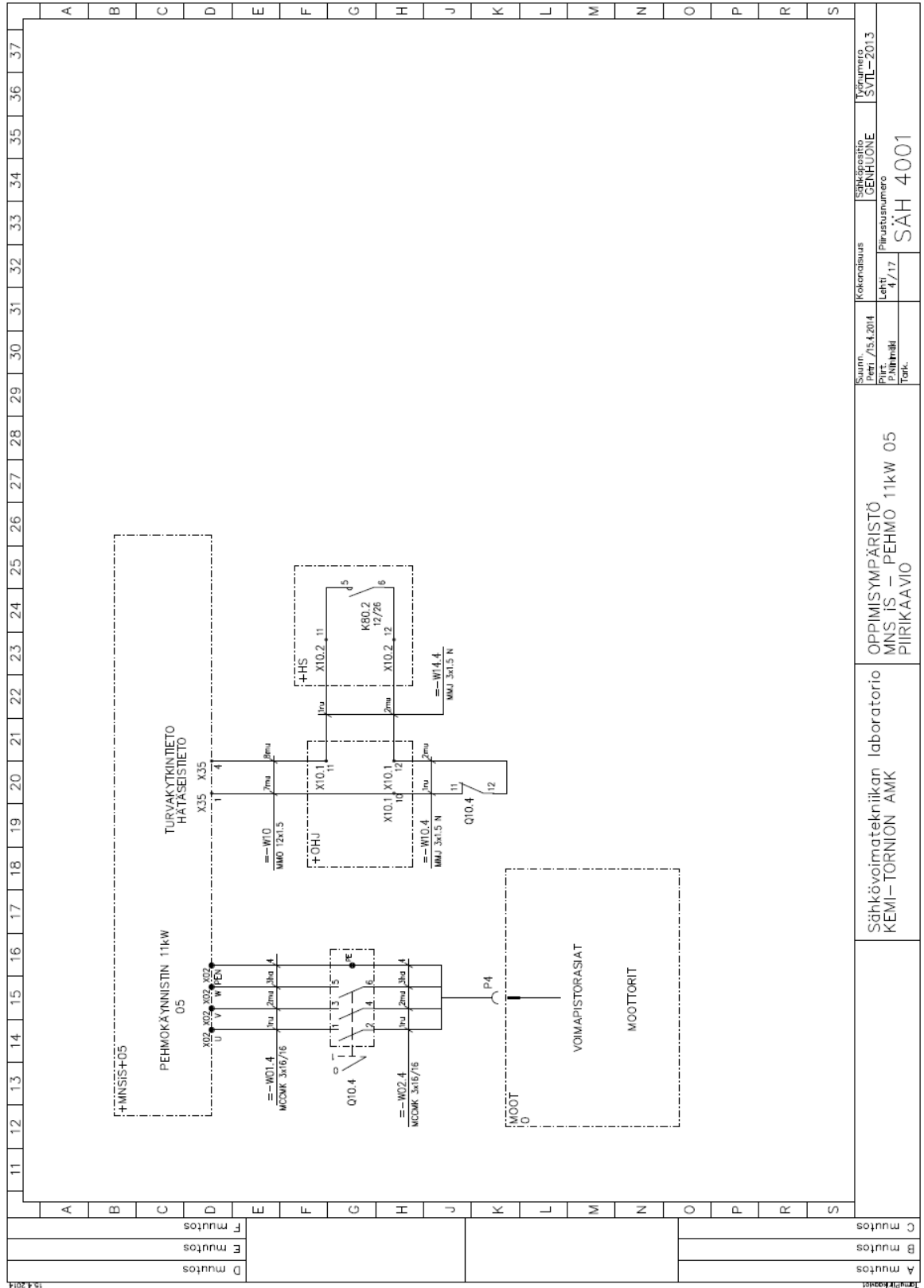
15.4.2014

A muutos
D muutos
E muutos
F muutos

A muutos
B muutos
C muutos

OPPIKESKUS GENHUONE	Kokonaistus	Isäntä Pää / 15.4.2014	Lehti 1/17	Projekti P117	Tark.
Projekti P117	Lehti 1/17	Projekti P117	Tark.	OPPIKESKUS MNS IS - SUORA 031 PIIRIKAAVIO	OPPIKESKUS MNS IS - SUORA 031 PIIRIKAAVIO
SÄH 4001		Sähkövoimatekniikan laboratorio KEMI - TORNION AMK			
SÄH 4001		SÄH 4001			

