

Samu Linden

Tehonsyöttöjärjestelmän kuormitusmittaukset

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkövoimatekniikka

Insinöörityö

8.9.2013

Tekijä Otsikko	Samu Linden Tehonsyöttöjärjestelmän kuormitusmittaukset
Sivumäärä Aika	43 sivua + 4 liitettä 8.9.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	Development Manager Tero Toikka lehtori Eero Kupila
<p>Tässä insinööriyössä oli tavoitteena toteuttaa tehonsyöttöjärjestelmän kuormitusmittaukset eli lämpötilamittaukset ja kehittää uusi ja mahdollisimman yksinkertainen mittaasetelma tehonsyöttöjärjestelmien kuormitusmittauksia varten Delta Energy Systems (Finland) Oy:n käyttöön.</p> <p>Työssä perehdyttiin tehonsyöttöjärjestelmiin yleisellä tasolla sekä niille asetettuihin vaatimuksiin. Työssä pyrittiin myös selvittämään seikkoja, joihin tulee kiinnittää huomiota oikeanlaisen järjestelmän valinnassa.</p> <p>Yrityksessä oli toteutettu aiemminkin eri järjestelmien kuormitusmittauksia, mutta niiden suorittamiseen ei ollut olemassa virallisia ja yhtenäisiä ohjeita. Tässä työssä yritykselle kehitettiin uusi mittaasetelma, jota käyttämällä kaikista tulevaisuudessa tehtävistä kuormitusmittauksista saadaan samanlaisia ja näin ollen myös vertailukelpoisia toistensa kanssa.</p> <p>Kuormitusmittaukset suoritettiin kahdessa erilaisessa tilanteessa. Ensimmäisessä tilanteessa tehonsyöttöjärjestelmän lämpötilamittaukset tehtiin tasasuuntaajien syöttäessä kuormaa maksimitehollaan. Toisessa tilanteessa tehonsyöttöjärjestelmän akkuliitintään kytkettiin kaksi järjestelmän ulkopuolista tasasuuntaajaa. Tällä tavalla simuloitiin niin sanottuja epänormaaleja tilanteita, joiden vuoksi AC-sähkönsyöttö on vaillinainen tai kokonaan poikki, ja tehonsyöttöjärjestelmä syöttää kuormaa pelkästään akuista saamallaan teholla.</p> <p>Kuormitusmittausten tavoitteena oli selvittää, pystyykö järjestelmä suoriutumaan suunnitellun kuormavirran syöttämisestä ongelmitta. Mittauksissa havaittiin, että tehonsyöttöjärjestelmä toimi huoneenlämpötilassa normaalisti ja lämpötilat eivät nousseet liian korkeiksi.</p> <p>Työn tuloksena oli se, että yritys pystyy toistamaan suoritettujen kuormitusmittaukset vertailukelpoisina ja mittauksissa todistettiin, että mitattu järjestelmä toimii ongelmitta ainakin huoneen lämpötilassa.</p>	
Avainsanat	tehonsyöttöjärjestelmä, lämpötilatestaus, TPS, mittausta, lämpö, kuormitus, DC, tasasähkö, 48 V

Author Title	Samu Linden Telecom Power System Temperature Measurements
Number of Pages Date	43 pages + 4 appendices 8 September 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructors	Tero Toikka, Development Manager Eero Kupila, Senior Lecturer
<p>The purpose of this thesis was to perform temperature measurements for a telecom power supply system and to create a new and as straightforward as possible measurement setup for all telecom power supply systems for Delta Energy Systems (Finland) Ltd.</p> <p>This study examines the technology of telecom power supply systems on general level and it also aims to clarify facts to which attention should be paid upon selecting an optimum rectifier system.</p> <p>In the company temperature measurements had been done to other systems previously, but there was no clear and uniform instructions to perform them. During this study new measuring setup was created. By using it for all upcoming temperature measurements, the results will always be equal and thus comparable between different systems.</p> <p>The temperature measurements were performed in two different scenarios. In the first scenario the temperature measurements were done for the system when it was supplying full load with internal rectifiers. In the second scenario two external rectifiers were connected to the battery input of the system in order to simulate a situation of abnormal conditions, where AC mains is incomplete or totally disconnected and the system is supplying the load only with battery power.</p> <p>The objective of the temperature measurements was to examine if the system is able to supply the expected load current without problems. During the measurements, it was found out that the system operated at the room temperature normally and the temperature did not rise too high.</p> <p>As result of the thesis, in the future the company will be able to perform the temperature measurements correspondingly and the measured system is safe to use at the room temperature.</p>	
Keywords	telecom power supply system, TPS, temperature, measuring, measurement, temperature design, DC, direct current, 48 V

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Tietoliikennetekniikan tehonsyöttöjärjestelmät	2
2.1	Telecom Power System	2
2.2	Järjestelmäkuvaus	3
2.3	HV DC -järjestelmät	4
2.4	Tehonsyöttöjärjestelmien vaatimukset	5
2.4.1	Järjestelmien maadoittaminen	5
2.4.2	Vaikeat olosuhteet	6
2.4.3	ETSI EN 300 132-2 -standardi	6
2.4.4	Power Factor Correction -menetelmä	7
3	Lämpösuunnittelu	9
3.1	Lämpötila	9
3.2	Lämmönsiirtyminen	9
3.2.1	Lämmönjohtuminen	9
3.2.2	Konvektio	10
3.2.3	Lämpösäteily	10
3.3	Jäähdytysmenetelmiä	10
3.3.1	Tuuletinavusteinen jäähdytys	11
3.3.2	Lämmönvaihdin	11
3.4	Järjestelmän lämpösuunnittelu	12
3.5	Ympäristön lämpösuunnittelu	13
4	Sopivan tehonsyöttöjärjestelmän valinta	14
4.1	Tehonsyöttöjärjestelmän runko	15
4.2	Jäähdytysratkaisut	15
4.3	Sijoitusympäristö	16

4.4	Syöttöjännite	16
4.5	Tehotiheys	17
4.6	Järjestelmän valvoja	17
4.7	Kontaktorit	17
4.8	Tietoliikenneteollisuuden akustot	18
4.8.1	Akustojen historiaa	18
4.8.2	Akuston mitoitus	19
5	Kuormitusmittauksiin soveltuvat mittalaitteet	21
5.1	Hioki LR8400-20 -graafinen mittalaite	21
5.2	MccDAQ USB-2408 -tiedonkeruumoduuli	22
5.3	National Instruments CompactDAQ -mittauskokonaisuus	22
5.4	Termoparit	22
5.5	LabVIEW-ohjelmointisovellus	23
6	Mittausasetelma	24
6.1	Mittauskokoontapano	24
6.1.1	National Instruments FP-1601 + FP-TC-120 -mittauskokoontapano	24
6.1.2	Mittausohjelma	24
6.1.3	Fluke Ti125 -lämpökamera	25
6.2	Mittauspisteiden määrittäminen	25
6.3	Tulosten kirjaaminen	28
7	Kuormitusmittaukset	29
7.1	Mitattu tehonsyöttöjärjestelmä	29
7.1.1	Järjestelmän runko	30
7.1.2	Tasasuuntaajat	30
7.1.3	ORION-valvoja	31
7.1.4	LVD-kontaktori	31
7.1.5	Sisääntulot ja ulostulot	31
7.2	Mittaus suunnitelma	32
7.3	Mittauskuvaus	33
7.3.1	Maksimikuormavirta ja ylikuormitus	33
7.3.2	Mittaus skenaario 1	33
7.3.3	Mittaus skenaario 2	37
8	Yhteenveto	40
	Lähteet	42

Liitteet

Liite 1. Mittausohjelma

Liite 2. Mittausskenaarioiden kaapelointikuvat

Liite 3. Mittausskenaarion 1 mittaustulokset

Liite 4. Mittausskenaarion 2 mittaustulokset

1 Johdanto

Tämä insinööriyö on tehty Delta Energy Systems (Finland) Oy:n järjestelmäsuunnitteluosastolla. Suomen järjestelmäsuunnitteluosasto suunnittelee tehonsyöttöjärjestelmiä, joita käytetään esimerkiksi puhelinoperaattoreiden datakeskuksissa tarjoamaan tietoliikennelaitteistoille sopivaa tasasähköä. Yrityksellä on toimipisteitä ympäri Eurooppaa. Suomen järjestelmäsuunnittelu tekee tiiviisti yhteistyötä Slovakian ja Puolan toimipisteiden kanssa. Delta Energy Systems (Finland) Oy on osa suurempaa kansainvälistä Delta Electronicsia. Delta Electronics on maailman suurin hakkurivirtalähteiden ja harjattomien DC-tuulettimien toimittaja.

Maailma digitalisoituu kiihtyvällä tahdilla Aasian tullessa entistä voimakkaammin mukaan markkinoille. Digitalisointiin tarvitaan datakeskuksia, jotka tarvitsevat toimiakseen tasasähköä. Tämän vuoksi uusille ja entistä energiatehokkaammille ratkaisuille löytyy kysyntää.

Tämä insinööriyö käsittelee tehonsyöttöjärjestelmiä yleisellä tasolla ja pyrkii selvittämään, mihin oikeanlaista järjestelmää valittaessa tulisi kiinnittää huomiota. Työssä käydään läpi järjestelmille asetettuja vaatimuksia ja perehdytään myös järjestelmien lämpösuunnitteluun.

Insinööriyön osana on myös Delta Energy Systems (Finland) Oy:ssä suunnitellun, äskettäin julkaistun, CellID 300 -tuoteperheeseen kuuluvan tehonsyöttöjärjestelmän kuormitusmittaukset. Mittauksissa pyritään toteamaan, että järjestelmä pysyy toimintakuntoisena myös silloin, kun AC-syöttöön tulee vika. Näissä tapauksissa järjestelmän varmistuksena toimivan akuston ja sen liitännän tulee kestää koko järjestelmän suunniteltu kuormavirta. Tehonsyöttöjärjestelmän toiminta testataan myös ylikuormitustilanteessa.

Kuormitusmittausten lisäksi työssä suunnitellaan yrityksen käyttöön mittausasetelma, jonka avulla pystyttäisiin standardisoimaan mittaukset ja näin tuloksista saataisiin aina keskenään vertailukelpoisia.

2 Tietoliikennetekniikan tehonsyöttöjärjestelmät

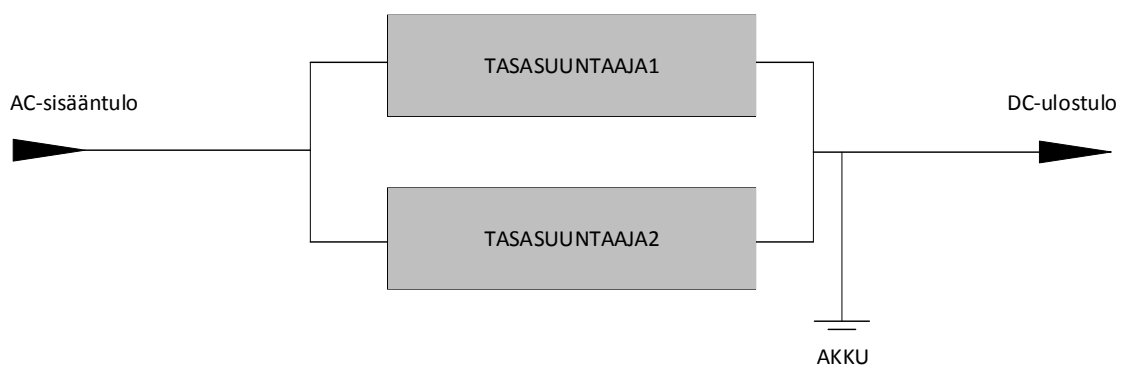
2.1 Telecom Power System

Telecom Power System eli TPS on telekommunikaatioteollisuuteen tarkoitettu tehonsyöttöjärjestelmä, joka karkeistetusti muuntaa verkosta tulevan vaihtosähkön 24 V:n, 48 V:n, 60 V:n, 220 V:n tai 400 V:n tasasähköksi.

Tehonsyöttöjärjestelmiä hyödyntävät muun muassa teleoperaattorit. Reitittimien ja muiden tietoliikennelaitteiden määrän lisääntyminen kasvattaa järjestelmien tarvetta. Tyypillisiä sijoituspaikkoja järjestelmille ovat palvelinkeskuksat. New York Times -lehden artikkelin [1] mukaan esimerkiksi Googlen kokonaiskulutus vuonna 2011 oli 260 000 kWh, joka vastaa neljännessosaa ydinvoimalan tuottamasta tehosta. Käyttösovelluksia on myös maanpäällisillä satelliittiasemilla ja radiomastoilla.

Teknologian kehittyessä tehonsyöttöjärjestelmiltä vaaditaan entistä enemmän tehoa yhä pienemmässä paketissa ratkaisujen pysyessä kuitenkin riittävän yksinkertaisina ja toimintavarmoina.

Kuvassa 1 nähdään tehonsyöttöjärjestelmä yksinkertaisessa muodossa. Järjestelmän tasasuuntaajilla on kaksi eri tehtävää. Ne syöttävät ulostuloon kytkettyä kuormaa ja samanaikaisesti niissä pitää riittää tehoa akuston lataamiseen, jotta järjestelmä pysyy käyttökunnossa myös sähkökatkoksien tai muiden AC-puolen vikatilanteiden aikana.



Kuva 1. Tehonsyöttöjärjestelmän periaatekuva

2.2 Järjestelmäkuvaus

Tehonsyöttöjärjestelmät ovat usein modulaarisia järjestelmiä. Modulaarisuudella tarkoitetaan sitä, että järjestelmä on helposti muokattavissa moduuleja lisäämällä tai vaihtamalla.

Tehonsyöttöjärjestelmiä on monenlaisia. Yksi yleinen tyyppi on 19":n laitekaappiin sopiva *räkkikoon* järjestelmä. Räkkikokoiset järjestelmät ovat järjestelmiä, jotka on suunniteltu asennettavaksi erilliseen kaappiin. Samassa kaapissa voi olla muita erillisiä järjestelmiä ja joskus kaappien alaosaan on sijoitettu akusto.

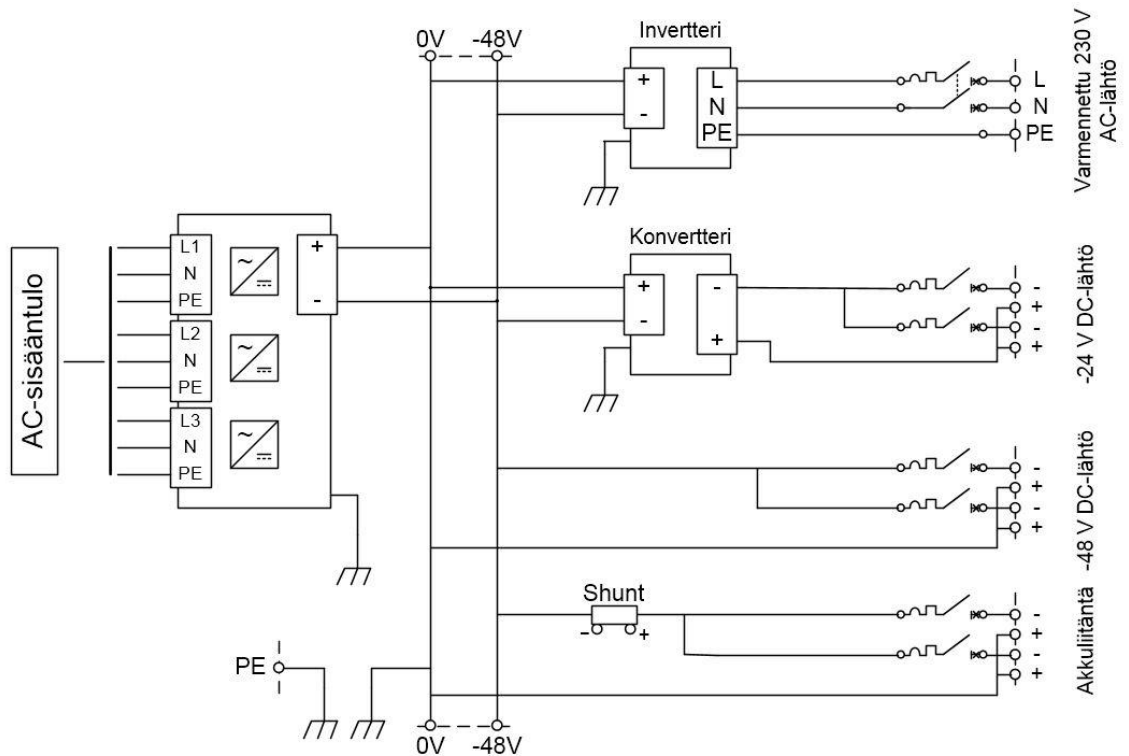
Isot järjestelmät koostuvat joko yhdestä tai useasta laitekaapista. Suurimmat järjestelmät voivat sisältää kymmeniä eri laitekaappeja ja tyyppillisesti jokaista kaappia voidaan ajatella yksittäisenä järjestelmän osana. Ne voidaan jaotella esimerkiksi neljään eri tyyppiin: tasasuuntaajakaappi, jakelukaappi, invertterikaappi ja akkuliitántäkaappi. Kaappien välinen tehonsiirto toteutetaan kaappien taakse sijoitettavilla kuparikiskoilla.

Pääpiirteittäin tasasuuntaajakaapissa on tasasuuntaajien lisäksi pääkatkaisijat ja vaihtosähkösyöttö. Akkuliitántäkaapissa on akkusulakkeet ja akkuliitántä. Joissain tapauksissa akut voidaan sijoittaa samaan kaappiin. Sijoittelu riippuu akkujen määrästä ja niiden vaatimasta fyysisestä tilasta. Akkujen tapauksessa on tärkeää ottaa huomioon ympäristön oikea lämpötila, koska se vaikuttaa ratkaisevasti akun elinkaaren pituuteen. Jakelukaapissa on jakelusulakkeet.

Kaapistoista on monia eri variaatioita ja niitä kaikkia on vaikea listata. Niistä voi löytyä lisäksi esimerkiksi varmennettuja vaihtosähkölähtöjä. Näissä järjestelmissä verkon vaihtosähkö tasasuunnataan kuten normaalistikin, mutta järjestelmä sisältää myös inverttereitä, joilla vaihtosuunnataan tasasähkö takaisin vaihtosähköksi. Näin saadaan hyödynnettyä AC-ulostulossa järjestelmän akkuja ja tämän vuoksi sitä kutsutaan varmennetuksi AC-lähdöksi. Inverttereitä sisältävä järjestelmä vastaa toiminnaltaan UPS-järjestelmää (*Uninterruptible Power Supply*).

Joissain tapauksissa vaihtoehtoisille tasajännitteille voi olla tarvetta. Näissä tapauksissa järjestelmään pitää sisällyttää konverteri, joka muuntaa jännitteen halutulle tasolle. Yleinen muunnos on -48 V:sta -24 V:iin.

Kuvassa 2 esitetään invertterin ja konvertterin sisältävän tehonsyöttöjärjestelmän toiminta:



Kuva 2. Invertterin ja konvertterin sisältävä järjestelmä

2.3 HV DC -järjestelmät

High voltage DC -järjestelmät, eli suurjännitetasavirtajärjestelmät ovat tulevaisuutta. Suurjännitteellä tarkoitetaan tyypillisesti yli 1 000 V:n AC-jännitettä, mutta tässä tapauksessa sillä viitataan tasavirtajärjestelmiin, joiden jännite on 380 V - 400 V. Niillä saadaan 48 V:n järjestelmään nähden huomattavaa etua tehotehdydessä, koska kupariosat voidaan tehdä pienemmiksi. Sähköjakelu aloitettiin tasasähköjärjestelmillä, mutta vaihtosähköjärjestelmien kehitys alkoi jo tehonsiirtojärjestelmien alkuvaiheessa. Vaihtosähköjakelujärjestelmiin verrattuna HV DC -järjestelmä on edullisempi vaihtoehto suurien tehomäärien siirtämiseen pitkällä matkalla. [2, s. 4 - 5; 3, s. 1 - 6.]

2.4 Tehonsyöttöjärjestelmien vaatimukset

Tehonsyöttöjärjestelmän perusvaatimuksena on, että se pystyy syöttämään tehoa kriittisille kuormille katkoitta. Katkottomuus toteutetaan liittämällä järjestelmään tasasuuntaajien lisäksi akusto. Järjestelmien odotetaan olevan turvallisia ja sen vuoksi 48 V:n jännitettä alettiin käyttämään 60 V:n jännitteen sijasta. Matala jännitteinen järjestelmä on turvallisempi kosketukselle. Järjestelmien odotetaan toimivan ilman ihmisen valvontaa, ja niissä on yleensä valvojayksikkö, joka valvoo järjestelmän eri virtoja, mittaa lämpötiloja ja ohjaa tasasuuntaajia.