MNSiS-moottorilähdön piirikaavio - pehmokäynnistin



15.4.2014

15.4.2014

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

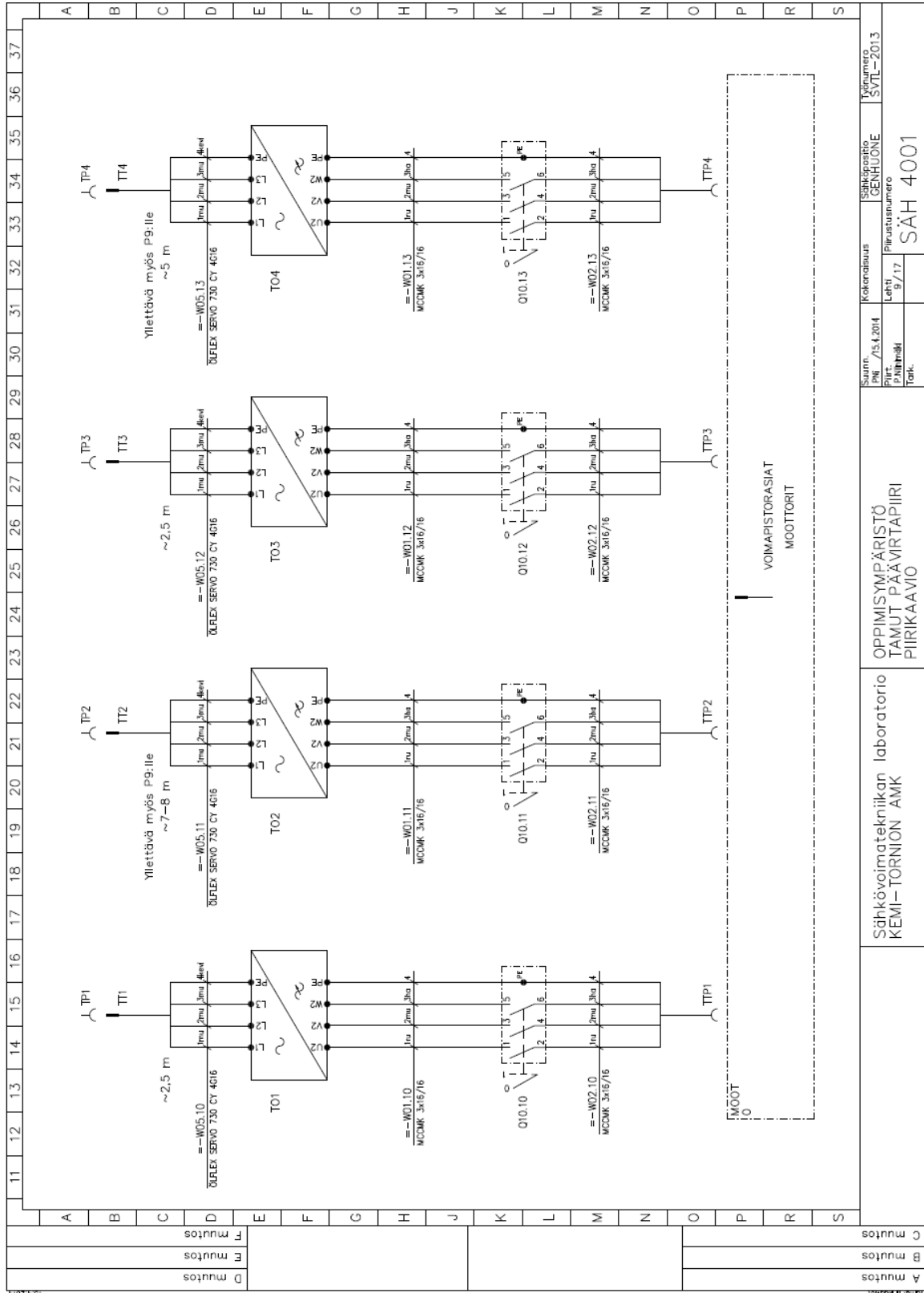
C	C muutos	
D		
E		
F		
G		
H		
I		
J		
K		
L		
M		
N		
O		
P		
Q		
R		
S		