Tehonsyöttöjärjestelmille voidaan odottaa suurin piirtein 20 - 30 vuoden käyttöikää. Käyttöikätaivoitteeseen päästään yksinkertaisilla suunnitteluratkaisuilla ja säännöllisillä huoltotoimenpiteillä. Säännöllisiin huoltotoimenpiteisiin kuuluu esimerkiksi valvojan lokitiedostojen läpikäyminen, tasasuuntaajien toiminnan varmistaminen ja laitetilän lämpötilan, kosteuden ja pölytilanteen tarkastaminen. Kaikkien eri komponenttien ja kaapeleiden visuaalinen tarkistaminen ja pölyn poistaminen on myös tärkeätä. Valvojissa on yleensä sisäänrakennettu diagnostiikkatyökalu, jolla järjestelmän oikeanlainen toiminta on hyvä varmistaa säännöllisin väliajoin. [4, s. 49; 5, s. 428 - 429.]

2.4.1 Järjestelmien maadoittaminen

Tehonsyöttöjärjestelmät ovat aina maadoitettuja. Tyypillisesti ne ovat positiivisesti maadoitettuja. Plussan maadoittamisen vuoksi jännite ilmaistaan negatiivisena, ja yleinen tehonsyöttöjärjestelmän jännite on -48 V.

Alunperin järjestelmiä alettiin maadoittamaan plussan puolelta, koska järjestelmistä peräisin oleva vuotovirta aiheutti galvaanista korroosiota maahanasennetuissa lyijyvaippakaapeleissa ja metalliputkissa. Lyijyvaippakaapeleita ei enää käytetä, mutta positiivista maadoitusta käytetään yhä olemassa olevien kaapeleiden ja metalliputkien suojaamiseksi.

Metalliatomit luovuttavat normaalisti elektroneita helposti ja siitä johtuen muodostavat helposti positiivisesti varautuneita ioneita eli kationeita. Korrosio johtuu siitä, että positiivinen jännite työntää johtimessa olevia kationeita pois päin. Negatiivisella

jännittellä negatiiviset ionit eli anionit taas vetävät kationeja voimakkaasti puoleensa. Tätä kutsutaan ionisidokseksi, ja se ehkäisee korroosiota. [5, s. 17; 6, s. 27 - 29.]

2.4.2 Vaikeat olosuhteet

Joissain tapauksissa tehonsyöttöjärjestelmien tulee olla toimintakykyisiä myös vaikeissa olosuhteissa. Ympäristön liikkeet, kuten värinä ja muu heilunta asettavat järjestelmille omat vaatimuksensa. Maanjäristysaltille alueelle tehonsyöttöjärjestelmiä suunniteltaessa on otettava huomioon eri asioita kuin järjestelmälle, joka sijoitetaan seismisesti rauhalliseen paikkaan.

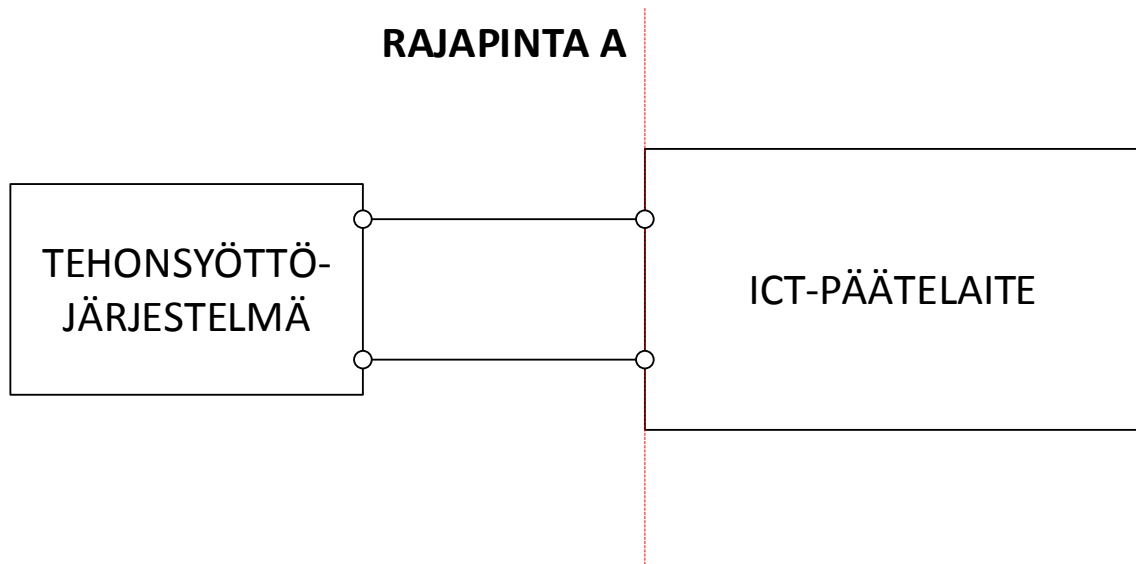
Ulos tarkoitetuissa laitteissa eräs merkittävä huomioon otettava seikka on ilmankosteus. Ilmankosteus ei saa olla liian korkea, joten ulkokaappijärjestelmissä on otettava huomioon riittävä tuuletus ja mahdollisesti myös ilmankuivaus. Liian korkea ilmankosteus aiheuttaa korroosiota ja nostaa oikosulkuriskiä. Liian kuivaa ilma ei kuitenkaan saa olla, koska tällöin elektrostaattisten ominaisuuksien aiheuttamat ongelmat nousevat esiin.

Aavikko-olosuhteisiin sijoitettavissa järjestelmissä ilmansuodatus on kriittisessä asemassa. Lika järjestelmän sisällä aiheuttaa kulumista ja ennen aikaista vikaantumista. [7, s. 203 - 204.]

2.4.3 ETSI EN 300 132-2 -standardi

ICT-laitteiden tehonsyöttöjärjestelmien suunnittelussa noudatetaan mm. ETSI EN 300-132-2 -standardia. Standardin tavoite on helpottaa erilaisten kuormien toimintaa yhdessä. Se pyrkii siihen, että tehonsyöttöjärjestelmät ja sille tarkoitetut päätelaitteet olisivat yhteensopivia.

Standardi määrittää esimerkiksi millaista rajapintaan A (kuva 3, ks. seur. s.) tehoa syöttävän tehonsyöttöjärjestelmän ulostulon pitää olla, kuten myös sen millaista tehoa rajapintaan A kytkettävän sisääntulon pitää kestää. Standardi koskee tasasähköä.



Kuva 3. Rajapinta A

ETSI EN 300 132-2 -standardin [8, s. 9 - 10.] mukaan $-48 V_{DC:n}$ järjestelmästä puhuttaessa rajapinnassa A jännitteen tulee olla $-40,5 V_{DC:n}$ ja $-57,0 V_{DC:n}$ välillä. Laitteen toimintakyky ei saa heikentyä, jos jännite pysyy edellä mainitun välin sisällä.

Tehonsyöttöjärjestelmä tai sen päätelaitteet eivät myöskään saa vikaantua $0,0 V_{DC:n}$ - $-40,5 V_{DC:n}$ tai $-57 V_{DC:n}$ - $-60,0 V_{DC:n}$ jännitteillä. Näitä jännitealueita kutsutaan epänormaaleiksi jännitealueiksi. Jännitteen palaututtua normaalille tasolle, myös rajapintaan A kytkettyjen kuormien pitää palautua normaaliin toimintatilaansa.

2.4.4 Power Factor Correction -menetelmä

Tehokertoimella tarkoitetaan pätötehon suhdetta näennäistehoon. Sillä mitataan laitteen tehokkuutta. Systemi, jolla on matala tehokerroin kuormittaa jakeluverkkoa enemmän kuin systemi, jonka tehokerroin on korkea. Tämä johtuu verkkoon palautettavasta loistehosta, jonka systemi varaa induktansseihin ja kapasitansseihin. Induktansseista ja kapasitansseista johtuen systeemin ottama näennäisteho kasvaa, mikä vaikuttaa suoraan häviöihin.

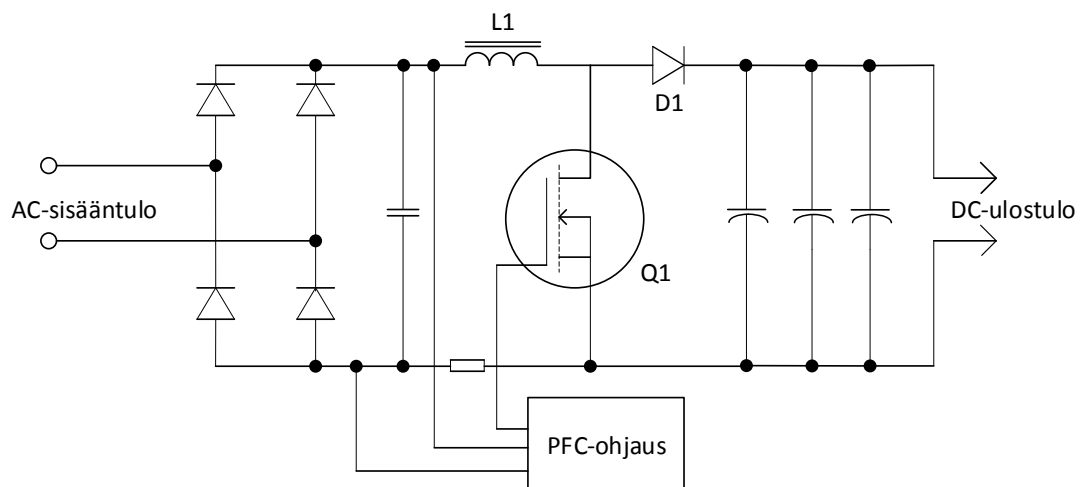
Yksinkertaisilla tasasuuntaajilla, esimerkiksi hakkuriteholähteellä on huono tehokerroin. Tämän vuoksi on kehitetty menetelmiä tehokertoimen parantamiseksi. Näitä

menetelmiä kutsutaan tehokertoimen korjaukseksi (*Power Factor Correction*) eli PFC:ksi.

Tehokertoimen korjaus on tarpeellinen tasasuuntaajasovelluksissa, koska tasasuuntaajien verkosta ottama teho on epälineaarista. Epälineaarisuudella tässä tapauksessa tarkoitetaan sitä, että tasasuuntaajan ottama virta ei ole siniaallon muotoista. Siniaallosta poikkeava virran aaltomuoto aiheuttaa verkkoon harmonisia yliaaltoja, kohinaa ja häviöitä.

Tehokertoimen korjauksella tarkoitetaan tietynlaista diodilla, transistorilla ja kelalla varustettua kytkentää, joka korjaa tasasuuntaajan tehokertoimen mahdollisimman korkeaksi. Tehokertoimen maksimi arvo on 1 ja mitä lähempänä maksimiarvoa se on, sitä resistiivisempi kuorma on.

Kuvassa 4 esitetään toimintaperiaatteen selkeyttämiseksi hyvin yksinkertaistettu versio tavanomaisesta aktiivisella tehokertoimella varustetusta hakkuriteholähteen kytkennästä:



Kuva 4. Yksinkertaistettu aktiivisen tehokertoimen kytkentä

Tehokertoimenkorjaus koostuu kelasta L1, diodista D1, transistorista Q1 ja PFC-ohjausyksiköstä. Kytkentä toimii siten, että transistorin Q1 vaihtelutaajuus asetetaan verkon taajuutta huomattavasti korkeammaksi. Tämä johtaa siihen, että kun Q1 on johtavassa tilassa, kytkentä lataa kelaa L1, mutta virta ei pääse kulkemaan diodille D1. Kun Q1 ei johda, puretaan kelan L1 energia diodin D1 läpi kondensaattoreille. Koska

Q1 vaihtelutaajuus on huomattavasti verkon taajuutta korkeampi, ehditään kela L1 lataamaan ja purkamaan useita kertoja yhden jakson aikana. Tällä tavoin kytkentä ottaa virtaa verkosta tasaisemmin ja tehokerroin paranee.

EN61000-3-2- ja IEC61000-3-12-standardit määrittävät, kuinka paljon yliaaltoja tasasuuntaajat saavat aiheuttaa verkkoon. [9, s. 4 - 7.]

3 Lämpösuunnittelu

3.1 Lämpötila

Lämpötila on perussuure, jolla kuvataan kappaleen lämpö määrää suhteessa absoluuttiseen nollapisteeseen. Absoluuttisen nollapisteen lämpötila on 0 K. Nykyisin maailmalla on päivittäisessä käytössä kaksi eri lämpötilayksikköä, celsiusasteet ja fahrenheitasteet. Suurimmassa osassa maailmaa lämpötilan yksikkönä käytetään celsiusasteita (°C), mutta Yhdysvalloissa ja joissain Väli-Amerikan maissa käytetään fahrenheitasteita. 0 °C on 273,15 K.

3.2 Lämmönsiirtyminen

Lämmönsiirtyminen tarkoittaa lämpöenergian siirtymistä eri lämpöisten esineiden välillä. Lämpöenergian siirtyminen tarkoittaa nimenomaan lämpimän siirtymistä kylmään. Tämä voidaan todeta yksinkertaisesti esimerkiksi metallisen lusikan avulla. Kylmä lusikka on helppo lämmittää kädellä, mutta kuuma lusikka on huomattavasti hitaampaa jäähdyttää samalla tavalla. Lämmönsiirtymistä on kolmea eri tyyppiä: lämmönjohtuminen, kovektio ja lämpösäteily.

3.2.1 Lämmönjohtuminen

Kappaleiden välinen lämmönjohtuminen vaatii aina kappaleiden välisen fyysisen kontaktin. Lämmönjohtuminen ei välttämättä tarkoita lämmönjohtumista kahden eri kappaleen välillä. Lämpöä johtuu myös kappaleiden sisäisesti, koska niiden sisäiset lämpötilaerot pyrkivät tasoittumaan. Hyvänä perussääntönä voidaan pitää, että tehokkaita lämmönjohtajia ovat kappaleet, joiden sähkönjohtavuusarvo on myös

korkea. Esimerkiksi kuparia käytetään usein lämmönjohtimena jäähdytystarkoituksissa. Lämmönjohtuminen on yleensä paikan ja ajan funktio, mutta erityisesti pienillä lämpötilaeroilla sitä pidetään yleensä vakiona.

Lämmönjohtuminen on hyvin olennainen osa lämpösuunnittelua. Tehonsyöttöjärjestelmissä lämpöä syntyy eri johtavien komponenttien resistanssista. Kuparikiskot siirtävät ja tuottavat lämpöä tehokkaasti. Pitkällä kuparikiskossa saadaan lisättyä järjestelmän liitettävyyttä hyvin ja samalla myös saadaan jaettua kiskon tuottama lämpö tasaisemmin järjestelmään. [10, s. 255 - 256.]

3.2.2 Konvektio

Konvektio on lämpövirran siirtymistä liikkuvassa nesteessä tai kaasussa. Konvektioksi kutsutaan myös lämmönsiirtymistä liikkuvasta nesteestä tai kaasusta kiinteään pintaan. Konvektio toimii periaatteessa samalla tavalla kuin lämmönjohtuminenkin, mutta tässä tapauksessa kaasun ja nesteen mukana siirtyvällä energialla on suurempi merkitys. Esimerkiksi lämpöputkessa virtaavan veden virtausnopeudella ja massalla on olennainen rooli lämmön siirtymisessä. Konvektiota on kahdenlaista: vapaata ja pakotettua. Vapaalla konvektiolla tarkoitetaan sitä, että nesteen tai kaasun liikettä ei tehosteta keinotekoisesti, vaan se aiheutuu aineiden tiheyseroista. Esimerkiksi kylmä ilma on tiheämpää kuin lämmin ilma, ja lämmin ilma pyrkii nousemaan kylmemmän ilman päälle. [10, s. 256 - 258.]

3.2.3 Lämpösäteily

Lämpösäteilyllä tarkoitetaan kahden erilämpöisen kappaleen välisen elektromagneettisten aaltojen vaikutusta. Käytännön esimerkkinä toimii lämpöpatteri. Lämpöpatteri säteilee lämpöä itseään viileämpään ympäristöönsä. Lämpösäteily on aiheuttanut mittausteknisiä ongelmia sähkötekniikassa ja nykyään lämpötilamittarit on varustettu tarvittavilla kompensointiasetuksilla. [10, s. 258 - 259.]

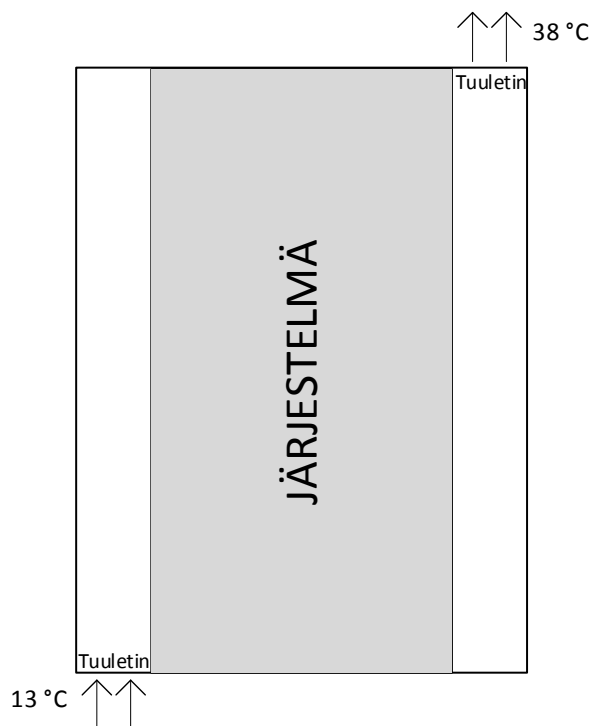
3.3 Jäähdytysmenetelmiä

Tehonsyöttöjärjestelmien komponentit joutuvat suuren tehokuorman vaikutuksen alaiseksi, ja siitä johtuva lämpeneminen joissain tapauksissa vaatii erillisiä

jäähdytysratkaisuja, joita ovat esimerkiksi tuuletinavusteinen jäähdytys ja lämmönvaihtimeen perustuva jäähdytys.

3.3.1 Tuuletinavusteinen jäähdytys

Isommissa kaappijärjestelmissä voi olla käytössä tuulettimiin perustuva jäähdytysjärjestelmä. Tällaisessa järjestelmässä käytetään hyväksi painovoimaa. Tuuletin, joka puhaltaa viileää ilmaa järjestelmään sijoitetaan kaapin pohjaan. Ulosottotuuletin sijoitetaan järjestelmän kattoon vastakkaiselle puolelle kaappia. Kylmä ilma lämpiää kulkiessaan järjestelmän läpi, ja lämmin ilma puhalletaan tuulettimen avulla katosta ulos. Toimintaperiaate on nähtävissä kuvassa 5:

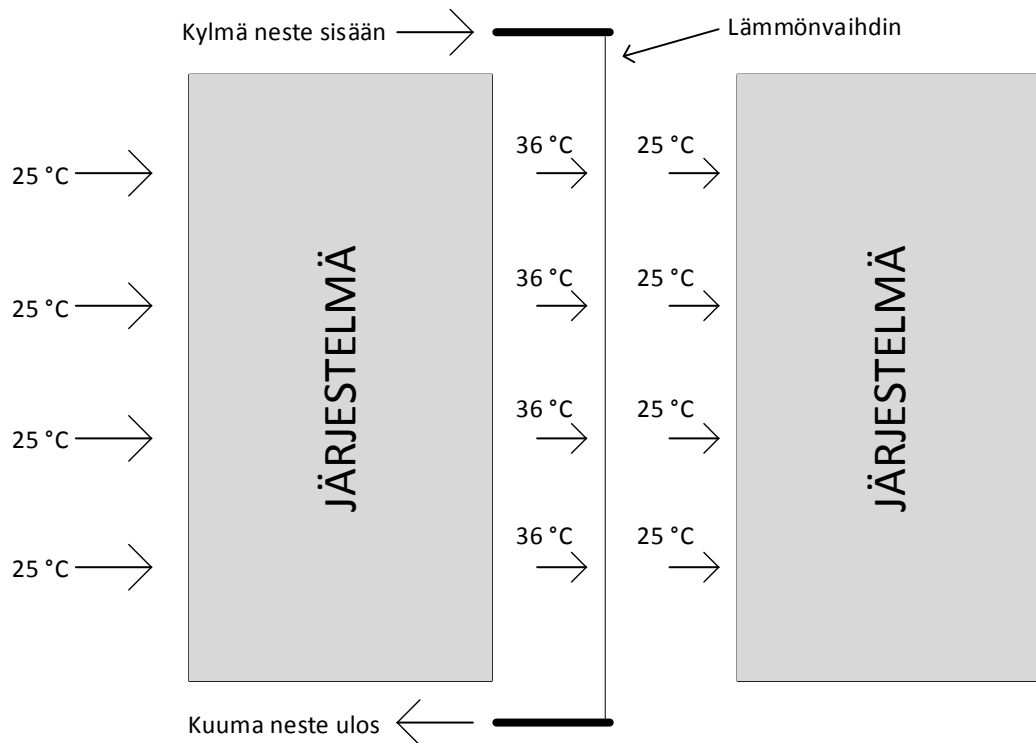


Kuva 5. Tuuletinavusteisen järjestelmän toimintaperiaate

3.3.2 Lämmönvaihdin

Lämmönvaihdinjäähdytysmenetelmä perustuu nestejäähdytykseen. Jäähdytystä tarvitsevien järjestelmien väliin asennetaan putkisto, jossa virtaa viileää vettä tai dielektristä nestettä. Idea on se, että toisen järjestelmän kuuma ulostuloilma puhalletaan putkiston läpi, jotta se viilenee alkuperäiseen lämpötilaansa tai sitä

viileämmäksi. Tarvittaessa järjestelmään voidaan lisätä tuulettimia, jotka tehostavat ilmankiertoa, ja lämmönvaihdin saadaan hyödynnettyä paremmin. Tämän menetelmän hyvä puoli on se, että sen avulla saadaan tehokkaasti viilennettyä ilmaa pienessä tilassa, jossa järjestelmien sijoittelu lämmönhallinnan vuoksi olisi haasteellista. Sitä ei välttämättä tarvitse mitoittaa kokonaiselle järjestelmälle, vaan sen avulla voidaan hoitaa pienempien segmenttien täsmäjähdytys. Toimintaperiaate nähdään kuvassa 6. [11, s. 95 - 100.]