Sähkövoimatekniikan laboratorio
KEMI-TORNION AMK

OPPIKÄYNNISTÖ
MNSiS - PEHMO 11kW 05
PIIRIKAAVIO

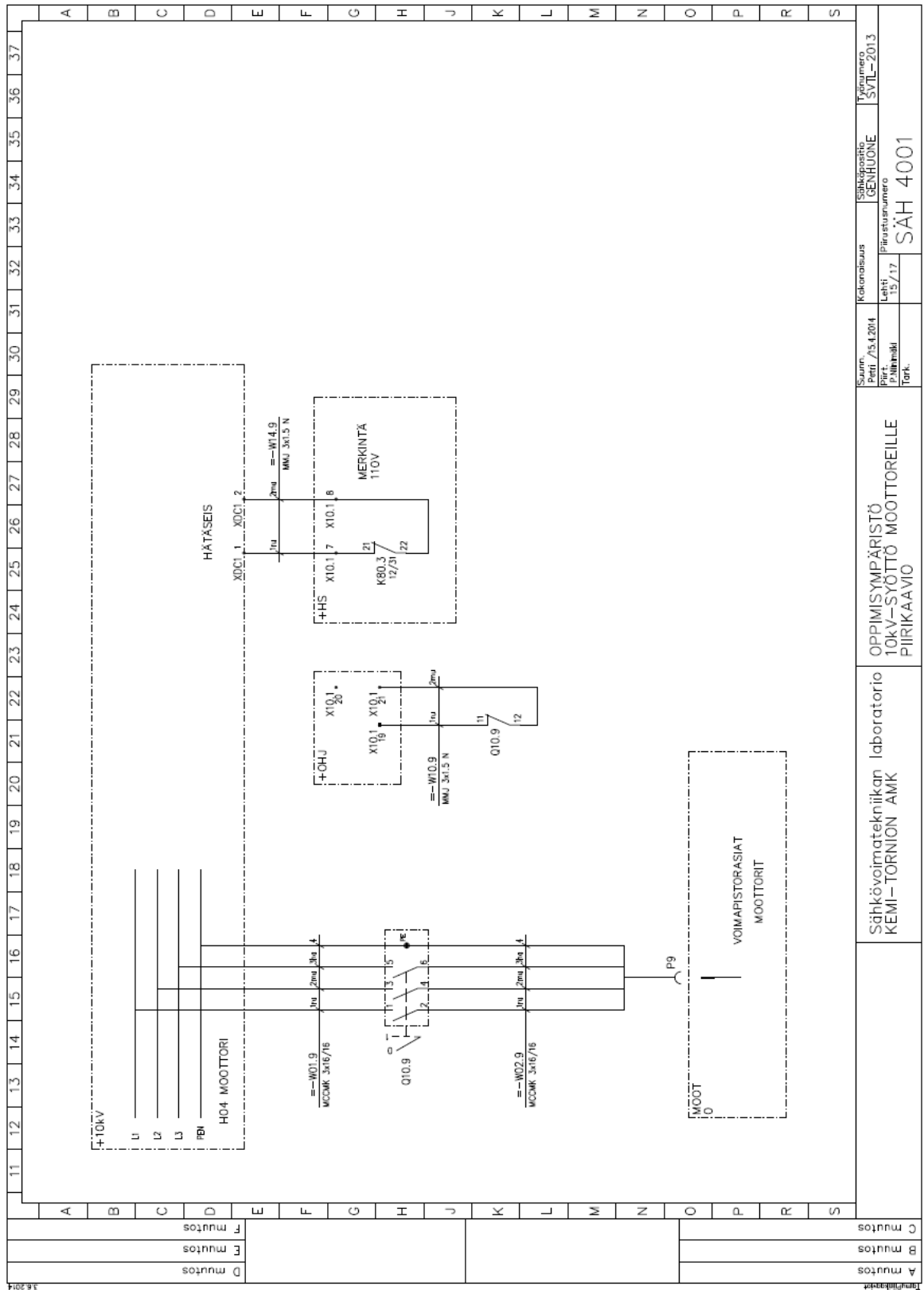
Suunn. Perr. /15.4.2014	Kokonaus	SSK-oppaito GENHUONE	Typurmerko. SVL-2013
Piirt. Puhuri	Lehti 17/17	Piirustusnumero	
Tark.		SÄH 4001	