Kuva 6. Lämmönvaihtimen toimintaperiaate

3.4 Järjestelmän lämpösuunnittelu

Yhtenä tärkeänä suunnittelussa huomioon otettavana asiana on tehonsyöttöjärjestelmän lämmöntuotto. Sisätiloihin tulevat 19":n järjestelmät eivät yleensä sisällä tasasuuntaajamoduulien sisältämien tuulettimien lisäksi lainkaan tuulettimia, ja tämän vuoksi on kiinnitettävä erityistä huomiota tuuletusaukkojen sijainteihin ja kokoon, jotta kuuma ilma siirtyy pois kylmän ilman tieltä.

Järjestelmän eniten lämpiävät osat ovat kiskostot, kaapelit ja kontaktorit. Kiskostojen läpi kulkee suuret virrat ja pienikin resistanssi aiheuttaa lämpötilan nousemisen.

Kiskoston lämpötilan nouseminen vuorostaan nostaa resistanssia ja tehoa kuluu häviöihin vieläkin enemmän. Kaikkien kiskostoihin liitettävien liittimien tulee olla kunnolla kiristettyjä resistanssin minimoimiseksi.

Tehonsyöttöjärjestelmät on usein mitoitettu toimimaan $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$:n - $65\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötiloissa. Puhuttaessa toiminnasta kylmissä lämpötiloissa, tarkoitetaan yleensä lämpötilaa, jossa laitteen pitää pystyä käynnistymään normaalisti sen jälkeen, kun se on ollut pitkään käyttämättömänä. Järjestelmä joka tapauksessa lämmittää itsensä suhteellisen nopeasti käynnistyksen jälkeen. Lämpenemisen nopeus riippuu virtojen suuruudesta. Kylmään tilaan suunnitellussa järjestelmässä luonnollisesti jäähtytykseen ei tarvitse kiinnittää niin paljon huomiota, ja konvektiojäähtytyksen koko on pienempi. Mahdollisesti tasasuuntaajat eivät tarvitse jäähtytystä lainkaan.

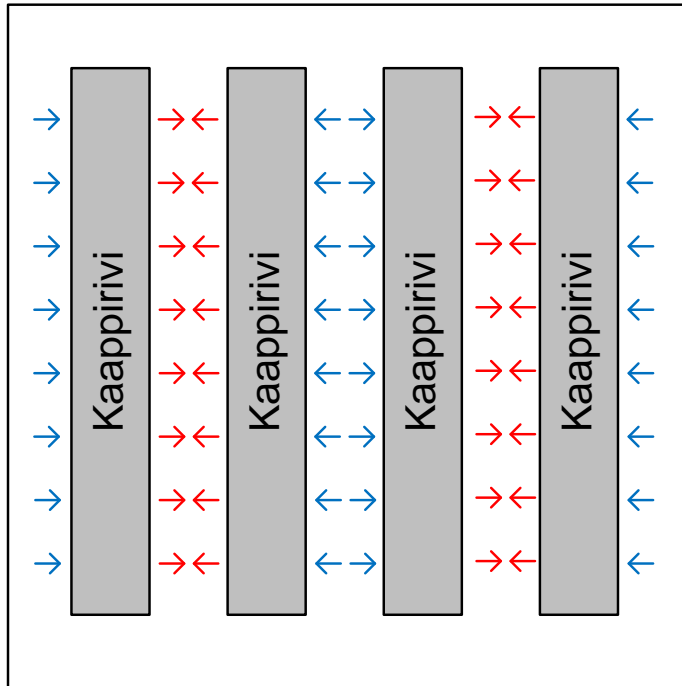
Kuumissa lämpötiloissa toimivien järjestelmien suunnittelussa jäähtyttäminen on yksi kriittinen osa laitteen toimintaa. Tasasuuntaajat lämmitessään rajoittavat tehoaan hyvinkin nopeasti, ja ympäristön lämpötilan noustessa $40\text{ }^{\circ}\text{C}$:n yläpuolelle, voi syöttöteho olla jo rajoitettua. Tasasuuntaajat lämmitessään joko rajoittavat tehoaan tai lopulta sammuvat kokonaan, mutta akuston syöttämään virtaan lämpötila ei vaikuta. Jos tehonsyöttöjärjestelmän kaikki tasasuuntaajat sammuvat ja kaikki kuormavirta tulee akulta, aiheutuu akuston kiskostoon kytkevään kontaktoriin kuormavirran suuruinen virta, ja sen lämpötila voi nousta vaarallisen korkeaksi. [7, s. 203 - 204; 12, s. 41 - 45; 13, s. 53 - 55.]

3.5 Ympäristön lämpösuunnittelu

Tehonsyöttöjärjestelmän sijoituspaikkana on yleensä puhelinkeskus tai joku muu konesali. Konesalien suunnittelussa tulee ottaa huomioon useita eri asioita. Konesalissa voi olla useita kaappeja ja jokaisen lämpökuorma voi olla erilainen. Kaappirivistöt asetellaan riveihin siten, että lämpökuorma jakautuu saliin mahdollisimman tasaisesti. Koska jokainen laite tarvitsee viileää ilmaa, rivitetään konesali niin, että joka toinen rivi on kylmä ja joka toinen kuuma. Käytännössä siis rivien takapuolelta ovat aina vastakkain, koska tyypillisesti laitteiden kuuma tuuletusilma oltetaan ulos laitteen takapaneelin kautta.

Salin ilmankiertoa voidaan parantaa hyvin asetelluilla tuulettimilla. Tehokkaalla ilmankierroilla laitekaappien läpi tehosiheyttä saadaan nostettua, koska kaappien

komponentteja kriittisimpiä pisteitä lukuunottamatta ei tarvitse jäähdyttää erikseen. Esimerkiksi tehonsyöttöjärjestelmien tasasuuntaajissa yksi tärkeä tekijä on sen tehotiheys. Jos erillisestä jäähdyttimestä päästään eroon, saadaan tehotiheyttä nostettua hyödyntämällä vapaaksi jäänyt tila. Kuvassa 7 esitettävän hyvin suunnitellun konesalin pohjapiirroksesta kaappien asettelu hahmottuu paremmin. [14, s. 22 - 23]



Kuva 7. Konesalin kaappirivien asettelu

Konesalit paineistetaan hieman muuta ympäristöä korkeampi paineisiksi, jotta pölyä ja muita epäpuhtauksia ei pääse laitteistojen ilmankiertoon. Ilmankosteus on myös otettava huomioon. Liian kostea ilma voi aiheuttaa muun muassa oikosulkuja ja korroosiota. Liian kuiva ilma taas voi aiheuttaa elektrostaattisia purkauksia, joka pahimmassa tapauksessa voi vaurioittaa sähkölaitteita. [15, s. 21 - 24]

4 Sopivan tehonsyöttöjärjestelmän valinta

Tehonsyöttöjärjestelmissä tasasuuntaajilla on kaksi tehtävää. Niiden tulee kyetä syöttämään riittävä määrä tehoa kuormaan ja samanaikaisesti niissä täytyy riittää tehoa akustojen lataamiseen. Ulostulovirran tulee siis olla ainakin yhtä suuri kuin akuston latausvirta ja kuormavirta summattuna yhteen. Järjestelmät ovat usein redundanttisia, jolloin ne periaatteessa ylimitoitetaan, jos ajatellaan pelkästään riittävää

kuormavirran syöttöä. Ylimääräisellä redundanttisuuden takaavalla tasasuuntaajalla voidaan tarvittaessa syöttää akustoon latausvirtaa tai jakaa kuormavirtaa useammalle laitteelle.

Tasasuuntaajaa valittaessa tärkeitä seikkoja ovat muun muassa jäähdytyksen, syöttöjännitevälin, ulostulovirran ja operointilämpötilan pohtiminen. Usein järjestelmät on suunniteltu modulaarisiksi eli niitä on helppo laajentaa ja kustomoida jälkikäteen lisäämällä tai vaihtamalla moduuleja.

4.1 Tehonsyöttöjärjestelmän runko

Rungon korkeus määritetään joissain tapauksissa U-mitalla. Yksi U on korkeudeltaan 1,75", eli 44,45 mm. U on tehonsyöttöjärjestelmäteknikassa yleisesti käytetty mittayksikkö laitteiden korkeudelle. Yksi järjestelmän etupaneeliin tuleva moduuli on 1 U:n korkuinen. Korkeudet on standardisoitu näin, jotta laitekaappeihin tulevat järjestelmät sopisivat aina fyysisesti yhteen.

4.2 Jäähdytysratkaisut

Tasasuuntaajia jäähdytetään yleensä tuulettimilla, mutta konvektioon perustuvia jäähdytysjärjestelmiä on myös markkinoilla. Tuuletinjäähdytteiset tasasuuntaajat ovat alttiimpia vioille ja niitä pitää puhdistaa enemmän. Joissain tapauksissa tuulettimien aiheuttama melu voi olla lopullisen valinnan ratkaiseva seikka. Tuuletinjäähdytteisten tasasuuntaajien MTBF-arvo (*Mean Time Between Failure*) on lyhyempi. Mitä pienempi MTBF-arvo laitteella on, sitä useammin siihen tulee vikoja. Käytännössä se ei kuitenkaan ole merkittävä ongelma, koska tuulettimet vikaantuvat niin harvoin, että niitä ei välttämättä suunnitella vaihdettavaksi. Tuuletinjäähdytteisessä järjestelmässä on kuitenkin hyvätkin puolensa. Se on taloudellinen ja mahtuu pienempää tilaan. [16.]

Konvektiojäähdytteisessä tasasuuntaajassa ilma-aukkojen ja komponenttien sijoittelu on huomattavasti isommassa roolissa kuin tuuletinjäähdytteisessä järjestelmässä. Kuumia pisteitä ei myöskään voida välttää. Huonosti suunniteltu konvektiojäähdytteinen järjestelmä on paljon epäluotettavampi kuin hyvin suunniteltu tuuletinjäähdytteinen järjestelmä. Nykyisten saatavilla olevien valvojien avulla voidaan valvoa tarkasti jäähdytysjärjestelmien toimintaa ja vikatilanteen vakavuus voidaan

minimoida nopealla huoltoaikataululla. Tuuletin- ja konvektiojäähdytteisiä järjestelmiä löytyy myös yhdistettynä, mutta sen tarjoama tehokas jäähdytys täytyy toteuttaa tehokkuuden kustannuksella, koska konvektiojäähdytin ja tuuletin yhdessä vaativat paljon tilaa.

Tuulettimia voidaan käyttää myös vain tehostamaan konvektiojäähdytteisen järjestelmän jäähdytystehoa. Esimerkkinä voidaan käyttää redundanttista N+1 järjestelmää, jossa N kuvaa kuorman vaatiman virran syöttämiseen vaadittujen tasasuuntaajien määrää, ja 1 kuvaa ylimääräistä järjestelmän redundanttisuuden takaavaa tasasuuntaajaa.

Otetaan esimerkkinä viiden tasasuuntaajan järjestelmän ja oletetaan, että yhden tasasuuntaajan jäähdytys takaa riittävän jäähdytyksen 50 A:n syöttämiseen ja maksimikuorma on 200 A. Neljällä tasasuuntaajalla pystytään syöttämään koko maksimikuorma, mutta koska tehonsyöttöjärjestelmä sisältää redundanttisuuden luovan tasasuuntaajan, yhdelle tasasuuntaajalle jää syötettävää virtaa 40 A. Tässä tilanteessa pelkkä konvektiojäähdytys riittää takaamaan tehokkaan jäähdytyksen. Vasta siinä vaiheessa, kun akustoa tarvitsee ladata samaan aikaan maksimikuorman kanssa, tuuletinjäähdytys tulee käyttöön. Tämän menetelmän ansiosta järjestelmän elinikä kasvaa ja tuulettimien elinikäongelma on huomattavasti pienempi. [7, s. 200 - 201.]

4.3 Sijoitusympäristö

Valintaan vaikuttaa myös sijoitusympäristö. Huomioon otettavista seikoista tärkeimpinä lämpötila ja kosteus. Eri tasasuuntaajat on mitoitettu eri lämpötiloille ja liian kuuma ympäristö vaikuttaa nopeasti tasasuuntaajan suorituskykyyn. On myös eri asia valita tasasuuntaajia järjestelmään, joka tulee puhtaaseen ja laitteiden elinkaarten maksimointiin suunniteltuun konesaliin kuin järjestelmään, joka tulee aavikko-olosuhteisiin päiväntasaajalle. Pölyisessä ympäristössä myös ilmansuodatuksella on suuri merkitys järjestelmän elinkaarta ajatellen.

4.4 Syöttöjännite

Jakeluverkon jännitetaso on oltava tiedossa ennen järjestelmän valintaa. Euroopassa käytetään yleisesti 400 V:n / 230 V:n tähtiverkkoa. Ensimmäisellä arvolla tarkoitetaan

pääjännitettä ja toisella vaihejännitettä. Yhdysvalloissa on käytössä kaksi eri jännitetasoa: 480 V / 277 V ja 208 V / 120 V. Nykään tasasuuntaajat suunnitellaan usein toimimaan kaikilla kansainvälisillä jännitteillä, mutta tämä johtaa siihen, että lopputulos ei aina ole välttämättä optimaalinen.

Maailmalla käytössä olevat eri jännitetasot ovat johtaneet tehokerroinkorjattujen järjestelmien yleistymiseen ja kehitykseen. Pienet sisääntulojännitteet aiheuttavat huomattavasti suuria jännitteitä isommat häviöt. Universaali useilla eri jännitteillä toimiva tasasuuntaaja on myös kalliimpi ja kookkaampi. [7, s. 201 - 202; 17.]

4.5 Tehotiheys

Valintaa tehdessä on pidettävä mielessä myös tasasuuntaajien tehotiheys. Tehotiheydellä tarkoitetaan tehon suhdetta tilavuuteen. Tehonsyöttöjärjestelmissä tilaa on usein rajoitetusti, joten suuren tehon on oltava pienessä paketissa. Erityisesti vaadittavan jäähdytyksen koko vaikuttaa tehotiheyteen.

4.6 Järjestelmän valvoja

Yksi pohdittava osa-alue on valvojan valinta. Valvojat tarjoavat monenlaisia ominaisuuksia järjestelmään ja järjestelmän halutun toiminnan takaamiseksi on syytä pohtia, mitä kaikkia ominaisuuksia tarvitaan. Nykyiset valvojat tarjoavat nettiselaimessa toimivan käyttöliittymän, jonka avulla konfigurointi voidaan tehdä etänä.

Valvojat sisältävät lukuisia eri mittaus- ja ohjaustoimintoja. Yksi tärkeimmistä valvojan mittaustehtävistä on akuston ja kuormien virtamittaus. Valvoja seuraa myös kaikkia järjestelmän sisäisiä hälytyksiä ja ilmoittaa, jos esimerkiksi jokin jakelusulakkeista laukeaa. Valvoja käsittelee myös kaikki tasasuuntaajilta tulleet hälytykset ja sen käyttäytyminen eri vikatilanteissa on konfiguroitavissa.

4.7 Kontaktorit

Tehonsyöttöjärjestelmät sisältävät yleensä kontaktoreita. Yleisin käytetty kontaktori kulkee nimellä LVD (*Low Voltage Disconnect*). LVD-kontaktori on akuston järjestelmästä erottava kontaktori. Sen tehtävä on erottaa akusto järjestelmästä silloin,

kun akuston jännite tippuu liian alhaiseksi. Tämä estää akuston syväpurkauksen, joka johtaa sen eliniän radikaaliin lyhentymiseen. 48 V:n järjestelmistä puhutuessa LVD:n laukaisuraja-arvo on yleensä 42 V.

Järjestelmässä voi olla myös kuorman erottava kontaktori tai pelkästään osakuorman erottava kontaktori. Osakuorman erottava kontaktori laukeaa jännitteen aletessa riittävästi, mutta laukaisuraja-arvo on kuitenkin korkeampi kuin LVD-kontaktorilla. Osakuormaan kuuluu kaikki vähemmän kriittiset osat kuormasta. Esimerkiksi GPRS-yhteys tai jokin muu lisäominaisuus, joka ei vaikuta järjestelmän toimintaan, voi olla osa kontaktorin takana olevaa osakuormaa. Osakuormakontaktorin avaukseen voidaan käyttää laskeneen jännitteen lisäksi myös aikaa.

4.8 Tietoliikenneteollisuuden akustot

4.8.1 Akustojen historiaa

Tietoliikenneteollisuudessa on ollut käytössä erityyppisiä akkuja. Ensimmäiset käytössä olleet akut olivat perinteisiä lyijyakkuja. Erilaisten lyijyakkujen käyttö jatkui pitkälle 1900-luvun loppupuoliskolle ja erityisesti 1950-luvulla käyttöön otetut lyijykalsiumakut olivat aluksi ongelmallisia. 10 - 20 vuoden testaamisen jälkeen akkuja alettiin ymmärtämään paremmin ja niistä saatiin luotettavia.

Nykyään tietoliikenneteollisuudessa käytetään useinmiten kahdentyypisiä lyijyakkuja; VLA- (*vented lead-acid*) ja VRLA-akkuja (*valve-regulated lead-acid*). Akkujen nimet viittaavat niiden tapaan poistaa kemiallisista reaktioista aiheutuneet kaasut akusta. VLA-akuista käytetään myös termejä *flooded* ja *wet cell*. VLA-akusta kaasut pääsevät purkautumaan vapaasti, kun taas VRLA-akussa ulos pääseviä kaasuja rajoitetaan.

VRLA-akkujen kehitystyö aiempien lyijyakkujen tapaan oli aikaa vaativa prosessi ja vasta 1990-luvulla niitä alettiin ymmärtämään paremmin. VRLA-akut ovat monilta osin perinteisiä lyijyakkuja parempia. Tärkein etu niihin nähden on mahdollisuus kierrättää vaillinaisesti ladattuja akkuja. Niitä ei siis tarvitse käyttää kerralla täydestä tyhjäksi, vaan niitä voidaan purkaa puoliksi ja ladata uudestaan ilman, että akun suorituskyky kärsii. VRLA-akut ovat myöskin täysin umpinaisia, joten niiden sisältämä happo ei voi läikkyä. Ne päästävät ulos hyvin vähän kaasua normaaleissa olosuhteissa, mutta

ylilatauksen tapahtuessa ulos pääsevän kaasun määrä kasvaa. VRLA-akkujen huono puoli on akun sisällä tapahtuvat toissijaiset reaktiot, joista muodostuu vetyä, hapetta ja korroosiota.