Testihuoneen taajuusmuuttajien piirikaavio



A muutos	Sähkövoimatekniikan laboratorio	Suunn. / 15.4.2014	Kokonaisuus	Sähköpiirito	Yhtymäno.
B muutos	KEMI – TORNION AMK	Lehti	Lehti	GENHUONE	SVTL – 2013
C muutos	OPPIMISYMPÄRISTÖ TAMUJ PÄÄVIRTAPIIRI	Piirustuksen numero	Piirustuksen numero	SÄH 4001	

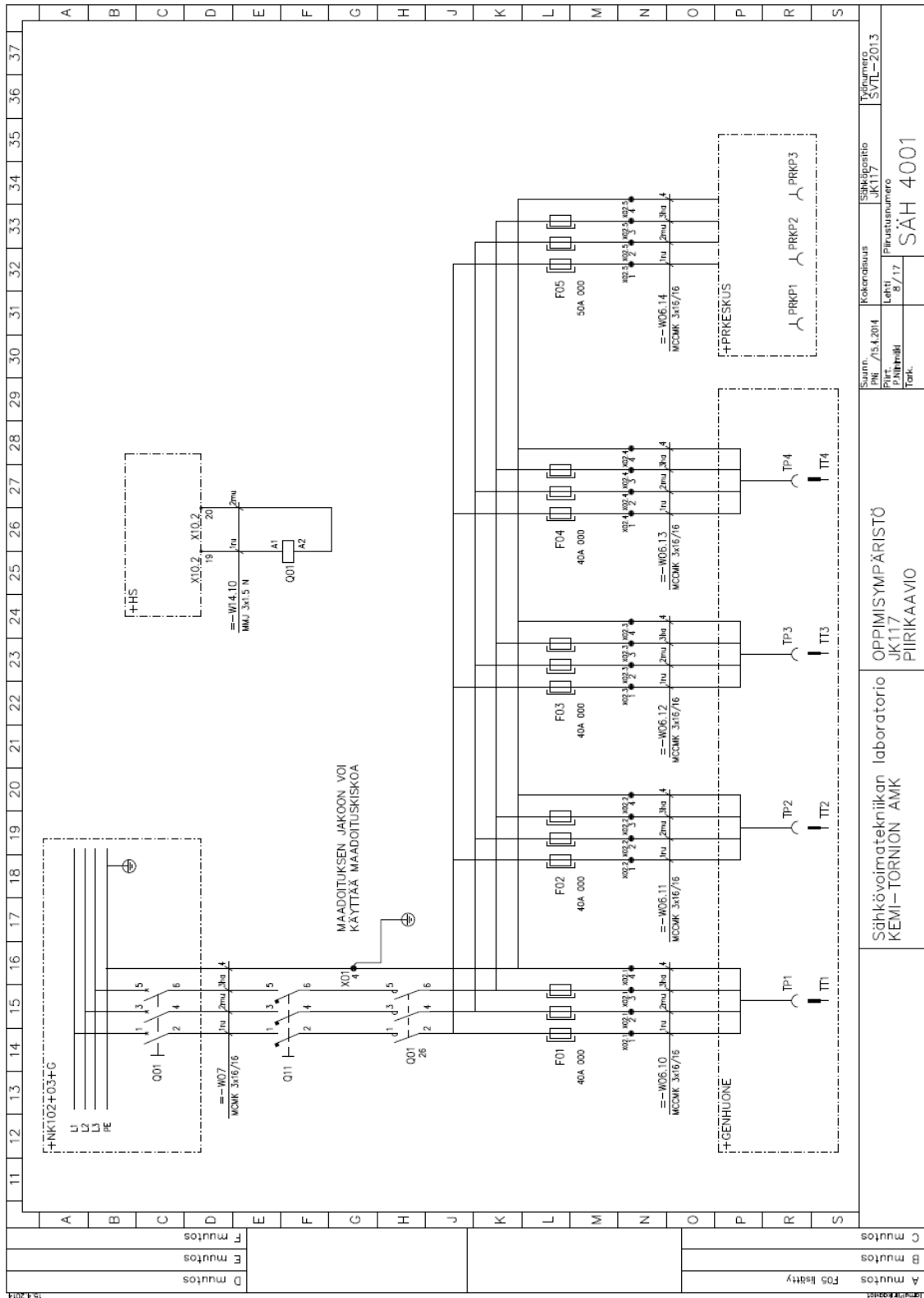
10 kV:n kojeiston moottorilähdön piirikaavio