VRLA-akut voidaan asentaa lähes mihin paikkaan ja asentoon tahansa. Ne eivät sisällä räjähtäviä nesteitä ja tiiveytensä vuoksi ne eivät vuoda. Ne ovat myös verrattain huoltovapaita, eikä niihin tarvitse lisätä vettä. VRLA-akut ovat myös suhteellisen edullisia.

Akut tulisi sijoittaa paikkaan jossa, ympäristön lämpötila on 20 °C - 25 °C. Akun elinikä laskee huomattavasti, jos akku on sijoitettu vähänkään korkeampaan lämpötilaan. Jo 5 °C korkeampi lämpötila pudottaa akun kapasiteettia 30 % vuodessa. 25 °C korkeampi lämpötila aiheuttaa 83 % pudotuksen. Konesaleissa akut on normaalisti sijoitettu kokonaan toiseen huoneeseen lämpöherkkyytensä vuoksi. [4, s. 52; 18, s. 47-52; 19.]

4.8.2 Akuston mitoitus

TPS-järjestelmissä akuston tehtävänä on toimia energiavarastona, jota käytetään vikatilanteissa. Niiltä vaaditaan korkeaa kapasiteettia ja energiatiheyttä. Lämmönsietokyky on myös tärkeää, minkä vuoksi akut usein sijoitetaan pois muiden laitteiden lämpövaikutusalueelta.

Akun kapasiteetti ilmoitetaan ampeeritunteina (Ah). Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, että esimerkiksi 200 Ah:n akku pystyisi syöttämään 200 A yhden tunnin ajan. Akkujen datalehtiin on yleensä kirjoitettu monta eri kapasiteettiarvoa. Kapasiteettiarvot vaihtelevat akun purkunopeuden mukaan. Jos akku puretaan nopeasti, sen kapasiteettiarvo on matalampi kuin hitaasti purkamalla.

Kapasiteettiarvoja on yleensä tarkennettu purkunopeusmerkinnöillä, esimerkiksi 200 Ah (C_{10}) @ 20 °C to 1,8 V_{pc} . Merkinnällä tarkoitetaan, että akusta voidaan purkaa 20 A kymmenen tunnin ajan 20 °C lämpötilassa kennokohtaisen jännitteen laskiessa 1,8 V:iin. Datalehdissä on usein ilmoitettu akun kapasiteettiarvo myös 100 tunnin aikana purettuna (C_{100}). Tietoliikennejärjestelmien akustoilta vaaditaan yleensä isoa tehoa suhteellisen lyhyellä ajalla. Vikatilanteen sattuessa tilanne pyritään korjaamaan muutaman tunnin sisällä ja tällaisessa tilanteessa datalehden C_{100} -merkintä ei ole olennainen.

Akustoa mitoittaessa täytyy pitää mielessä, että akun nimellisjännite, esimerkiksi 48 V on eri asia kuin latausjännite. Latausjännite pitää tarkistaa aina tapauskohtaisesti, koska liian alhainen tai liian korkea latausjännite rikkoo akun. VRLA-akulla latausjännite voi olla esimerkiksi $2,27 V_{pc}$, jolla ilmaistaan akuston solukohtaista jännitettä.

Akuston mitoitus perustuu jännitteeseen, kuorman vaatimaan tehoon ja siihen, kuinka kauan akuston halutaan olevan kykenevä syöttämään kuormateho vikatilanteen aikana. Tarkin tapa on mitoittaa akusto tehon perusteella. Virran perusteella voi tehdä nopeita arvioita, mutta tarkka mitoitus on parempi tehdä wattiarvoilla.

Valitaan esimerkkijärjestelmäksi yhden 2 900 W tasasuuntaajan järjestelmä ja mitoitetaan sille akusto, joka pystyy syöttämään vaaditun tehon kolmen tunnin katkon ajan. Järjestelmän minimijännite on 43 V. Oletetaan, että järjestelmän akusto koostuu 24:stä 2 V:n solusta, eli minimijännitetilanteessa akuston solukohtainen jännite U_{pc} on $1,79 V_{pc}$.

Akuston karkea mitoitus voidaan laskea kaavalla 1.

$$C = t_{back-up} \cdot \frac{P}{U}, \text{ missä} \quad (1)$$

$t_{back-up}$ = akuston toiminta-aika

C = Akun kapasiteetti

P = järjestelmän teho

U = järjestelmän jännite.

Kaavan 1 mukaan esimerkkijärjestelmän akuston kapasiteetin tulisi olla

$$C = 3 h \cdot \frac{2900 W}{48 V} = 181,25 Ah.$$

Karkean mitoituksen perusteella akustoksi voitaisiin valita esimerkiksi kaksi 100 Ah akustoa, jotka kytkettäisiin rinnan. Molempien akustojen on siis kyettävä syöttämään 1 450 W tehoa kolmen tunnin ajan. Yksi akusto koostuu 24 solusta, mistä saadaan solukohtaiseksi tehoksi 60,4 W.

Akkuvalmistajilta on saatavilla *Constant Power Discharge* -taulukkoita, joissa akustot on listattu solukohtaisen tehon, minimijännitteen ja toiminta-ajan perusteella. Tässä tapauksessa käytettäisiin solukohtaisena tehona 60,4 W:a, minimijännitteenä 1,79 V_{pc}:a ja toiminta-aikana 3 tuntia, ja valittaisiin akustot näiden perusteella. [20.]

5 Kuormitusmittauksiin soveltuvat mittalaitteet

Markkinoilla on runsaasti lämpötilojen mittaamiseen soveltuvia mittalaitteita. Niiden hintataso vaihtelee muutamasta sadasta eurosta aina useampaan tuhanteen euroon. Perussääntönä voidaan pitää, että mitä monipuolisempi ja laajennettävämpi laite on kyseessä, sitä enemmän se maksaa.

Mittalaitteessa on hyvä olla mahdollisimman paljon kanavia, jotta se soveltuu mahdollisimman monenlaisten järjestelmien mittaamiseen. Kuormitusmittauksia tehdään niin pieniin kuin suuriinkin järjestelmiin. Yleensä riittää, että mittalaite pystyy tallentamaan kanavien signaalin muutaman minuutin välein, koska järjestelmien lämpötilojen muuttuminen ei ole kovin nopeaa.

On olemassa mittalaitteita, jotka piirtävät omalle näytölleen reaaliaikaisesti kuvaajaa kanavien lämpötiloista. Jotkin mittalaitteet taas saattavat tarvita erillisen tietokone-ohjelman tietojen taltioimiseen.

5.1 Hioki LR8400-20 -graafinen mittalaite

Hiokin mittalaitteen ominaisuuksiin kuuluu 30 termopareja ja normaaleja jännitteitä mittaavaa kanavaa. Laite kykenee erottelemaan lämpötilamittauksissa 0,01 °C. Suuri kanavamäärä tekee myös mittausasetelman muokattavuuden helpoksi, koska isojen järjestelmien mittauksiin tarvitaan helposti yli 20:kin kanavaa. Laitteen hyviin puoliin kuuluu se, että se sisältää pienen näytön, josta pystyy seuraamaan mittaustuloksia käyrämuodossa ilman erillisiä apuvälineitä kuten tietokonetta. Tiedot tallentuvat automaattisesti SD-muistikortille myöhempää käsittelyä varten tai tarvittaessa ne saadaan reaaliajassa myös tietokoneelle laitteen omaan ohjelmistoon tarkasteltaviksi. [21.]

5.2 MccDAQ USB-2408 -tiedonkeruumoduuli

MccDAQ tarjoaa 2408 mallinumeroa kantavaa DAQ-tyyppiä olevaa mittalaitetta. DAQ eli *data acquisition* tarkoittaa tiedonkeruuta. Laite sinäänsä ei tee muuta kuin ottaa mittatiedot talteen ja siirtää ne tietokoneelle laitteen mukana tulevaan TracerDAQ-ohjelmistoon USB-väylän kautta. TracerDAQ ohjelmistona ei ole kovin monipuolinen, mutta silläkin saa kuitenkin mittaustulokset talteen ja tarvittaessa generoituja yksinkertaisia signaaleja. DAQ-laitteessa on 16 termopari- tai jännitekanavaa. [22.]

5.3 National Instruments CompactDAQ -mittauskokonaisuus

National Instrumentsin CompactDAQ on näistä monipuolisin mittausjärjestelmä, koska sen ohjelmiston avulla mittalaitetta voidaan soveltaa useisiin eri tarkoituksiin. CompactDAQ-runkoon käyttäjä voi valita tarvitsemansa moduulit. Halvimpaan versioon mahtuu neljä erillistä moduulia. Moduuleilla voi mitata muun muassa virtaa, jännitettä, termopareja, kosteutta ja resistanssia. Järjestelmän ohjelmisto on LabVIEW-niminen graafinen ohjelmointisovellus (ks. 5.5). [23.]

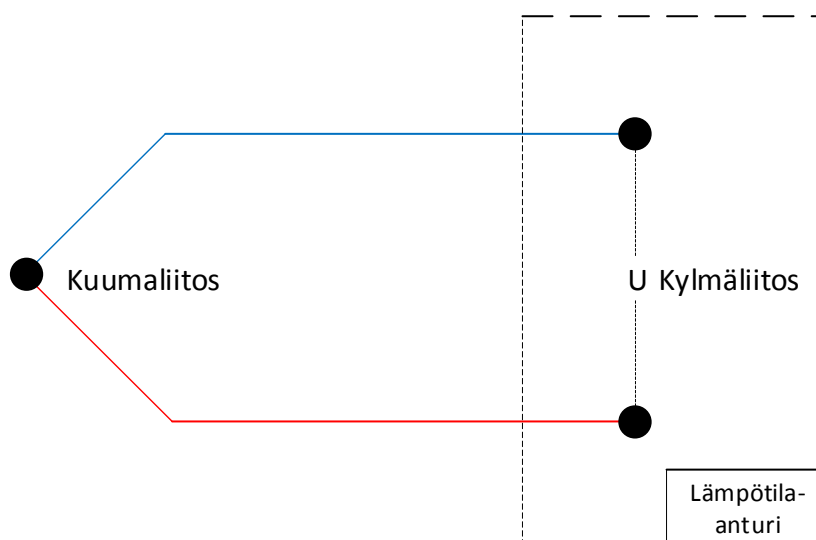
5.4 Termoparit

Lämpötilojen mittaus perustuu usein termopareista mitattuun jännitteeseen. Termopari koostuu kahdesta eriaineisesta johtimesta, jotka reagoivat lämpötilaan tulemalla jännitteellisiksi. Termoparien lämpötila voidaan mitata mittaamalla niihin muodostunut jännite.

Termopareista puhuttaessa käytetään termejä kuumaliitos ja kylmäliitos (*hot junction*, *cold junction*). Kylmäliitoksella tarkoitetaan liitosta, joka on mittalaitteen päässä. Termi voi olla harhaanjohtava, jos mittaushkohteen lämpötila on todellisuudessa kylmempi kuin mittalaitteen lämpötila, mutta joka tapauksessa kylmästä liitoksesta puhuttaessa tarkoitetaan aina mittalaitteen päässä olevaa liitosta.

Termoparien välinen jännite U (kuva 8) mitataan kylmäliitoksen päässä termoparien välistä. Mittaustulos on kuitenkin suhteellinen kylmäliitoksen lämpötilaan. Jotta saataisiin tietää kuumaliitoksen absoluuttinen lämpötila, täytyy mittalaitteessa käyttää kylmäliitokskompensointia (*cold junction compensation*). Käytännössä tämä tarkoittaa

sitä, että kylmäliitoksen lämpötila mitataan erikseen omalla lämpötila-anturillaan. Tämä lämpötila summataan kuumaliitoksesta mitattuun lämpötilaan ja näin saadaan mittapisteen absoluuttinen lämpötila. Toimintaperiaate esitetään kuvassa 8:



Kuva 8. Kylmäliitoskompensointi

Termopareja on 10 eri tyyppiä: B, R, S, T, C, M, K, E, J ja N. Eri tyypit eroavat toisistaan monin tavoin. Usein soveltuva termopari valitaan herkkyyden ja lämpötila-alueen perusteella. B-, R- ja S-tyypin termopareilla on matala herkkyys ja siten myös heikko erottelukyky. Käytännössä ne siis reagoivat pieniin lämpötilamuutoksiin huonommin. [24, s. 3 - 8; 25; 26]

5.5 LabVIEW-ohjelmointisovellus

LabVIEW on National Instrumentsin kehittämä graafinen ohjelmointisovellus. Sillä voi tuottaa mittaus- ja hallintaohjelmistoja valmiiksi ohjelmoiduista ohjelmablokeista. Graafinen käyttöliittymä mahdollistaa monimutkaistenkin ohjelmistojen esittämisen selkeämmässä muodossa.

LabVIEW'illä voidaan esimerkiksi suunnitella ohjelma, joka ottaa lämpötila-, jännite- ja virtasignaalit sisään, tulostaa niistä graafit ja vie tiedot erilliseen Excel-tiedostoon. Ohjelmistoon on myös mahdollista laittaa seurantapaneeleita reaaliaikaista seurantaa varten. Suunnitellusta ohjelmasta saa käännettyä mille tahansa Windows-koneelle asentuvan .exe-tiedoston, eikä LabVIEW-ohjelmistoa tarvitse asentaa jokaiselle mittauksia tekeväälle käyttäjälle.

6 Mittausasetelma

Mittausasetelman järjestäminen toimintakuntoon ei ollut helppo tehtävä. Laitteisto oli ollut käyttämättömänä noin vuoden ajan ja se oli vanha. FieldPoint FP-1601:n ja sen moduulien, neljän FP-TC-120:n saaminen toimintakuntoon Windows 7:ssä oli hankalaa, koska suoraa laitetukea ei löytynyt ja uusimmat ajurit olivat suunniteltu Windows XP:lle. Mittaustulosten tallentamiseen käytettävä ohjelmointiohjelmisto LabVIEW`n versio oli 7.1 vuodelta 2004. Sillekin virallinen tuki löytyi ainoastaan Windows XP:lle asti. Laitteiston nykyaikaistaminen olisi näistä seikoista johtuen ajankohtaista.

6.1 Mittauskokoontaminen

6.1.1 National Instruments FP-1601 + FP-TC-120 -mittauskokoontaminen

Insinööriyön mittalaitteena toimii National Instrumentsin FP-1601, jossa on kiinni neljä FP-TC-120-termoparimoduulia (*thermocouple input module*). Moduuleissa on yhteensä 32 kanavaa, eli käytännössä sillä voidaan mitata 32 pisteen lämpötilaa samanaikaisesti. Mittausjärjestelmä on noin 10 vuotta vanha, mutta tässä tarkoituksessa se ajaa vielä asiansa riittävän hyvin. Laite tukee kahdeksaa termoparityyppiä: J, K, R, S, T, N, E ja B. Tämä kyseinen laite oli varustettu K-tyypin termopareilla.

6.1.2 Mittausohjelma

Termoparien lämpötilamittausten tallentamiseen luotiin LabVIEW 7.1 -ohjelmointisovelluksella mittausohjelma. Mittausohjelman vaatimukset oli, että sillä pystyisi mittaamaan kahden tunnin aikajakson tallentaen 16 termoparin mittausdatan viiden minuutin välein erilliseen tiedostoon. Mittausohjelmalla piti myös pystyä seuraamaan lämpötiloja reaaliajassa käyrämuodossa.

Liitteessä 1 (s. 1) esitetään mittausohjelman kuvaajanäytöt. Kuvaajien arvo päivittyy näyttöihin viiden minuutin välein välitöntä lämpötilatarkkailua varten.

Liitteessä 1 (s. 2) nähdään mittausohjelman graafinen koodi. Module 1 ja Module 2 kuvaavat FP-TC-120-moduuleja. Näistä lähtevät signaalit on jaettu kuvaajanäytöille

(*Waveform Chart*) ja yhdistäjään, jonka avulla signaalit syötetään tiedostonkirjoittajaan (*Write LabVIEW Measurement File*). tiedostonkirjoittaja tallentaa signaalit Exceliin jokaisella silmukkakierrolla. Mittausohjelman luomasta Excel-tiedostosta mittaustulokset saa nopeasti kopioitua tässä työssä kehitettyyn mittauspöytäkirjaan (ks. 6.3).

Kuvassa näkyvä harmaa laatikko on silmukka, joka vastaa C#-kielen While-silmukkaa. Se siis toimii niin, että silmukan sisälle ohjelmoidut tapahtumat toistuvat uudestaan ja uudestaan, kunnes sille erikseen annetaan lopetuskäsky. Kuvan vasemmassa alalaidassa näkyvä kello määrittää jokaiselle silmukkakierrolle 300 000 ms viivästyksen. 300 000 ms on viisi minuuttia.

6.1.3 Fluke Ti125 -lämpökamera

Fluke Ti125 on kannettava lämpökamera ja sitä käytetään tässä insinööriyössä tehonsyöttöjärjestelmän kuumimpien pisteiden paikantamiseen, jotta termoparit saadaan sijoitettua mahdollisimman optimaalisille paikoille.

Kaikki kohteet säteilevät infrapunaenergiaa, mutta eri pintojen emissiokyky on erilainen. Pinnat, joilla on korkea emissiokyky säteilevät infrapunaenergiaa tehokkaasti ja näistä pinnoista laite osaa laskea lämpötilan hyvinkin tarkasti. Maalatuilla metallipinnoilla emissiokyky on >90 %, mutta maalaamattomilla se on <60 %. Tällaisten pintojen lämpötilan laskemiseen emissiokyvylle tarvitaan tietty korjauskerroin, ja sen avulla lämpötila saadaan yleensä laskettua tarkasti. Tulokset eivät kuitenkaan ole yhtä luotettavia kuin pinnoilla, joilla on korkea emissiokyky. Esimerkiksi seuraavilla pinnoilla on korkea emissiokyky: maalattu metalli, puu, vesi, iho ja kangas. [27, s. 15 – 16]

6.2 Mittauspisteiden määrittäminen

Mittauspisteiden määrittämisessä käytettiin apuna Fluke Ti125 -lämpökameraa. Tässä vaiheessa tehonsyöttöjärjestelmä (ks. 7.1) kytkettiin kuorman ilman kattoa. Järjestelmä alkaa lämmitä aika nopeasti kuorman kytkemisen jälkeen, ja lämpökameralla näkee kätevästi kuumat pisteet. Kovin tarkasti sillä ei kuitenkaan pysty mittapisteitä määrittämään, koska kuumia pisteitä on useita, ja jokainen niistä säteilee

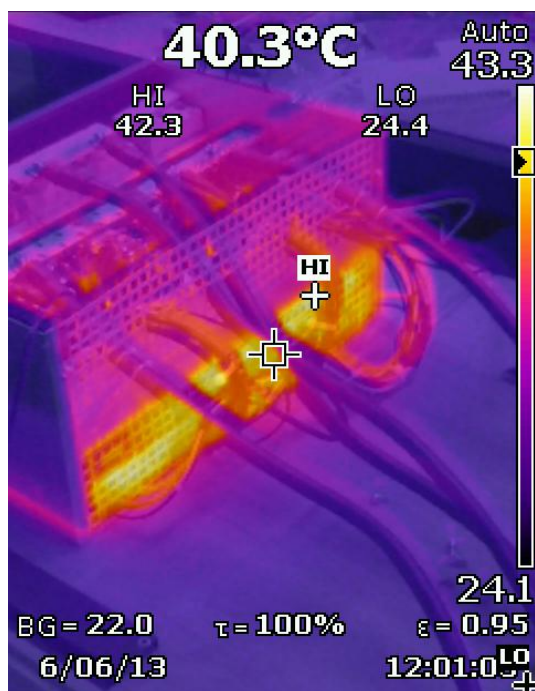
lämpöä ympäristöönsä. Lämpökameralla kuumimmat kohdat voidaan määrittää parin cm:n tarkkuudella.

Antureiden paikkojen määrittämisessä käytettiin apuna myös aiempaa mittausdataa, joka sopii hyvin myös tämän järjestelmän mittaamiseen. Ainoastaan yhden anturin paikka muutettiin lämpökamerakuvauksen jälkeen. Aiemmissa mittauksissa jakelusulakkeiden päälle oli määritetty yksi mittauspiste, mutta lämpökamerakuvauksessa kävi ilmi, että jakelusulakkeiden kuumin piste oli niiden sivuosassa. Tämä nähdään kuvassa 9:



Kuva 9. Lämpökamerakuva tehonsyöttöjärjestelmästä: vasemmassa reunassa näkyy jakelu- ja akkusulakkeet ja jakelusulakkeiden reuna hohtaa oranssina.