16.2014

A muutos	Sähkövoimatekniikan laboratorio KEMI-TORNION AMK	OPPIYMPÄRISTÖ 10KV-SYÖTTÖ MOOTTOREILLE PIIRIKAAVIO	Suunn. /15.4.2014 Piir. /15.4.2014 P. Järvenpää Tark.	Kikoroisuus Lehti 15/17	Sähköpiirros GENUONE Piirustusanumero SÄH 4001	Työnumero SVTL-2013
B muutos						
C muutos						

JK117 piirikaavio



Sähkövoimatekniikan laboratorio
KEMI-TORNION AMK

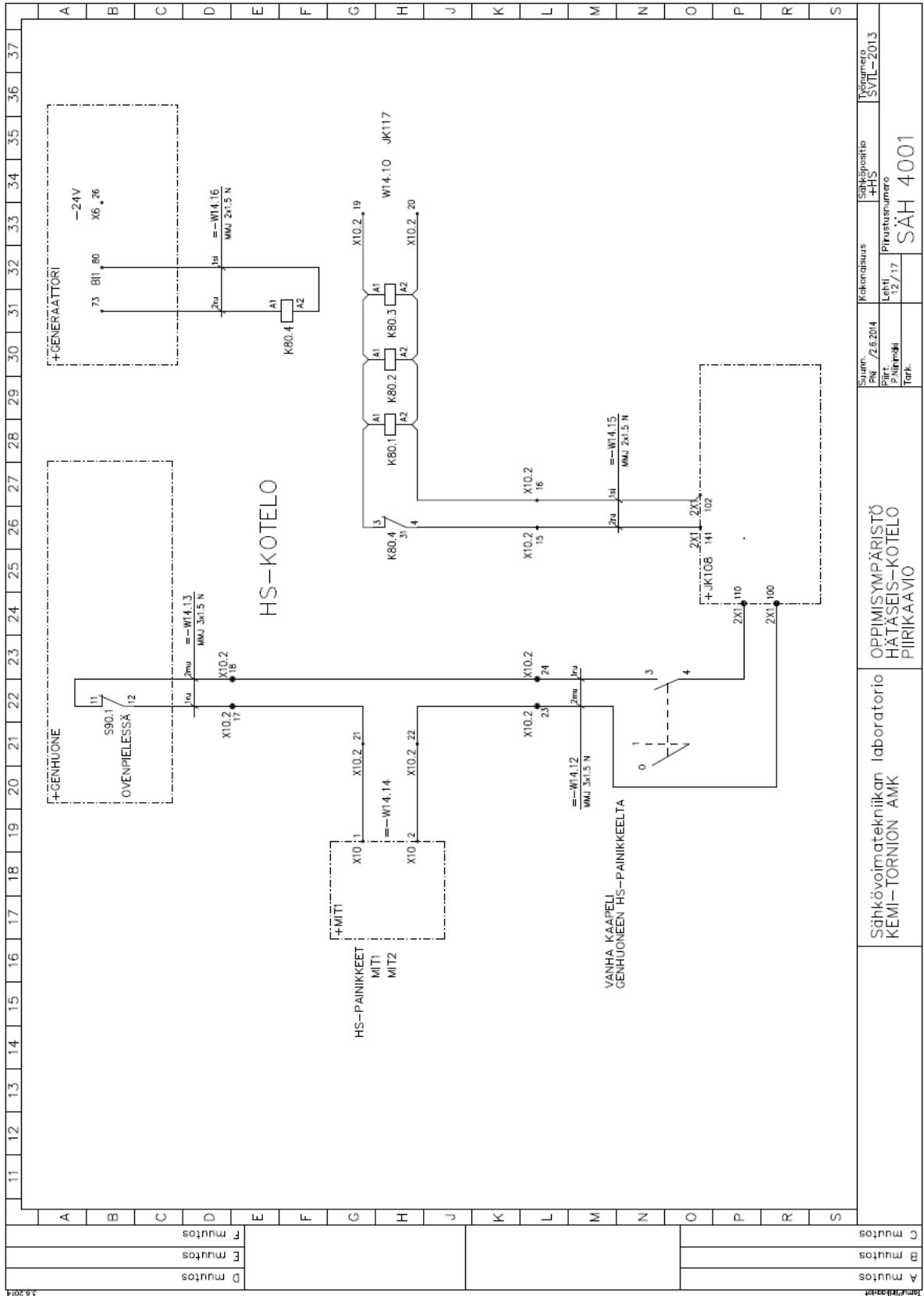
OPPIMISYMPÄRISTÖ
JK117
PIIRIKAAVIO

Suunn. PNI /15.4.2014
Piir. Pihlajmäki
Tarkk. Tolh.