Kuvassa 10 (ks. seur. s.) esitetään järjestelmä takaa kuvattuna. Alas sijoitettujen tasasuuntaajien ulostuloilman lämpötilaero huoneilmaan verrattuna näkyy selvästi, ja ulostuloilma lämpenee varsin nopeasti. Kuva on otettu kaksi minuuttia järjestelmän käynnistämisen jälkeen.



Kuva 10. Tasasuuntaajien ulostuloilma

Lämpökamerakuviin, vanhaan mittausdataan ja maalaisjärjenkäyttöön perustuen saatiin aikaiseksi kaksi erillistä mittauspistevariaatiota, yksi molemmille mittausskenaariolle (ks. 7.2).

Molemmissa mittausskenaarioissa mitattiin 16 eri pistettä. Mittausskenaarion 1 mittauspisteet olivat taulukon 1 ja 2. mukaiset. Plus- ja miinuskiskojen mittauspisteillä tarkoitetaan sitä pistettä, johon tasasuuntaajien kaapelit on kytketty.

Taulukko 1. Mittausskenaarion 1 mittauspisteet / moduuli 1

Kanavanumero	Mittauspiste / moduuli 1
1.00	Katto (sisäpinta)
1.01	Etupaneeli
1.02	Valvoja (etupaneeli)
1.03	Tasasuuntaajan sisäänottoilma
1.04	Jakelusulakkeet (etupaneeli)
1.05	Akkusulakkeet (etupaneeli)
1.06	Jakelusulakkeet (sivu)
1.07	Miinuskuormakaapeli

Taulukko 2. Mittausskenaarion 1 mittauspisteet / moduuli 2

Kanavanumero	Mittauspiste / moduuli 2
2.00	Pluskisko
2.01	Miinus kisko
2.02	AC-kaapelit
2.03	LVD
2.04	Akkusyöttö
2.05	Tasasuuntaajahylly
2.06	Valvojyksikkö (päältä)
2.07	Ympäristön lämpötila

Mittausskenaarion 2 mittauspisteet haluttiin pitää niin samanlaisina kuin mahdollista, jotta jatkossa mittaukset voitaisiin toteuttaa mahdollisimman identtisesti. Ainoat muutokset mittausskenaariossa 2 mittauspisteiden osalta oli se, että pluskiskon termopari vaihdettiin järjestelmän ulkopuolisten tasasuuntaajien kaapeleiden liitoskohtiin ja tasasuuntaajien ulostuloilmaa mitannut termopari siirrettiin mittaamaan akkusisääntulon kuparin lämpötilaa. Mittausskenaariossa 2 tehonsyöttöjärjestelmän omia tasasuuntaajia ei kuormitettu lainkaan, joten niiden ulostuloilmalle ei ollut tarpeellista varata omaa mittauskanavaa.

Näillä muutoksilla mittausasetelma pysyy vielä yksinkertaisena ja se on riittävä oleellisten lämpötilatietojen keräämiseen. Esimerkiksi myöskään AC-kaapeleiden mittausta ei olisi mittausskenaariossa 2 tarvittu lainkaan, mutta todettiin, että mittauspisteitä ei kannattanut muuttaa enempää, koska kaikilla kriittisillä pisteillä oli jo anturit.

6.3 Tulosten kirjaaminen

Tuloksia varten kehitettiin mittauspöytäkirjaksi Excel-taulukko, johon tulokset pystyy syöttämään mahdollisimman nopeasti ja vaivattomasti. Tavoitteena oli, että mittauspöytäkirjaa voitaisiin käyttää mahdollisimman monipuolisesti myös muiden järjestelmien mittaamiseen ja että mittaustulokset saataisiin dokumentoitua aina samaa kaavaa noudattaen. Tämä mahdollistaa eri järjestelmistä tuotettujen mittausten helpon

vertailun toistensa välillä. Yhtenäisten mittaustulosten avulla on myös helppo analysoida erilaisten suunnitteluratkaisujen termisiä vaikutuksia.

Järjestelmien lämpötilamittauksia on helpointa analysoida käyrämuodossa. Mittauspöytäkirja luo sinne syötetyistä mittaustuloksista automaattisesti kuvaajat erilliseen koordinaatistoon. Koordinaatistossa on yksinkertaiset säätömahdollisuudet lämpötilojen ylä- ja alarajoille, jotta eri lämpötiloissa tehtyjen mittausten kuvaajien skaalaa pystyy helposti säätämään. Skaalautuvuudesta on paljon hyötyä siinä vaiheessa, kun kahden eri järjestelmän kuvaajat halutaan skaalata samanlaisiksi, jotta tuloksien erot käyvät paremmin ilmi.

Lämpötilamittausten mittauspöytäkirjaan syötettiin myös kuormavirta, tasasuuntaajien virta, järjestelmän teho ja -jännite, mutta niistä ei luotu kuvaajia. Nämä arvot ovat käytännössä vakioita koko mittausten ajan, mutta ongelmatilanteen sattuessa pienetkin vaihtelut on hyvä kirjata ylös.

7 Kuormitusmittaukset

7.1 Mitattu tehonsyöttöjärjestelmä

Mitattu järjestelmä (kuva 11) oli CelID 300 -tuoteperheeseen kuuluva laite, joka sisältää viisi 2900 W 1-vaiheista tasasuuntaajaa. Laitteen suunniteltu kuormavirta on 250 A.



Kuva 11. Mitattu tehonsyöttöjärjestelmä

7.1.1 Järjestelmän runko

Mitattu järjestelmä oli 19” rakkikoon laite ja sen korkeus oli 4 U. Yksi järjestelmän etupaneeliin tuleva moduuli on 1 U:n korkuinen. Runko on valmistettu ohutmetallilevystä. Se koostuu oikeastaan kahdesta sivulevystä ja kahdesta eri pohjalevystä, joiden väliin muodostuu paikat kuudelle moduulille.

Sivulevyt on tuettu toisiinsa kuparikiskolla, joka toimii samalla järjestelmän nollapotentiaalina. Sivulevyjä tukee myös DIN-kisko, johon asennetaan automaattisulakkeet, joita tässä tapauksessa asennettiin kolme akulle ja kahdeksan jakelulle. Järjestelmän takaosaan on asennettu erillinen kisko, johon järjestelmään tulevat ja sieltä lähtevät kaapelit saadaan kiinnitettyä nippusiteillä.

7.1.2 Tasasuuntaajat

Mitatussa järjestelmässä käytettiin viittä 2900 W:n tasasuuntaajaa. Jokainen tasasuuntaaja tarvitsee toimiakseen vaihtösähköpuolelta vaiheen (L), nollan (N) ja suojamaan (PE). Koska luku 5 ei ole kolmella jaollinen, verkosta tulevia vaihteita ei saada kuormitettua symmetrisesti.

Tasasuuntaajat on mitoitettu toimimaan 75 °C:n ympäristön lämpötilassa. Niiden sisääntulojännite on 90 V - 300 V, eli kyseessä universaalilla sisääntulolla varustettu malli (ks. 4.4).

Yhden tasasuuntaajan fyysiset mitat ovat

- korkeus 1 U (ks. 4.1)
- leveys 125,5 mm
- syvyys 269,9 mm.

Normaaliin 19”-n runkoon niitä mahtuu siis vierekkäin kolme. Mitatussa järjestelmässä niitä oli kahdessa tasossa yhteensä viisi. Toisella rivillä kahden tasasuuntaajan lisäksi sijaitsi valvoja.

7.1.3 ORION-valvoja

Valvojana toimi Deltan ORION-valvoja. ORIONia käytetään kaikenlaisissa järjestelmissä sen laajennettavuuden ja hyvän lisälaittevalikoiman vuoksi. Valvojaan on mahdollista ottaa etäyhteys Internet-selaimella, mikä helpottaa hälytyksien seuraamista ja parantaa konfigurointimahdollisuuksia. Mittauksissa sillä myös kirjattiin ylös kuormavirran, tasasuuntaajien virran, järjestelmän jännitteen ja järjestelmän tehon arvot viiden minuutin välein.

7.1.4 LVD-kontaktori

Mitattu järjestelmä oli varustettu yhdellä 250 A:n LVD-kontaktorilla (*low voltage disconnect*). Vikatilanteessa koko järjestelmän syöttämä virta kulkee kontaktorin läpi, joten tämän järjestelmän tapauksessa sen on kestävä vähintään 250 A:n virta. Mittauksissa (ks. 7.3.3) sen kautta kuitenkin syötettiin 280 A ongelmitta.

7.1.5 Sisääntulot ja ulostulot

Järjestelmän AC-sisääntulo toteutettiin yhdellä 3-vaiheisella kaapelilla, jonka johtimet ovat poikkipinta-alaltaan 2,5 mm². Järjestelmässä on viisi tasasuuntaajaa, joten vaihejako ei mene tasan ja kuorma ei ole symmetrinen. Kahdella vaiheella on kaksi tasasuuntaajaa ja yhdellä yksi.

Jakeluna tässä järjestelmässä käytettiin kahdeksaa C-käyrällistä 63 A:n Naderin valmistamaa jakelusulaketta. C-käyrällä tarkoitetaan hidasta laukaisua ja sitä käytetään esimerkiksi moottoreiden automaattisulakkeena, koska moottoreilla on korkea käynnistysvirta. Näissä mittauksissa käytettiin kuitenkin vain seitsemän jakelusulaketta.

Akkuliitintään käytettiin kolmea C-käyrällistä 125 A:n Naderin valmistamaa akkusulaketta.

7.2 Mittaussuunnitelma

Mittauksissa mitataan tehonsyöttöjärjestelmää kahden eri mittausskenaarion osalta. Molempien mittausskenaarioiden kaapeloinnit on kuvailtu liitteessä 2.

Mittausskenaariossa 1 järjestelmän omat tasasuuntaajat syöttävät kuormaliitäntöjä.

Mittausskenaariossa 2 virta syötetään järjestelmän ulkopuolisilla tasasuuntaajilla sisään akkuliitännöistä, joiden kautta se ohjataan kuormaliitännöille.

Mittausskenaariossa 1 kokeillaan, toimiiko järjestelmän tasasuuntaajat vakaasti täydellä kuormalla normaalissa huoneenlämmössä, ja miten korkeita lämpötiloja järjestelmässä esiintyy.

mittausskenaario 1 mitataan kaksi kertaa. Ensimmäisellä kerralla tasasuuntaajista syötetään niin paljon tehoa kuin mahdollista, ennen kuin virranrajoitin alkaa rajoittaa järjestelmää. Toisella kerralla syötetään järjestelmällä 200 A:n kuormaa, jotta saadaan vertailukelpoisia tuloksia.

mittausskenaariossa 2 todetaan erään todennäköisen oikean tilanteen lämpövaikutus järjestelmässä. Sähkökatkoksen aikana kaikki virta kulkee akkuliitännän kautta ja tällaisessa tilanteessa tasasuuntaajien omat rajoittimet eivät rajoita virtaa, ja lämpötila voi nousta hyvinkin korkeaksi.

Mittausskenaario 2 mitataan mittausskenaarion 1 tavoin kaksi kertaa. Tässä mittauksessa maksimivirtana käytetään mittausskenaariossa 1 määritettyä tasasuuntaajien maksimivirtaa, mutta se syötetään järjestelmän ulkopuolisilla tasasuuntaajilla akkuliitännän läpi. Mittausskenaarion 2 toinen mittaus mitataan 200 A:n kuormavirralla.

Kiinnostavia suureita ovat muun muassa kaikkien tasasuuntaajan oikea maksimivirta eli toisin sanoen, kuinka paljon tehonsyöttöjärjestelmää voi ylikuormittaa. Järjestelmän suunniteltu kuormavirta on 250 A, mutta mittauksen perusteella nähdään, kuinka paljon korkeampi maksimivirta on.

Ensimmäisessä mittauskenaariossa mitataan myös tasasuuntaajien virtarajat korkeammissa lämpötiloissa. Deltalla ei ole Suomen yksikössä erillistä lämpökaappia, mutta laite lähetetään Puolan yksikköön, jossa samat mittaukset toistetaan erillisessä lämpökaapissa, joka lämmitetään 65 °C:ksi. Tärkeätä havainnoitavaa tietoa siinä vaiheessa on, että kuinka nopeasti virtarajoittimet alkavat rajoittaa tasasuuntaajia ja kuinka paljon virta loppujen lopuksi rajoittuu.

7.3 Mittauskuvaus

Ensimmäisessä mittauskenaariossa mitattiin järjestelmän virtoja ja lämpötiloja maksimikuormalla. Maksimikuorma tarkoittaa kuormaa, jota järjestelmä voi syöttää täydellä teholla ilman, että tasasuuntaajien rajoittimet alkavat rajoittaa virtaa. Mittaukset suoritettiin huoneenlämpötilassa. Oletuksena oli, että lämpötilan vuoksi tasasuuntaajien virtarajoittimet eivät aktivoitu, koska spesifikaation mukaan tasasuuntaajien pitäisi toimia normaalisti täydellä teholla 45 °C ympäristön lämpötilaan asti.

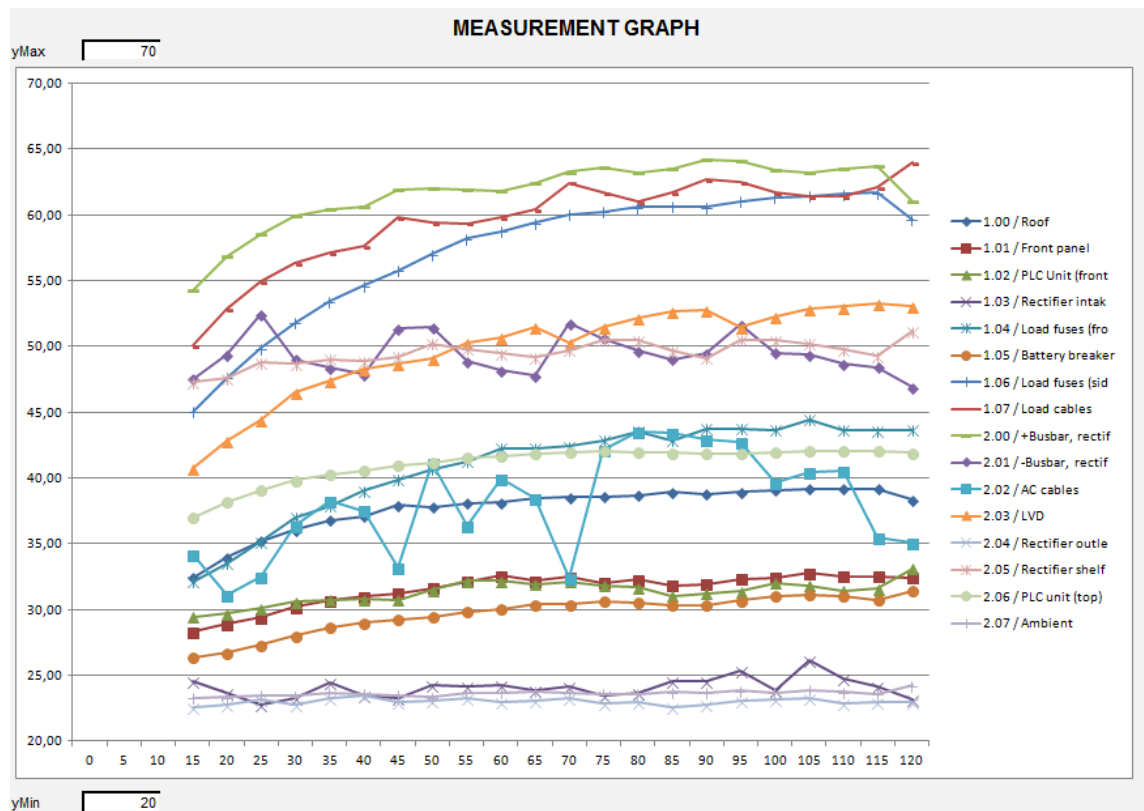
7.3.1 Maksimikuormavirta ja ylikuormitus

Ennen varsinaisia lämpötilamittauksia mitattiin tehonsyöttöjärjestelmän maksimivirta. Käytännössä tämä tapahtui niin, että laitettiin järjestelmään virrat päälle ja kytkettiin virta. Tämän jälkeen kuorman ottamaksi virraksi asetettiin noin 250 A. Sitten virtamäärää kasvatettiin vähän kerrallaan niin kauan, että tasasuuntaajien virtarajoittimet menivät päälle ja alkoivat tiputtaa jännitettä. Maksimikuormavirraksi saatiin 280 A., eli tehonsyöttöjärjestelmää pystyi kuormittamaan 12 %. Tätä virtaa käytettiin myös lämpötilamittausten maksimivirtana.

7.3.2 Mittauskenaario 1

Mittauskenaarion 1 ensimmäisessä mittauksessa lämpötilat pysyivät odotettua alhaisimpina. Tehonsyöttöjärjestelmä oli ennen mittausten aloittamista täysin jäähtynyt ympäristön lämpötilaan, joka oli aloitushetkellä hieman yli 23 °C. Selvästi muista kuumempina erottuneita mittauspisteitä oli kolme: 2.00 pluskisko, 1.07 miinuskuormakaapeli ja 1.06 jakelusulakkeet (sivu). Näiden kolmen pisteet erot keskenään olivat pieniä, mutta kaikista korkein lämpötila mitattiin pluskiskolle. 90

minuuttia mittausseesion aloittamisen jälkeen sen lämpötila oli 64,23 °C. Samalla hetkellä toiseksi kuumin piste löytyi miinuskuormakaapelista. Sen lämpötila oli 62,70 °C. Mittausskenaarion 1 mittaustulokset esitetään täydellisinä liitteessä 3.



Kuva 12. Mittausskenaarion 1 täyden kuorman mittaus

Kuvassa 12 esitettiin mittausskenaarion 1 ensimmäisen mittauksen mittaustulokset käyrämuodossa. Suurin osa kuvaajista käyttäytyy normaalisti noususuhdanteisesti, mutta poikkeuksiakin löytyy. Mittauspisteen 2.01, eli miinuskiskon kuvaaja näyttää aluksi olevan nouseva, mutta yhtäkkiä sen lämpötila lähtee laskuun 25 minuutin kohdalla. Tämä johtuu löysästä liitoksesta. Termoparit kiinnitettiin mittauspisteisiin maalarin teipillä siten, että ensin laitettiin teippisuikale mittauspisteeseen ja sen päälle kiinnitettiin termopari toisella suikaleella. Lämpötilan noustessa teippi kuitenkin kuivuu ja menettää kiinnitysvoimaansa. Tässä tapauksessa kiinnitys ei irronnut ihan kokonaan, vaan jäi vapaasti repsottamaan kulmastaan. Tästä johtuu myös ajoittaiset lämpötilan nousut kuvaajassa.

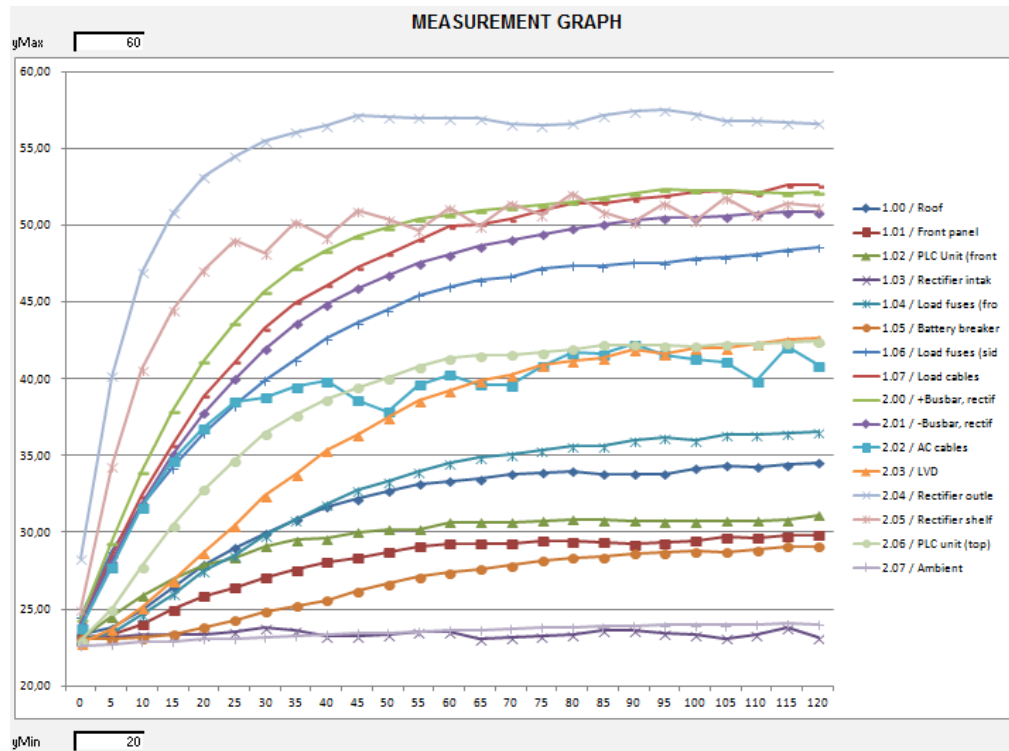
Toinen epänormaalisti käyttäytyvä kuvaaja on mittauspisteen 2.02 kuvaaja eli AC-kaapelin kuvaaja. Kuvaajan perusteella mittauspisteen lämpötila nousi ja laski mielivaltaisesti koko mittauksen ajan. Tämä johtuu siitä, että tehonsyöttöjärjestelmän

AC-syöttö järjestettiin yhdellä 3-vaiheisella kaapelilla, ja järjestelmä sisältää viisi 1-vaiheista tasasuuntaaja. Tämä aiheuttaa kaapelille epäsymmetrisen kuorman, ja lämpötilan vaihtelu johtui todennäköisesti siitä.

Viimeisen normaalista poikkeavan mittaustuloksen näkee kuvaajasta 2.04, eli tasasuuntaajan ulostuloilman kuvaajasta. Termopari oli teipattu tehonsyöttöjärjestelmän takalevyyn kohtaan, joka oli juuri tasasuuntaajan takana. Se pysyi paikallaan koko mittausseesion ajan, mutta jostain syystä maksimiarvoksi sen lämpötilalle saatiin vain 23,29 °C 25 minuutin kohdalla. Järkevää selitystä virheelliselle tulokselle ei löydetty. Todennäköinen vaihtoehto on se, että mittausmoduulissa on tapahtunut jonkinlainen virhe. Mittausskenaarion 1 toisessa mittauksessa ulostuloilmalle saatiin kuitenkin virheettömät tulokset tekemättä kytkentään muutoksia.

Ensimmäisen 15 minuutin jälkeen LabVIEW'illä tehty mittausohjelma kaatui ja uudelleenkäynnistyksen jälkeen se aloitti mittaustulosten kirjoittamisen alusta. Eli toisin sanoa ohjelma päällekirjoitti ensimmäisen 15 minuutin aikana kirjatut mittaukset. Ensimmäisten 15 minuutin aikana lämpeneminen on huomattavasti nopeampaa kuin mittauksen loppuvaiheessa, mutta korkeimmat mittaustulokset saatiin kuitenkin talteen. Tapahtuneesta virheestä johtuen kuvan 12 kuvaajat alkavat 15 minuutin kohdalta.

Mittausskenaarion 1 toiset mittaukset kuorman ollessa 200 A sujuivat ongelmitta. Kuvassa 13 (ks. seur. s.) esitetään sen mittaustulokset käyrämuodossa.



Kuva 13. Mittausskenaarion 1 200 A:n kuorman mittaus

Kuvasta 13 nähtiin, että erityisesti mittauspisteen 2.04, eli tasasuuntaajien ulostuloilman kuvaaja on täysin erilainen kuin ensimmäisessä mittauksessa. Tässä mittauksessa ulostuloilman lämpötila on koko mittauksen korkein ja sen lämpeneminen tasoittuu jo 45 minuutin kohdalla, jolloin lämpötilaksi mitattiin 57,16 °C. Korkeampi arvo mitattiin vielä 95 minuutin kohdalla, jolloin lämpötila oli 57,50 °C.

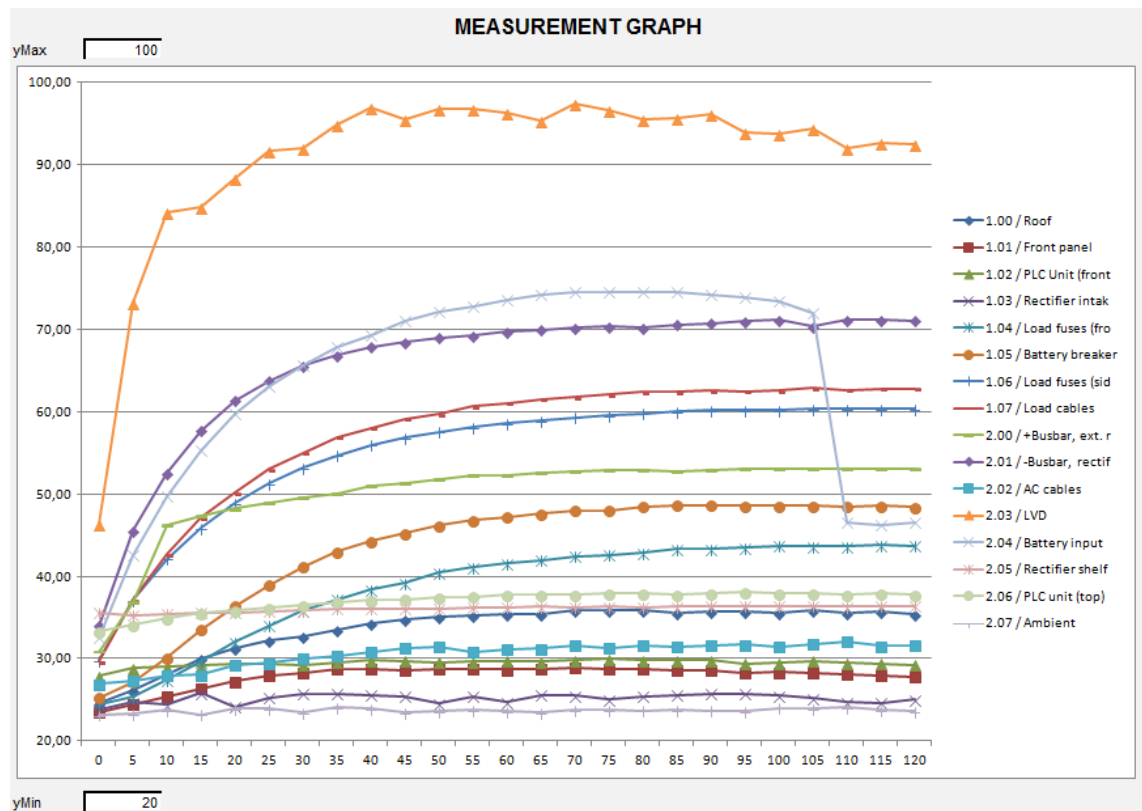
Tässä mittauksessa (kuva 13) näkyy selvemmin 2.05 tasasuuntaajahyllyä mitanneen termoparin kuvaajan lämpötilavaihtelut. Tehonsyöttöjärjestelmän tasasuuntaajat osaavat jakaa kuormaa keskenään tasaisesti. Lämpötilan laskut johtuvat siitä, että tasasuuntaaja, jonka päälle termopari oli kytketty, oli laskupisteissä lepotilassa.

AC-kaapelin mittaustuloksissa on samaa epätasaisuutta kuin ensimmäisessäkin, mikä vahvistaa ensimmäisten mittausten jälkeisiä epäilyksiä siitä, että epätasaisuus johtui kytkennän epäsymmetrisyydestä. Ennen toisten mittausten aloittamista tehonsyöttöjärjestelmän annettiin jäähtyä täysin. Jäähtymisen jälkeen mittauspisteet tarkastettiin ja korjattiin liitokset, joissa oli ensimmäisten mittauksen aikana ollut häiriöitä.

Muut mittaukset käyttäytyivät odotetusti. Korkeimmissa lämpötiloissa ensimmäisiin mittauksiin nähden oli erona, että tasasuuntaajan ulostuloilman mittaus toimi, ja se olikin koko mittauksen korkein lämpötila. Neljä seuraavaksi kuuminta mittauspistettä olivat muuten samat, mutta myös miinuskiskon lämpötila onnistuttiin mittaamaan loppuun asti tällä kertaa. Viisi kuuminta pistettä näissä mittauksissa oli siis 2.04 tasasuuntaajan ulostuloilma, 2.00 pluskisko, 1.07 miinuskuormakaapeli, 2.05 tasasuuntaajahylly ja 2.01 miinuskisko. Ensimmäisissä mittauksissa kuumimpien pisteiden joukossa oli myös 1.06 jakelusulakkeet (sivu). Näissä mittauksissa se jäi kuudenneksi kuumimmaksi. Huomionarvoista on myös se, että tasasuuntaajahyllyn lämpötila oli sama sekä ensimmäisessä että toisessa mittauksessa.

7.3.3 Mittausskenaario 2

Mittausskenaarion 2 mittaukset aloitettiin täyden kuorman eli 280 A:n mittauksella akkuliitännän kautta järjestelmän ulkoisilla tasasuuntaajilla. Ensimmäisellä yrityksellä mittaustuloksissa oli niin paljon häiriötä, että ne oli pakko uusida. Mittalaitteen kakkosmoduulin neljän eri mittauspisteen mittaustulokset näyttivät ensimmäiset 35 minuuttia pisteiden lämpötiloiksi arvoja väliltä 1 500 °C - 2 000 °C. Tämä johtuu siitä, että jokin tai jotkin termoparit oli eristetty puutteellisesti jännitteellistä osista, mikä sekoittaa helposti koko mittausmoduulin toiminnan. Mittaustulokset kuitenkin normalisoituivat 45 minuutin jälkeen, mutta taas viimeinen 15 minuuttia jotkin mittauspisteet antoivat virheellisiä tuloksia. Ongelma hävisi melkein kokonaan lisäämällä eristettä termoparin ja kuparin väliin kaikkiin mittauspisteisiin. Mittausskenaarion 2 kaikki mittaustulokset ovat liitteessä 4.



Kuva 14. Mittausskenaarion 2 täyden kuorman mittaus

Kuvasta 14 kävi ilmi, että tehonsyöttöjärjestelmässä kuormittuu mittausskenaariossa 2 eri osat kuin mittausskenaarion 1 mittauksissa. Selkeästi korkein lämpötila mitattiin mittauspisteessä 2.03, joka viittaa LVD:n termopariin. Mittausskenaarion 2 tilanteessa kaikki kuormaa syöttävä virta kulkee LVD-kontaktorin läpi ja aiheuttaa siinä suuren lämpenemän. Kaikista korkein lämpötila oli 97,38 °C, ja se mitattiin 70 minuutin kohdalla. Tämä oli samalla molempien mittauksien kaikista korkein mitattu lämpötila.

Toiseksi korkein lämpötila oli 74,53 °C, ja se mitattiin akkusyötön mittauspisteessä 2.04 75 minuutin kohdalla. Kuvassa 14 nähtiin myös, että jossain 105 - 110 minuutin välillä termopari irtosi. Tässäkin tapauksessa irtoaminen johtui kuumuuden kuivattamasta ja heikentämästä teipistä.

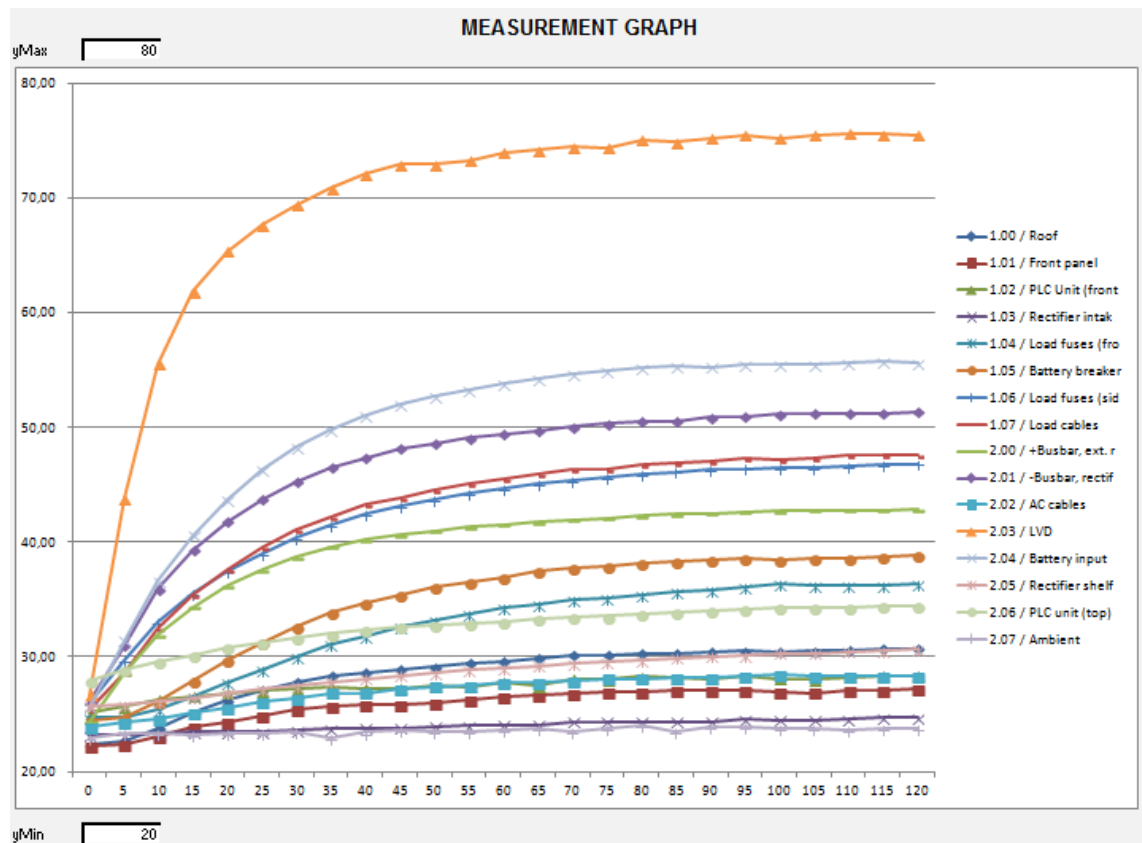
Myös mittauspisteessä 2.00 eli pluskiskon mittauksessa oli pieni häiriö aikavälillä 15 - 30 minuuttia. Tässä tapauksessa termoparien näyttämät arvot hyppäsivät lähelle 2000 °C. Ongelma korjautui itsestään ja sen syy jäi epäselväksi. Todennäköisin selitys on, että termopari pääsi hetkeksi suoraan kosketukseen kuparikiskon kanssa. Aiemmissa testivaiheissa havaittiin, että jos jännitteellisiin osiin kytkettäviä termopareja ei eristetty kunnolla, niin se saattoivat pahimmassa tapauksessa sotkea koko mittausmoduulin

toiminnan. Pluskiskon lämpötila ei kohonnut yhtä korkeaksi kuin mittauskenaarion 1 täyden kuorman mittauksessa. Tähän syynä on se, että ulkoisten tasasuuntaajien pluskaapeleiden poikkipinta-alat olivat suuremmat kuin tehonsyöttöjärjestelmän omien tasasuuntaajien kaapelit. Tästä johtuen liitäntäpisteessä oli pienempi resistanssi ja lämpötilat jäivät noin 9,5 °C matalammiksi.

Miinusiskiskon mittauspisteessä 2.01 sen sijaan lämpötilat nousivat mittauskenaario 1 täyden kuorman mittauksia korkeammaksi. Mittauskenaariossa 1 pluskiskon mittauksessa oli ongelmia, mutta sille saatiin vertailukelpoinen tulos 200 A:n mittauksissa, joissa se jäi 2 - 3 °C pluskiskoa kylmemmäksi. Pluskiskon lämpötilat mittauskenaariossa 1 ylsivät maksimissaan vajaaseen 65 °C:een, joten todennäköisesti miinusiskiskon lämpötila olisi ollut jossain 60 °C ja 65 °C välillä. Tässä mittauskenaariossa miinusiskiskon maksimilämpötilaksi kirjattiin 71,11 °C. Korkeampi lämpötila johtuu siitä, että miinusiskiskon mittauspiste oli hyvin lähellä LVD-kontaktorin mittauspistettä. LVD-kontaktorista johtuva ja säteilevä lämpö lämmitti myös miinusiskiskon mittauspistettä.

Seuraavaksi kuumimmat mittauspisteet olivat 1.06 ja 1.07, eli jakelusulakkeet (sivu) ja miinuskuormakaapeli. Niiden lämpötilat olivat samat kuin mittauskenaarion 1 täyden kuorman mittauksissa.

Mittauskenaarion 2 toisessa, eli 200 A:n mittauksessa lämpötilat noudattivat hyvin samaa kaavaa kuin täyden kuorman mittauksessa. Toisen mittauksen kuvaajat nähdään kuvassa 15 (ks. seur. s.).



Kuva 15. Mittausskenaari 2 200 A:n kuorman mittaus

Vertaamalla kuvaa 15 kuvaan 14 voidaan todeta, että kuvaajat täyden kuorman ja 200 A:n mittauksissa mittausskenaariossa 2 ovat hyvin yhteneviä. 200 A:n mittauksessa kaikki termoparit pysyivät paikallaan, eikä mitakaan häiriöitä tapahtunut mittauksien aikana. Kuumimpien mittauspisteiden arvot jäivät pääsääntöisesti noin 20 °C matalammiksi. Esimerkiksi korkein lämpötila, eli LVD-kontaktorin lämpötila jäi 21,73 °C pienemmäksi, ja miinuskiskon ero täyden kuorman ja 200 A:n mittauksissa oli 19,71 °C.

8 Yhteenveto

Tämän työn tarkoituksena oli testata Delta Energy System (Finland) Oy:n erään CellD 300 -tuotepiheeseen kuuluvan tehonsyöttöjärjestelmän toiminta kuormitusmittausten avulla. Yrityksessä oli tehty kuormitusmittauksia aiemminkin, mutta mitään selkeää ja vakioitua toiminta tapaa niiden suorittamiseen ei ollut muodostunut. Kuormitusmittausten lisäksi työssä suunniteltiin uusi mittausasetelma, jota

noudattamalla mittaustuloksista saadaan tulevaisuudessa yhteneviä ja vertailukelpoisia toistensa kanssa.

Työssä käytiin läpi yleisellä tasolla tietoliikenneteollisuuden suunniteltujen tehonsyöttöjärjestelmien tekniikkaa ja käsiteltiin seikkoja, joihin tulisi kiinnittää huomioita oikeanlaista järjestelmää valittaessa. Lisäksi työssä käsiteltiin tehonsyöttöjärjestelmiä lämpösuunnittelun näkökulmasta.

Kuormitusmittausten perusteella tehonsyöttöjärjestelmä toimi ongelmitta ylikuormitustilanteessa, jossa laitteen kuormavirta oli 12 % korkeampi kuin laitteen suunniteltu kuormavirta. Kaikki mittaukset tehtiin huoneenlämpötilassa, joka oli noin 23 °C. Yrityksen Puolan toimipisteessä on käytössä lämpökaappi, jonka avulla saadaan testattua tehonsyöttöjärjestelmien ja muiden laitteiden toimintaa korkeammassa lämpötiloissa. Tämäkin tehonsyöttöjärjestelmä lähetettiin Puolaan jatkomittauksiin, ja alunperin insinööriyöhön olikin tarkoituksena sisällyttää analyysiosuus Suomen ja Puolan mittaustulosten eroista. Puolan mittaukset kuitenkin myöhästyivät niin paljon, että niitä ei enää ehditty käsitellä tässä insinööriyössä.

Työssä oli tarkoitus pohtia, että tarvitaanko Esooseen oma lämpökaappi, vai voitaisiinko huoneenlämpötilassa mitattuja mittaustuloksia soveltaa laskennallisesti vastaamaan 65 °C:n lämpötilassa mitattuja mittaustuloksia. Selvittäminen on yhä kesken, koska Puolassa tehtävät mittaukset korkeammassa ympäristön lämpötilassa eivät ole vielä valmiit. On kuitenkin todennäköistä, että laskennallisesti on liian monimutkaista ja työlästä selvittää tehonsyöttöjärjestelmän toiminta korkeammassa lämpötiloissa. Selvittämisestä tekee vaikeaa lämpenemisaikavakioiden määrittäminen järjestelmän eri komponenteille, koska ne koostuvat kuparin lisäksi muistakin materiaaleista, kuten esimerkiksi muovista ja teräksestä.

Insinööriyöhön kuului myös markkinoilla olevien mittalaitteiden vertailua ja tarkastelua niiden sopivuudesta tehonsyöttöjärjestelmien kuormitusmittauksiin. Työssä todettiin, että yrityksen käytössä ollut vanhan mittalaitteen ja LabVIEW`n yhdistelmä on toistaiseksi riittävä yrityksen käyttötarpeisiin, vaikka niiden päivittäminen helpottaisikin huomattavasti tulevaisuuden mittauksia.