Kokonaisuus JK117
Sähkösijoitus JK117
Pilaristussuunnitelma B/17
SÄH 4001

Yhtymänumero SVTL-2013

Hätä-seis-piirin piirikaavio



18.2014

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

Summ. Pn / 2.6.2014	Kokonaisuus	Sähköpiirioikeus	Dokumentti
Piiritt. P. / 12/17	Lehti	+HS	SVTL-2013
Tark.		Piirustuksen numero	
		SÄH 4001	

OPPIMISYMPÄRISTÖ
HÄTÄSEIS-KOTELO
PIIRIKAAVIO

Sähkövoimatekniikan laboratorio
KEMI-TORNION AMK

Työpyyntöesimerkki

TYÖPYYNTÖ

Projektit:	Kiinteistösähköistys (K), Taajuusmuuttaja (T), Aurinkoinfo (A)	TyöID
Yhteyshenkilö(t):	Petri Niinimäki (040-) petri.niinimaki@	T16 Version1
Antopäivä:	27.01.2014 Määräaika: -	
Prioriteetti:	<input type="checkbox"/> High <input type="checkbox"/> Medium <input checked="" type="checkbox"/> Low	

Työkohde

Gen-huoneen ulkopuolella seinällä yläosan pistorasia/laiteasennukset

Työkuvaus

Valmistelu:

-Tikkaat, kaapelimerkit

-Pora, kiskoa + kaarikiinnikkeitä, kiinnitystarvikkeita (ankkureita tms gyproc + tiiliseinää varten)

- a) Asennetaan pistorasiakeskus (Voima 1113) kuvan mukaisesti seinälle (LIITE 1)
 - a. Tasataan alareuna samalle tasolle kuin viereinen generaattorin ohjauskaappi, jätetään väliä noin 50mm
 - b. Keskuksen pystysuora suuntaus viereisen ohjauskaapin mukaan
 - c. Jos mahdollista keskus olisi hyvä saada kiinnitettyä seinän sisäiseen koolauspalkkiin ainakin yhdeltä reunaltaan jotta pysyy kiinni seinässä (siihen kohdistuu vetoa ja työntöä kun pistorasioihin liitetään pistotulppia)
- b) Asennetaan voimapistorasia (samoja 63A rasioita kuin gen-huoneessa) VP1 kuvan mukaisesti (LIITE 1)
 - a. Edelleen noin 50mm väli pistorasiakeskukseen, pystysuora suunta pistorasiakeskuksen mukaan
- c) Kytetään VP1 rasialta MCCMK 3x16/16 kaapeli kuvan mukaisesti gen-huoneeseen turvakytkimelle Q10.7 (LIITE 1 + LIITE 2 + LIITE 3)
 - a. Asennetaan seinälle muutamia kiskoja joihin kaapeli saadaan kiinnitettyä kaapelikiinnikkeillä (vakioperaate: kiinnitys mutkan loppumisen jälkeen noin 50mm päähän kummallakin puolella mutkaa ja vaakasuoralla osuudella sopivilla väleillä niin että kauttaaltaan asennuksessa olisi kiinnikkeillä lähestulkoon sama keskinäinen välimatka)
 - b. Kaapelin voinee nostaa olemassa olevaa kaapelihyllyä pitkin ylös reiän lähelle (kiinnitys vaikka hyllyn seinänpuolelle jos ei saa nostettua välissä siististi hyllyn päälle normaaliin paikkaan)
 - c. Gen-huoneen puolella katsokaa sopiva reitti. LIITTEESSÄ 2 on yksi ehdotus – kiskojen välimatka voi olla harvempikin / niitä voi olla vähemmän. Muoviset kaapelikourut eivät ehkä ole tarpeeksi siisti ratkaisu.
 - i. **HUOM. tuolle samalle reitille gen-huoneen puolella tulee asennettavaksi myös 6-10kpl MMJ 3x1,5N kaapeleita TAI 1 kpl MMO 12x1,5 + muutama MMJ 3x1,5N (ohjauskotelon ja läpiviennin väliin) -> joten gen-huoneen kiskoihin kannattaa jättää tilaa myös muille kaapeleille (Tarkistakaa paljonko MMO 12x1,5 kaapelia on saatu hankittua: sen pitää riittää MNS-ohjauspuolen kuilusta OHJ-koteloon (prio1) ja jos riittää niin sitä käytetään OHJ-kotelo – JK117 välilläkin (prio2))**
 - d. Huomioidaan kaapelin pienin sallittu taivutussäde
 - e. Merkitään kaapeli kuten muutenkin kummassakin päässä (ID, tyyppi ja minne menee)