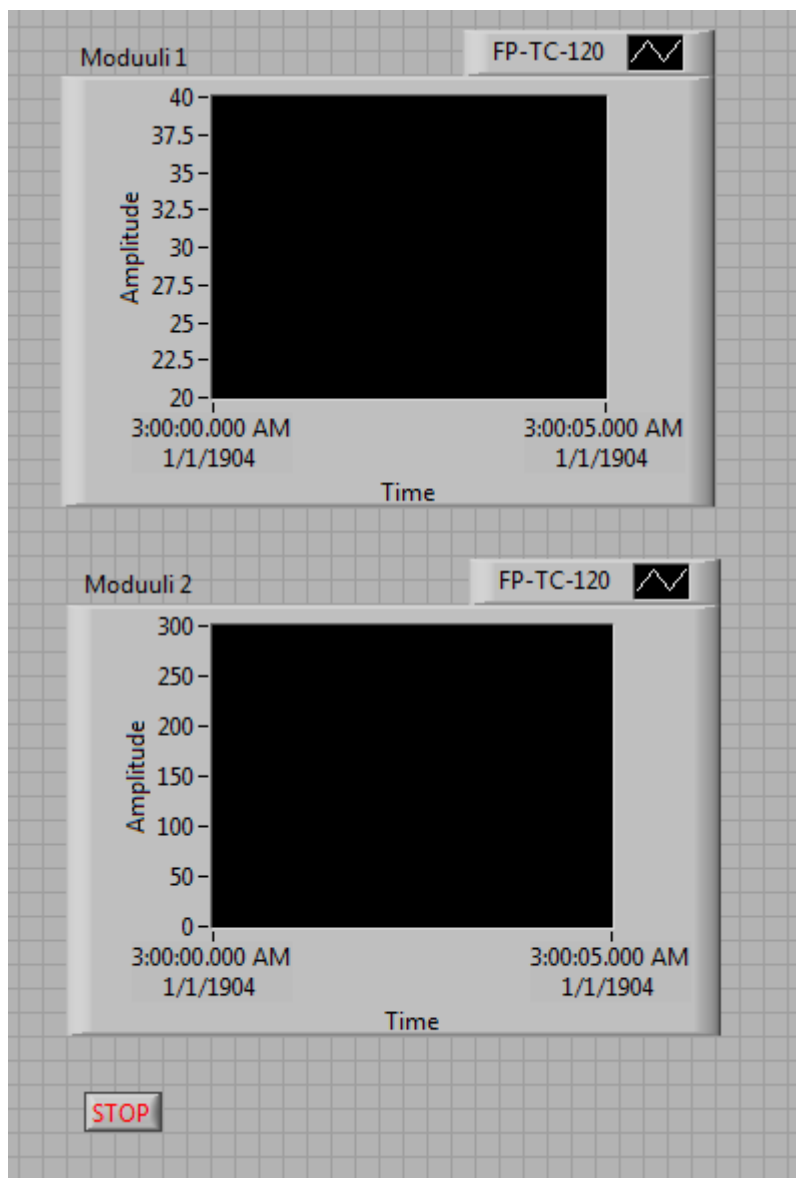
Lähteet

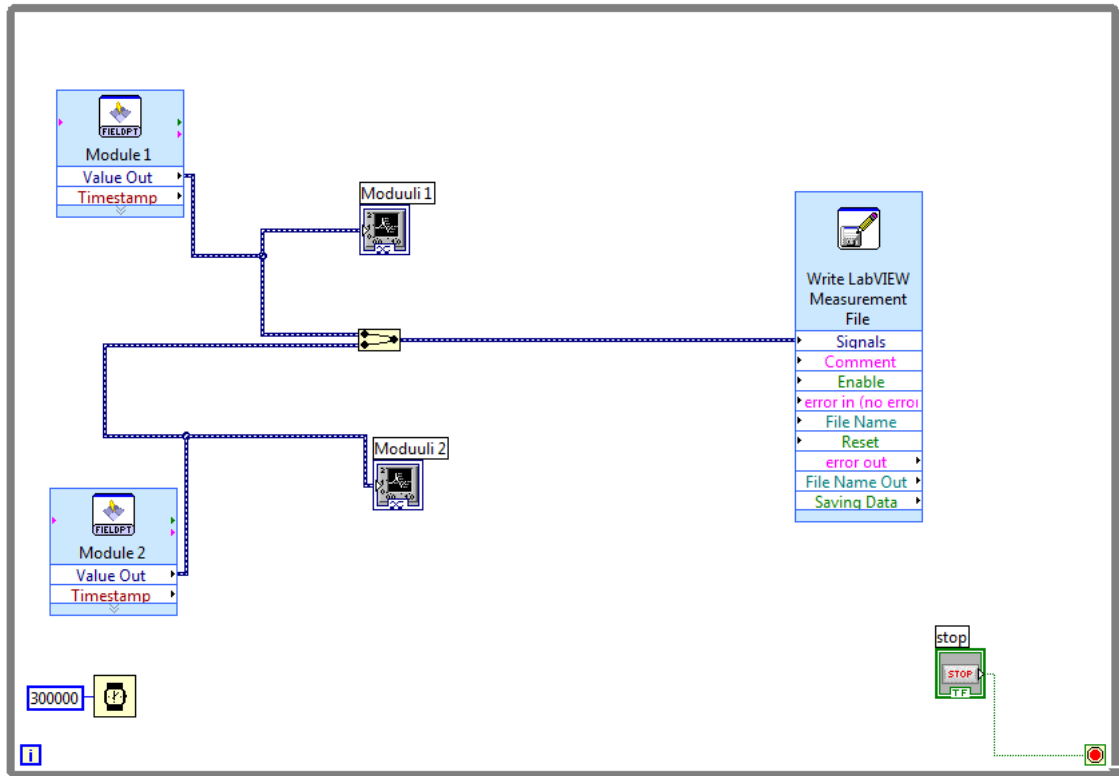
- 1 Glanz, James. 2008. Google Details, and Defends, Its Use of Electricity. Verkkodokumentti. <<http://www.nytimes.com/2011/09/09/technology/google-details-and-defends-its-use-of-electricity.html>>. 8.9.2011. Luettu 21.7.2013.
- 2 High Voltage Direct Current Transmission: Proven Technology for Power Exchange. Verkkodokumentti. Siemens. <http://web.archive.org/web/20080408011745/http://www.rmst.co.il/HVDC_Proven_Technology.pdf>. Luettu 12.7.2013.
- 3 380/400 V DC Powering Option. PDF-dokumentti. Silcar. Yrityksen intranet.
- 4 Galántai, Cs. 1997. Telescon 1997: General Specification of Telecom Power Supply System and Technical Realisations. Budapest: RÓMAI Kiadói és Nyomdaipari BT.
- 5 Reeve, Whitham. 2007. DC Power System Design for Telecommunications. ISBN-13 978-0-471-68161-8.
- 6 Antila, A. Karppinen, M. Leskelä, M. Mölsä, H. Pohjakallio, M. 2008. Tekniikan kemia. Kymmenes painos. Helsinki: Edita.
- 7 Gobbi, A. 1997. Telescon 1997: Selecting an optimum Rectifier for a Telecom Power Supply System. Budapest: RÓMAI Kiadói és Nyomdaipari BT.
- 8 ETSI EN 300 132-2. 2011. Power supply interface at the input to telecommunications and datacom (ICT) equipment. Part 2: Operated by -48 V direct current (DC). European Telecommunications Standards Institute.
- 9 Gobbi, Alan. 2009. Understanding Power Factor and Input Harmonics in Switched Mode Power Supplies. Verkkodokumentti. <<http://www.ospmag.com/files/pdf/whitepaper/Power-Factor-and-Input.pdf>>. Luettu 17.7.2013.
- 10 Fagerholm, Nils-Erik. 1986. Termodynamiikka. Jyväskylä: Gummerus Oy:n kirjapaino.
- 11 Baer, D. B. 2001. Intelc 2001: Cooling Requirements & Systems in Telecommunications Spaces. Exeter: Short Run Press Ltd.
- 12 Serban, Basil. 2001. Intelc 2001: Thermal Management of Power System Design by Computational Simulation. Exeter: Short Run Press Ltd.
- 13 Aura, Lauri & Tonteri, Antti J. 1993. Sähkömiehen käsikirja 1: Teoreettinen sähkötekniikka. Kolmas painos. Porvoo: WSOY.
- 14 Yogendra, Joshi. Pramod, Kumar. 2012. Energy Efficient Thermal Management of Data Centers. ISBN 978-1-4419-7123-4.
- 15 Väre, Jarmo. 2009. ATK-konesalien jäähdytys. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu.

- 16 Reliability and Availability Basics. Verkkosivu.
<http://www.eventhelix.com/RealtimeMantra/FaultHandling/reliability_availability_basics.htm#MTBF>. Luettu 23.6.2013
- 17 Electric Power Around the World. Global Electric & Phone Directory. Verkkosivu.
<<http://www.kropla.com/electric2.htm>>. Luettu 4.8.2013.
- 18 Feder, David O. 2001. Intelc 2001: More Than One-Half Century of Learning How to Live with Each New Generation of Telecommunications Standby Batteries. Exeter: Short Run Press Ltd.
- 19 Groiß, René. The Influence of Temperature on the Operation of Batteries and Other Electrochemical Energy Storage Systems. Verkkosivu.
<http://www.basytec.de/Literatur/temperature/DE_2002.htm>. Luettu 20.6.2013.
- 20 Dimensioning of the battery. 2006. PDF-dokumentti. Yrityksen intranet.
- 21 Hioki MEMORY HiLOGGER LR8400-20 series. 2013. Verkkosivu.
<<http://www.hioki.com/product/lr84000102/index.html>>. Luettu 2.6.2013.
- 22 MccDAQ USB-2408 Series. 2013. Verkkosivu. < <http://www.mccdaq.com/usb-data-acquisition/USB-2408-Series.aspx>>. Luettu 2.6.2013.
- 23 NI CompactDAQ. 2013. Verkkosivu.
<<http://sine.ni.com/np/app/main/p/ap/daq/lang/fi/pg/1/sn/n17:daq,n24:cDAQ/>>. Luettu 2.6.2013.
- 24 FP-TC-120. 2002. National Instruments. Käyttöohje.
- 25 Measuring a 4-20 mA Input With a Voltage Input Device. Omega. Verkkosivu.
<<http://www.omega.com/techref/das/tcmeasurement.html>>. Luettu 4.6.2013.
- 26 Michele Scervini. 2009. Thermoelectric Materials for Thermocouples. Verkkosivu.
<<http://www.msm.cam.ac.uk/utc/thermocouple/pages/ThermocouplesOperatingPrinciples.html>>. Luettu 4.6.2013.
- 27 Thermal Imagers: Ti125. 2012. Fluke. Käyttöohje.

Mittausohjelma

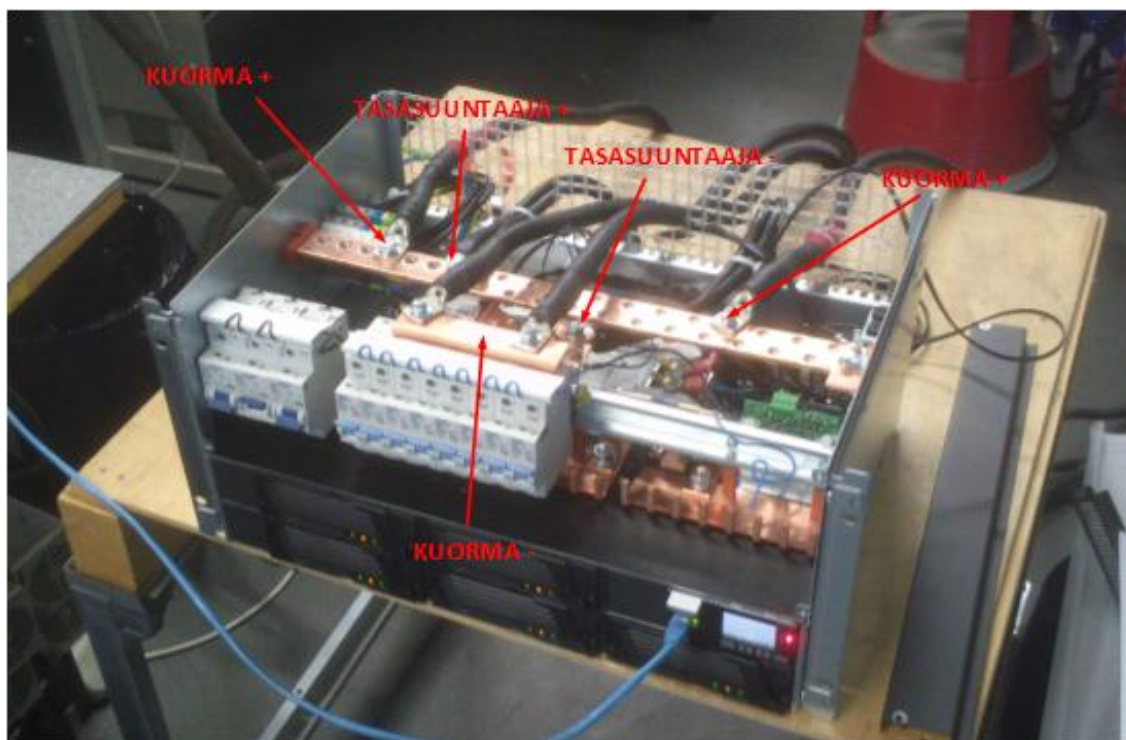
LabVIEW'illä tuotettu mittausohjelma. Ensimmäisessä kuvassa esitetään kuvaajanäytöt ja toisella sivulla näkyy graafinen ohjelma ohjelmointiblokein toteutettuna.





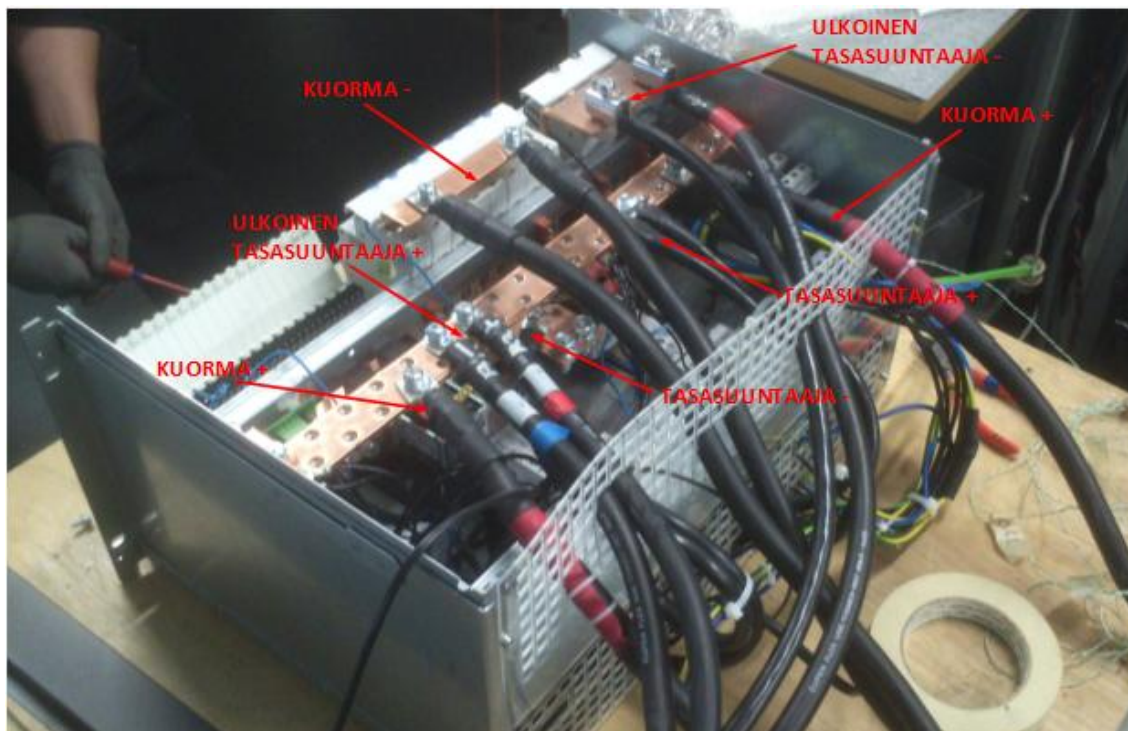
Mittausskenaarioiden kaapelointikuvat

Mittausskenaarion 1 kuormakaapelointiin tarvittiin vain neljä kaapelia; kaksi miinuskaapelia ja kaksi pluskaapelia. Kaapeloinnin olisi voinut toteuttaa myös kahdella paksummalla kaapelilla, mutta niitä ei ollut saatavilla.



Tasasuuntaajilta tulevat ovat osa varsinaista järjestelmää, eli ulkoiseen kaapelointiin kuuluvat KUORMA + ja KUORMA - -merkinnöllä varustetut kaapelit. Kaapeleiden poikkipinta-alat ovat 70 mm².

Mittauskenaarion 2 kaapelointi on vähän monimutkaisempi. Kuormakaapeleiden lisäksi järjestelmään piti kytkeä kahdelta ulkoiselta tasasuuntaajalta tulevat kaapelit. Kuvaan merkattu ULKOINEN TASASUUNTAAJA - simuloi tilannetta, jossa järjestelmään syötetään virtaa akkuliitännän kautta eli käytännössä akustolta.



Mittausskenaarion 1 mittaustulokset

Tässä liitteessä esitetään mittausskenaarion 1 kaikki mittaustulokset taulukkomuodossa täyden kuorman mittauksista sekä 200 A:n mittauksista. Insinööriyössä käytetyt kuvaajat kuvissa 12 – 13 ovat tehty alla olevien taulukoiden pohjalta.