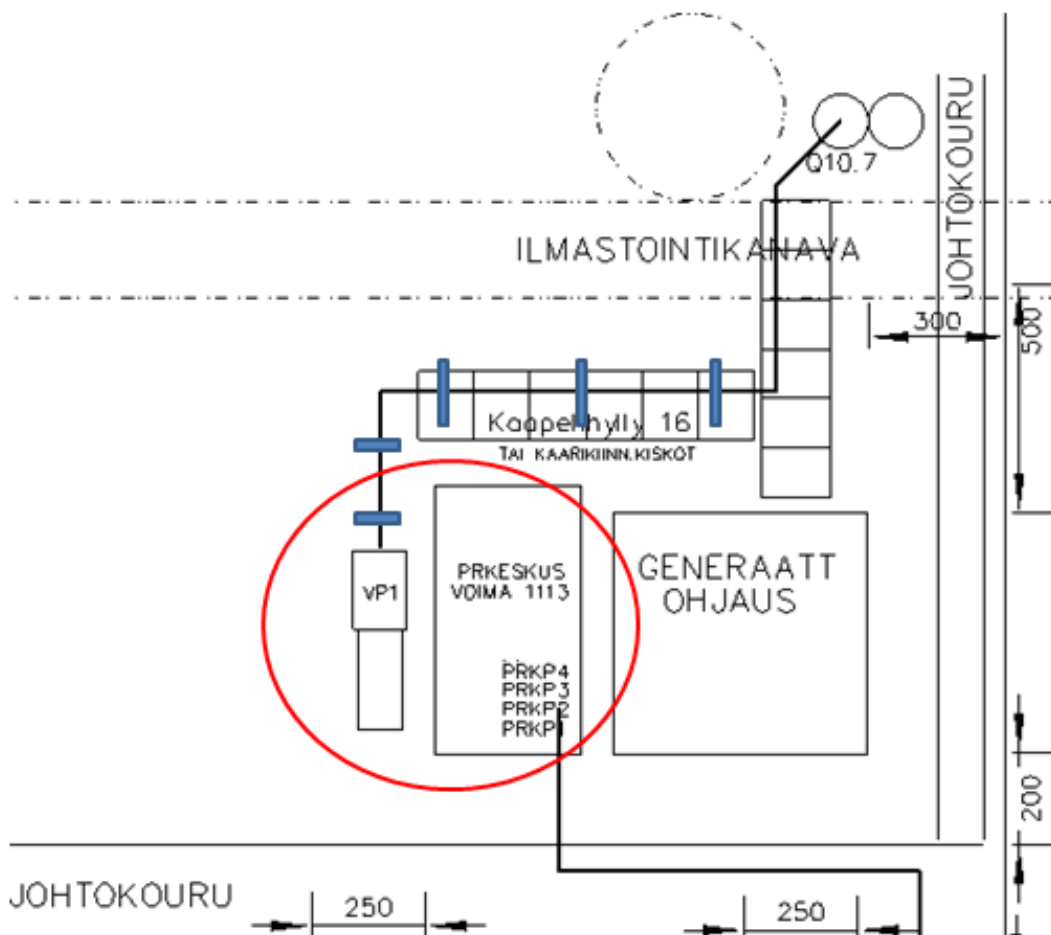
LIITE 1: GEN-HUONEEN ULKOPUOLEN SEINÄN LAYOUT

LIITE 2: GEN-HUONEEN VASEN SEINÄ LAYOUT

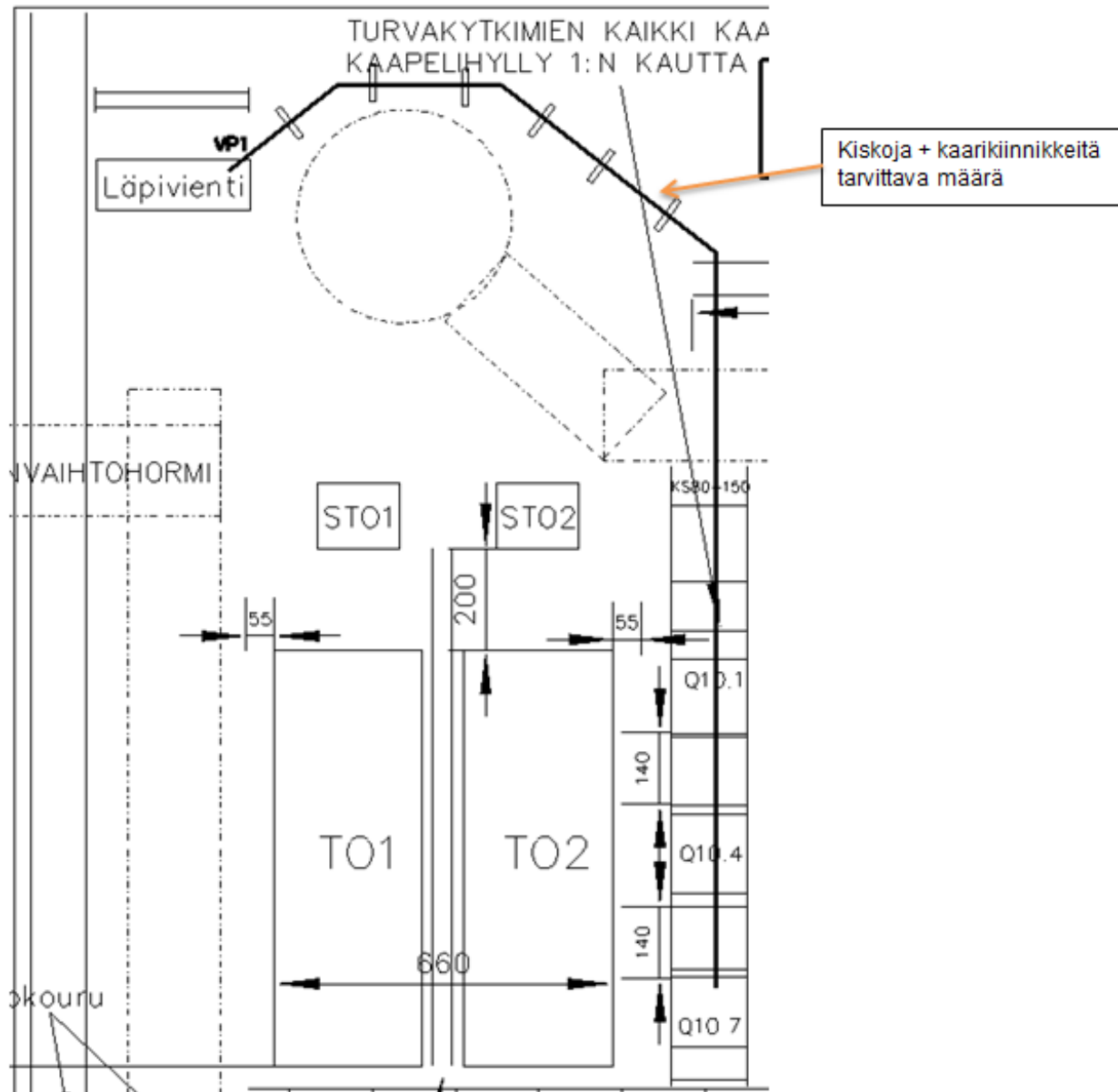
LIITE 3: PIIRIKAAVIO

Oletuksia / Rajoitteita / Huomioita / Lopputulos

LIITE 1: GEN-HUONEEN ULKOPUOLEN SEINÄN LAYOUT
(Generaattorihuoneen ulkopuolella parioven vasemmalla puolella oleva seinäosuus)



LIITE 2: GEN-HUONEEN VASEN SEINÄ LAYOUT



LIITE 3: PIIRIKAAVIO