1.1 Mittaustulokset täydellä kuormalla

MODUULI 1								
[min]	1.00 [°C]	1.01 [°C]	1.02 [°C]	1.03 [°C]	1.04 [°C]	1.05 [°C]	1.06 [°C]	1.07 [°C]
0								
5								
10								
15	32,44	28,30	29,42	24,54	32,10	26,37	45,02	50,06
20	33,97	28,89	29,67	23,63	33,53	26,72	47,60	52,86
25	35,18	29,42	30,08	22,79	35,15	27,31	49,84	54,92
30	36,05	30,17	30,58	23,29	36,99	27,99	51,81	56,38
35	36,77	30,67	30,70	24,41	37,86	28,65	53,46	57,16
40	37,11	31,01	30,79	23,45	39,01	28,99	54,61	57,63
45	37,95	31,23	30,70	23,23	39,85	29,27	55,76	59,84
50	37,80	31,63	31,48	24,29	40,63	29,42	57,00	59,43
55	38,08	32,13	32,16	24,19	41,28	29,86	58,22	59,37
60	38,14	32,57	32,16	24,23	42,25	30,02	58,78	59,84
65	38,42	32,16	31,95	23,85	42,22	30,39	59,40	60,43
70	38,54	32,51	32,10	24,13	42,40	30,39	60,02	62,45
75	38,61	32,04	31,79	23,48	42,84	30,64	60,24	61,67
80	38,67	32,29	31,67	23,67	43,53	30,51	60,58	61,05
85	38,92	31,85	31,04	24,57	42,87	30,33	60,61	61,70
90	38,79	31,95	31,26	24,60	43,71	30,36	60,58	62,70
95	38,92	32,32	31,39	25,38	43,71	30,70	61,02	62,48
100	39,07	32,41	32,04	23,82	43,65	31,01	61,36	61,67
105	39,20	32,75	31,85	26,16	44,46	31,14	61,46	61,39
110	39,17	32,54	31,45	24,75	43,65	31,01	61,58	61,39
115	39,17	32,54	31,57	24,16	43,59	30,73	61,70	62,11
120	38,33	32,44	33,13	23,14	43,65	31,45	59,62	64,01

MODUULI 2

[min]	1.00 [°C]	1.01 [°C]	1.02 [°C]	1.03 [°C]	1.04 [°C]	1.05 [°C]	1.06 [°C]	1.07 [°C]
0								
5								
10								
15	54,23	47,54	34,22	40,79	22,61	47,26	36,96	23,26
20	56,82	49,38	31,11	42,84	22,76	47,60	38,17	23,32
25	58,56	52,43	32,51	44,40	23,14	48,79	39,04	23,45
30	59,90	49,04	36,40	46,51	22,76	48,69	39,82	23,42
35	60,46	48,35	38,23	47,39	23,29	49,00	40,29	23,67
40	60,58	47,88	37,52	48,32	23,48	48,88	40,60	23,54
45	61,89	51,34	33,22	48,69	22,95	49,22	40,97	23,48
50	62,02	51,43	41,10	49,10	23,04	50,22	41,19	23,32
55	61,89	48,85	36,37	50,31	23,23	49,81	41,53	23,63
60	61,83	48,19	39,98	50,65	22,92	49,47	41,69	23,67
65	62,42	47,79	38,45	51,46	23,07	49,19	41,88	23,76
70	63,26	51,77	32,44	50,25	23,23	49,72	41,97	23,63
75	63,63	50,62	42,12	51,49	22,86	50,53	42,03	23,60
80	63,23	49,69	43,53	52,18	22,98	50,44	41,97	23,54
85	63,51	49,04	43,46	52,65	22,58	49,66	41,91	23,73
90	64,23	49,47	42,93	52,74	22,76	49,13	41,88	23,67
95	64,07	51,68	42,72	51,46	23,11	50,53	41,88	23,82
100	63,42	49,53	39,67	52,27	23,17	50,47	41,97	23,63
105	63,20	49,38	40,47	52,83	23,23	50,22	42,03	23,85
110	63,51	48,66	40,54	53,02	22,86	49,78	42,06	23,73
115	63,67	48,44	35,49	53,27	22,98	49,25	42,06	23,54
120	61,02	46,89	35,12	53,11	22,98	51,15	41,91	24,23

VALVOJA

[min]	Iload [A]	Irect [A]	Psys [W]	Usys [V]
0	217,7	217,7	11621	53,23
5	277	277	14636	52,62
10	280,9	280,9	14743	52,28
15	275,4	275,4	14713	53,21
20	278,2	278,2	14754	52,82
25	277,5	277,5	14680	52,69
30	277,5	277,5	14677	52,69
35	277,4	277,4	14672	52,69
40	277,5	277,5	14677	52,69
45	277,4	277,4	14673	52,69
50	277,2	277,2	14663	52,69
55	277,4	277,4	14673	52,69
60	277,2	277,2	14663	52,69
65	277,2	277,2	14665	52,67
70	277,5	277,5	14676	52,67
75	277,1	277,1	14657	52,69
80	276,9	277,2	14662	52,69
85	277	277,3	14666	52,67
90	277,1	277,4	14672	52,69
95	277	277,3	14670	52,69
100	277	277,3	14670	52,69
105	277	277,3	14668	52,69
110	277	277,3	14667	52,67
115	276,9	277,2	14665	52,69
120	-	-	-	-

1.2 Mittaustulokset 200 A:n kuormalla

MODUULI 1								
[min]	1.00 [°C]	1.01 [°C]	1.02 [°C]	1.03 [°C]	1.04 [°C]	1.05 [°C]	1.06 [°C]	1.07 [°C]
0	23,29	23,17	23,11	23,07	23,11	23,07	24,51	24,04
5	23,76	23,35	24,51	23,17	23,45	23,04	28,77	28,49
10	24,88	24,01	25,84	23,32	24,60	23,14	31,76	32,38
15	26,40	24,97	26,90	23,29	25,97	23,35	34,22	35,71
20	27,90	25,81	27,90	23,35	27,46	23,82	36,49	38,86
25	28,99	26,37	28,37	23,48	28,52	24,29	38,26	41,10
30	29,92	27,03	29,11	23,79	29,80	24,85	39,88	43,28
35	30,86	27,56	29,49	23,60	30,79	25,19	41,25	44,99
40	31,70	28,09	29,61	23,26	31,85	25,56	42,65	46,11
45	32,19	28,37	29,98	23,26	32,72	26,19	43,65	47,26
50	32,69	28,68	30,20	23,29	33,32	26,65	44,46	48,10
55	33,16	29,08	30,20	23,48	33,97	27,09	45,46	49,04
60	33,32	29,27	30,67	23,51	34,53	27,37	46,02	49,91
65	33,47	29,27	30,64	23,07	34,90	27,62	46,42	50,06
70	33,81	29,27	30,64	23,14	35,06	27,84	46,67	50,40
75	33,91	29,46	30,73	23,23	35,37	28,15	47,17	50,93
80	33,97	29,39	30,86	23,35	35,65	28,33	47,39	51,43
85	33,78	29,36	30,79	23,60	35,65	28,40	47,35	51,46
90	33,78	29,21	30,73	23,60	36,02	28,65	47,57	51,68
95	33,81	29,30	30,70	23,45	36,18	28,68	47,54	51,93
100	34,19	29,46	30,70	23,32	35,99	28,77	47,79	52,21
105	34,37	29,67	30,73	23,11	36,37	28,74	47,91	52,24
110	34,25	29,64	30,73	23,29	36,37	28,86	48,10	52,05
115	34,40	29,77	30,79	23,76	36,43	29,11	48,35	52,61
120	34,56	29,83	31,14	23,14	36,55	29,08	48,57	52,61

MODUULI 2

[min]	1.00 [°C]	1.01 [°C]	1.02 [°C]	1.03 [°C]	1.04 [°C]	1.05 [°C]	1.06 [°C]	1.07 [°C]
0	24,35	24,04	23,79	22,76	28,30	24,97	22,95	22,58
5	29,39	28,15	27,74	23,67	40,19	34,34	24,97	22,70
10	33,97	31,85	31,63	25,10	46,92	40,60	27,77	22,86
15	37,95	35,09	34,72	26,87	50,81	44,46	30,45	22,92
20	41,19	37,80	36,83	28,71	53,18	47,11	32,79	23,04
25	43,71	40,01	38,51	30,48	54,51	49,00	34,72	23,11
30	45,67	41,94	38,79	32,35	55,48	48,19	36,46	23,17
35	47,26	43,59	39,48	33,81	56,07	50,25	37,64	23,26
40	48,35	44,83	39,88	35,34	56,51	49,19	38,64	23,32
45	49,28	45,92	38,61	36,37	57,16	50,93	39,45	23,45
50	49,88	46,73	37,89	37,49	57,04	50,40	40,04	23,45
55	50,37	47,51	39,63	38,61	57,00	49,66	40,79	23,51
60	50,65	48,10	40,29	39,20	56,94	51,15	41,32	23,60
65	50,93	48,66	39,63	39,85	56,94	49,91	41,50	23,63
70	51,18	49,07	39,57	40,29	56,60	51,43	41,56	23,73
75	51,34	49,44	40,82	40,88	56,51	50,65	41,72	23,79
80	51,56	49,81	41,69	41,16	56,63	52,09	41,94	23,82
85	51,77	50,06	41,63	41,38	57,16	50,87	42,22	23,85
90	52,09	50,31	42,25	41,88	57,44	50,25	42,22	23,91
95	52,40	50,50	41,56	41,63	57,50	51,46	42,16	23,95
100	52,24	50,50	41,28	41,97	57,22	50,31	42,12	23,95
105	52,24	50,56	41,10	42,03	56,82	51,84	42,28	23,95
110	52,18	50,75	39,85	42,28	56,82	50,72	42,28	24,01
115	52,05	50,84	42,09	42,56	56,66	51,40	42,34	24,04
120	52,18	50,84	40,88	42,65	56,63	51,25	42,44	24,01

VALVOJA

[min]	Iload [A]	Irect [A]	Psys [W]	Usys [V]
0	202,2	202,2	10767	53,25
5	201,8	201,8	10745	53,25
10	201,8	201,8	10745	53,25
15	202,1	202,1	10761	53,25
20	201,7	201,7	10740	53,25
25	201,9	201,9	10751	53,25
30	202,1	202,1	10753	53,21
35	201,3	201,3	10711	53,21
40	201,4	201,4	10720	53,23
45	201,5	201,5	10725	53,23
50	201,8	201,8	10741	53,23
55	202,1	202,1	10757	53,23
60	201,9	201,9	10747	53,23
65	202	202	10748	53,21
70	201,5	201,5	10725	53,23
75	201,8	201,8	10737	53,21
80	201,5	201,5	10725	53,23
85	201,4	201,4	10716	53,21
90	201,5	201,5	10717	53,19
95	201,7	201,7	10736	53,23
100	201,9	201,9	10747	53,23
105	201,6	201,6	10727	53,21
110	201,7	201,7	10736	53,23
115	201,5	201,5	10725	53,23
120	201,5	201,5	10721	53,21

Mittausskenaarion 2 mittaustulokset

Tässä liitteessä esitetään mitausskenaarion 2 kaikki mittaustulokset taulukkomuodossa täyden kuorman mittauksista sekä 200 A:n mittauksista. Insinööriyössä käytetyt kuvaajat kuvissa 14 – 15 ovat tehty alla olevien taulukoiden pohjalta.

1.1 Mittaustulokset täydellä kuormalla

MODUULI 1								
[min]	1.00 [°C]	1.01 [°C]	1.02 [°C]	1.03 [°C]	1.04 [°C]	1.05 [°C]	1.06 [°C]	1.07 [°C]
0	24,60	23,45	27,93	23,79	24,51	25,25	29,77	29,64
5	26,12	24,41	28,83	24,75	25,41	27,18	37,08	37,08
10	28,12	25,44	29,02	24,35	27,37	30,14	42,12	42,65
15	29,98	26,40	29,18	25,81	29,67	33,56	45,89	47,14
20	31,23	27,21	29,36	24,16	32,01	36,40	48,88	50,16
25	32,29	27,90	29,42	25,28	34,03	38,92	51,28	53,02
30	32,72	28,21	29,24	25,75	35,87	41,16	53,18	55,01
35	33,53	28,68	29,58	25,72	37,21	43,00	54,67	56,88
40	34,25	28,68	29,80	25,60	38,36	44,27	55,95	58,03
45	34,68	28,58	29,74	25,41	39,17	45,21	56,85	59,15
50	35,06	28,68	29,58	24,54	40,47	46,14	57,56	59,65
55	35,31	28,74	29,61	25,44	41,13	46,76	58,06	60,65
60	35,46	28,65	29,74	24,72	41,53	47,17	58,56	61,02
65	35,46	28,71	29,64	25,60	41,97	47,60	58,90	61,49
70	35,87	28,89	29,80	25,53	42,47	47,98	59,31	61,77
75	35,81	28,74	29,92	25,04	42,62	48,01	59,53	62,05
80	35,81	28,68	29,80	25,44	42,87	48,44	59,77	62,36
85	35,62	28,52	29,77	25,56	43,28	48,66	60,02	62,36
90	35,71	28,55	29,80	25,72	43,37	48,60	60,12	62,54
95	35,68	28,30	29,42	25,72	43,49	48,57	60,12	62,48
100	35,56	28,33	29,46	25,47	43,71	48,54	60,18	62,54
105	35,81	28,21	29,74	25,16	43,68	48,57	60,33	62,86
110	35,62	28,02	29,46	24,69	43,68	48,44	60,37	62,64
115	35,65	27,99	29,42	24,60	43,81	48,57	60,37	62,79
120	35,43	27,84	29,24	25,07	43,71	48,38	60,33	62,76

MODUULI 2								
[min]	1.00 [°C]	1.01 [°C]	1.02 [°C]	1.03 [°C]	1.04 [°C]	1.05 [°C]	1.06 [°C]	1.07 [°C]
0	30,86	34,03	26,90	46,33	32,54	35,53	33,28	23,11
5	36,80	45,55	27,28	73,25	42,50	35,25	34,09	23,29
10	46,23	52,49	27,90	84,15	49,69	35,37	34,87	23,73
15	47,33	57,69	28,02	84,86	55,32	35,53	35,49	23,23
20	48,20	61,36	29,18	88,35	59,74	35,53	35,87	23,91
25	48,90	63,73	29,46	91,68	63,04	35,68	36,21	23,91
30	49,60	65,53	30,02	92,02	65,66	35,81	36,46	23,45
35	50,06	66,84	30,36	94,79	67,87	35,99	36,89	24,04
40	50,93	67,87	30,76	96,88	69,30	36,05	37,08	23,91
45	51,28	68,40	31,23	95,54	70,95	36,09	37,21	23,42
50	51,77	68,99	31,48	96,82	72,13	36,05	37,39	23,60
55	52,18	69,27	30,76	96,69	72,69	36,18	37,52	23,76
60	52,30	69,67	31,14	96,19	73,60	36,24	37,70	23,60
65	52,52	69,95	31,20	95,32	74,19	36,27	37,80	23,42
70	52,77	70,20	31,57	97,38	74,50	36,24	37,74	23,79
75	52,86	70,36	31,29	96,63	74,53	36,27	37,89	23,76
80	52,83	70,14	31,57	95,51	74,47	36,24	37,92	23,67
85	52,77	70,58	31,45	95,63	74,47	36,27	37,74	23,73
90	52,86	70,73	31,60	96,04	74,19	36,37	37,92	23,67
95	53,08	70,98	31,70	93,92	73,91	36,40	38,05	23,63
100	53,08	71,11	31,48	93,70	73,32	36,37	37,86	23,98
105	53,02	70,39	31,79	94,30	71,91	36,30	37,86	23,95
110	53,05	71,11	32,10	91,96	46,54	36,27	37,80	24,13
115	53,08	71,11	31,51	92,55	46,23	36,37	37,86	23,79
120	53,02	71,04	31,57	92,49	46,48	36,30	37,70	23,60

Moduulin 2 mittaustuloksissa sininen ja punainen väri tarkoittaa virheellisiä tuloksia. Siniset arvot ovat päästä keksittyjä, mutta mahdollisimman paljon totuutta vastaavia arvoja, joilla on korvattu moduulissa tapahtuneen virheen vuoksi mitatut lämpötilat, jotka olivat 1500 – 2000 °C. Arvot on muutettu siten, että arvoista luotu kuvaaja vastaisi mahdollisimman tarkasti oikeaa tilannetta.

Punaiset arvot on korostettu sen vuoksi, että termopari irtosi mittauspisteestään. Punaiset arvot eivät siis ole mittauspisteiden oikeita lämpötiloja.

VALVOJA

[min]	Iload [A]	Irect [A]	Psys [W]	U_{sys} [V]
0	269,2	269,19	14200	52,75
5	269,2	269,19	14189	52,71
10	269,2	269,20	14184	52,69
15	269,2	269,19	14154	52,58
20	269,2	269,19	14178	52,67
25	268,8	268,79	14152	52,65
30	269,2	269,19	14173	52,65
35	268,8	268,79	14152	52,65
40	268,8	268,79	14152	52,65
45	268,8	268,79	14152	52,65
50	268,8	268,79	14152	52,65
55	268,8	268,79	14152	52,65
60	269,2	269,19	14173	52,65
65	268,8	268,79	14152	52,65
70	268,8	268,79	14152	52,65
75	268,8	268,79	14152	52,65
80	268,8	268,79	14152	52,65
85	269,2	269,19	14173	52,65
90	269,2	269,19	14173	52,65
95	268,8	268,79	14152	52,65
100	268,8	268,79	14152	52,65
105	269,2	269,19	14173	52,65
110	268,8	268,79	14152	52,65
115	269,2	269,19	14173	52,65
120	269,2	269,19	14173	52,65

1.2 Mittaustulokset 200 A:n kuormalla

MODUULI 1								
[min]	1.00 [°C]	1.01 [°C]	1.02 [°C]	1.03 [°C]	1.04 [°C]	1.05 [°C]	1.06 [°C]	1.07 [°C]
0	22,33	22,20	25,10	23,17	24,72	24,47	26,03	25,41
5	22,64	22,42	25,66	23,14	24,72	24,72	29,77	28,65
10	23,82	23,07	26,31	23,29	25,38	26,09	33,10	32,51
15	25,10	23,85	26,56	23,45	26,53	27,93	35,56	35,46
20	26,19	24,29	26,87	23,45	27,77	29,67	37,49	37,67
25	27,09	24,85	27,03	23,45	28,89	31,23	39,04	39,51
30	27,77	25,38	27,21	23,60	29,98	32,63	40,38	41,07
35	28,33	25,72	27,31	23,73	31,07	33,81	41,50	42,16
40	28,68	25,78	27,28	23,82	31,85	34,75	42,44	43,25
45	28,89	25,81	27,25	23,82	32,60	35,43	43,12	43,87
50	29,11	26,00	27,49	23,95	33,22	36,05	43,77	44,55
55	29,42	26,19	27,43	24,01	33,78	36,55	44,24	45,08
60	29,64	26,56	27,81	24,10	34,25	36,96	44,74	45,58
65	29,86	26,62	27,46	24,10	34,62	37,46	45,05	45,92
70	30,11	26,75	28,09	24,32	34,93	37,74	45,39	46,33
75	30,17	26,93	28,02	24,32	35,15	37,95	45,67	46,42
80	30,26	27,00	28,30	24,35	35,43	38,14	45,92	46,82
85	30,30	27,03	28,15	24,38	35,68	38,30	46,14	46,89
90	30,39	27,06	28,12	24,38	35,84	38,42	46,33	47,01
95	30,51	27,12	28,30	24,54	36,09	38,64	46,42	47,29
100	30,39	27,00	28,09	24,47	36,37	38,48	46,54	47,20
105	30,48	26,87	28,02	24,47	36,30	38,54	46,54	47,29
110	30,58	27,03	28,21	24,57	36,24	38,61	46,67	47,54
115	30,70	27,12	28,40	24,66	36,30	38,73	46,73	47,57
120	30,73	27,21	28,33	24,66	36,40	38,86	46,82	47,67

MODUULI 2

[min]	1.00 [°C]	1.01 [°C]	1.02 [°C]	1.03 [°C]	1.04 [°C]	1.05 [°C]	1.06 [°C]	1.07 [°C]
0	24,38	26,09	23,95	26,72	25,63	25,72	27,93	22,92
5	28,58	31,01	24,29	43,81	31,45	25,81	28,86	23,32
10	31,88	35,93	24,60	55,54	36,61	26,09	29,61	23,32
15	34,34	39,32	25,10	61,83	40,60	26,40	30,17	23,26
20	36,18	41,84	25,60	65,35	43,77	26,84	30,76	23,35
25	37,58	43,71	26,09	67,65	46,30	27,18	31,23	23,35
30	38,67	45,24	26,37	69,39	48,29	27,49	31,60	23,48
35	39,57	46,51	26,87	70,82	49,84	27,81	32,01	22,92
40	40,19	47,39	26,87	72,07	51,03	28,12	32,32	23,42
45	40,66	48,16	27,28	72,91	51,99	28,37	32,60	23,63
50	41,00	48,60	27,43	72,94	52,68	28,55	32,75	23,48
55	41,32	49,07	27,49	73,28	53,27	28,83	32,88	23,45
60	41,56	49,41	27,74	74,00	53,86	29,02	33,07	23,60
65	41,75	49,69	27,77	74,19	54,30	29,21	33,28	23,82
70	41,94	50,03	27,93	74,47	54,67	29,39	33,47	23,54
75	42,12	50,31	28,12	74,37	54,98	29,58	33,53	23,82
80	42,28	50,53	28,12	75,06	55,23	29,67	33,75	23,98
85	42,40	50,56	28,21	74,87	55,39	29,86	33,84	23,54
90	42,50	50,87	28,21	75,18	55,29	30,02	34,03	23,85
95	42,62	50,96	28,37	75,46	55,54	30,11	34,16	23,95
100	42,68	51,15	28,46	75,21	55,45	30,30	34,25	23,79
105	42,75	51,21	28,30	75,46	55,54	30,33	34,25	23,73
110	42,81	51,21	28,37	75,65	55,60	30,45	34,34	23,67
115	42,81	51,21	28,37	75,56	55,79	30,51	34,37	23,79
120	42,87	51,40	28,37	75,49	55,60	30,64	34,44	23,79

VALVOJA

[min]	Iload [A]	Irect [A]	Psys [W]	U_{sys} [V]
0	225,6	225,59	11945	52,95
5	225,6	225,59	11936	52,91
10	225,6	225,59	11936	52,91
15	225,6	225,59	11936	52,91
20	225,6	225,59	11929	52,88
25	225,6	225,59	11929	52,88
30	225,6	225,59	11929	52,88
35	225,6	225,59	11929	52,88
40	225,6	225,59	11929	52,88
45	225,6	225,59	11929	52,88
50	225,6	225,59	11929	52,88
55	225,6	225,59	11929	52,88
60	225,6	225,59	11929	52,88
65	225,6	225,59	11929	52,88
70	225,6	225,59	11929	52,88
75	225,6	225,59	11929	52,88
80	225,6	225,59	11929	52,88
85	225,6	225,59	11929	52,88
90	225,6	225,59	11929	52,88
95	225,6	225,59	11929	52,88
100	225,6	225,59	11929	52,88
105	225,6	225,59	11929	52,88
110	225,6	225,59	11929	52,88
115	225,6	225,59	11929	53,53
120	225,6	225,59	11929	53,53