



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
VASA YRKESHÖGSKOLA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Jussi Jama

STAATTORIN LÄMMITYSKYTKENNÄT VALUTUSHARTSAUKSESSA

Tekniikka
2015

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Jussi Jama
Opinnäytetyön nimi	Staattorin lämmityskytkennät valutushartsauksessa
Vuosi	2015
Kieli	suomi
Sivumäärä	31
Ohjaaja	Vesa Verkkonen

Opinnäytetyö tehtiin Vaasan ABB Oy:n Motors & Generators-yksikköön. Lähtökohtana oli puutteelliset työohjeet hartsausosaston valutuskyllästyksessä. Työohjeessa ei ollut riittävän tarkasti ja laajasti esitetty osastolla staattorin lämmittämiin käytettävistä käämien kytkennöistä. Opinnäytetyön tarkoituksena oli piirtää kaikki hartsaamossa nykyisin tarvittavat lämmityskytkennät. Erityisesti harvinaisempien 2-kierrosstaattoreiden sekä Dahlander-staattoreiden kytkentäkuvat haluttiin koota työohjeeseen. Työn yhteyteen päätettiin myös liittää yksinkertainen laskin, joka laskee tarvittavat suuret annettujen staattorin lähtötietojen perusteella.

Tutkimus aloitettiin perehtymällä hartsauksen ja kääminnän työvaiheisiin. Hartsaamossa tarvittavien kytkentäkuvien määrä selvitettiin tutkimalla hartsaamosta valmistuneita staattoreita. Tämä tehtiin tutkimalla ABB:n käyttämän SAP-järjestelmän työjonosta kaikki valmistuneet 2-nopeusstaattorit. Näistä staattoreista eriteltiin kaikki kytkennältään poikkeavat mallit ja lisäksi kaikki tavalliset osastolla esiintyvät staattorit. Laskin toteutettiin EXCEL-ohjelmistolla ja siihen tehtiin laskentakaavat jokaiselle työnyhteydessä piirretylle lämmityskytkennälle.

Työn lopputuloksena on hartsaamon tarpeet kattava kokoelma kytkentäkuvia eri staattoreille sekä EXCEL-pohjainen laskin.

Avainsanat hartsaus, kytkentäkuva, staattori

ABSTRACT

Author	Jussi Jama
Title	Heating Connections in Trickling Impregnation
Year	2015
Language	Finnish
Pages	31
Name of Supervisor	Vesa Verkkonen

This thesis was made for ABB's Motors & Generators -Division. The basis for the work was insufficient working instructions for the trickling stage. In the working instructions, connections for heating the stator were not properly and fully stated. Especially the heating connections for the two-speedstators were insufficient. The objective of the thesis was to design all of the needed connections for the stators that are manufactured at the impregnation unit. In addition to the connection diagrams a simple calculating program was designed that calculates the needed measurements for the heating process.

The research was started by getting to know the work procedures at the winding and impregnation units. Sorting out which connection diagrams were needed for the heating process, all the manufactured stators were researched from the production work-queue of the impregnation unit from the ABB's SAP-system. From this data it was concluded how many different heating connection diagrams were needed. The calculation program was made by using the Excel Software. The calculation program calculates necessary variables for all the connection diagrams made in this thesis.

The final result of the thesis was a collection of connection diagrams that covers all the different stators that are in production at the impregnation unit.

Keywords Impregnation, connection diagram, stator

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	8
2	YRITYSESITTELY	9
	2.1 ABB Oy	9
	2.2 Motors &Generators	9
3	HARTSAUS	11
	3.1 Hartsausmenetelmät	11
	3.1.1 Valutuskyllästysmenetelmä.....	11
	3.1.2 Tyhjiökyllästysmenetelmä	11
	3.1.3 Upotuskyllästysmenetelmä	12
	3.2 Hartsien ominaisuudet	12
	3.2.1 Polyesterihartsi	12
	3.2.2 Epoksihartsi.....	12
4	ERIKOISKÄÄMITYKSET	13
	4.1.1 Kierroskoneet	13
	4.1.2 Dahlander	13
5	KYTKENTÄKUVAT	15
	5.1 Materiaalin keräys.....	15
	5.2 Kuvien piirtäminen	15
	5.3 Lämmityksen toteutus	16
	5.3.1 Kytkennän valinta	16
	5.3.2 Y/D-kytkentä.....	16
	5.3.3 Sisäinen Y-kytkentä	18
	5.3.4 Sisäinen D-kytkentä	19
	5.3.5 Y-D-kytkentä.....	19
	5.3.6 Y-Y-kytkentä.....	20
	5.3.7 Y-Y/Y-kytkentä.....	21
6	LASKENTA	22
	6.1 Lähtökohdat	22
	6.2 Laskimen toteutus	22

6.3	Käämitysten kytkentäkohtaiset laskelmat.....	25
6.3.1	Y/D-kytkentä.....	25
6.3.2	Sisäinen Y-kytkentä	26
6.3.3	Sisäinen D-kytkentä	26
6.3.4	2Y-D-kytkentä.....	28
6.3.5	Y-Y-kytkentä.....	28
6.3.6	Y-Y/Y-kytkentä.....	28
7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	29
	LÄHTEET.....	31
	LIITTEET	

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1 Y/D-kytkennän sarjakytkentä.....	17
Kuva 5. Y/D-kytkennän tähtikytkeä	17
Kuva 6. Y/D-kytkennän piirikaavio virranpuolituskytkennällä.....	18
Kuva 7. Sis. Y-kytkennän piirikaavio	18
Kuva 8. Sis. D-kytkennän piirikaavio	19
Kuva 9. Y-D-kytkennän kolmiokytkennän piirikaavio.....	20
Kuva 10. Y-Y-kytkennän tähtikytkeä	21
Kuva 11. Y-Y/Y-kytkennän lämmitys koko käämityksen tähtikytkeällä	21
Kuva 12. Laskimen lähtötiedot ja tulokset.....	23
Kuva 10. Käämien kytkennän valinta	24
Kuva 14. Kolmiokytkennän virrat.....	27

KÄYTETYT LYHENTEET

R_{20C}	Käämien yhteenlaskettu kylmävastus
R₁₆	Yhden käämin vastus
I_{MAX}	Suurin sallittu virta eli maksimivirta
N-pää	Staattorin pääty, jossa ei ole liitäntöjä
D-pää	Staattorin liitäntäpuoli
Y-kytkentä	Käämityksen tähtikytkentä
D-kytkentä	käämityksen kolmiokytkentä

1 JOHDANTO

Staattorin hartsausvaiheessa staattoria täytyy lämmittää tasavirralla, jotta staattoriin valutettu hartsi kovettuisi. Lämmitystä toteutettaessa staattori tulee kytkeä syöttölaitteeseen staattorin oman sisäisen kytkennän ja lähtötietojen mukaisella tavalla. Suurin osa kytkennöistä toteutetaan samalla tavalla, mutta poikkeuksia löytyy, erityisesti 2-kierrosstaattoreista sekä Dahlander-staattoreista.

Hartsaamon nykyisestä valutuskyllästyksen virallisesta työohjeesta löytyy seitsemän eri kytkentäkuvaa, jotka eivät kata kaikkia hartsaamossa hartsaattavia staattoreita. Työn tekemiseen on selkeä tarve ja työssä tehdyistä kuvista on hyötyä etenkin uusille hartsaajille.

Ennen lämmityksen aloittamista jokaiselle staattorille lasketaan maksimivirta, kylmävastus ja jännitealue. Nykyisessä työohjeessa on esitettynä laskentamenetelmät virran, kylmävastuksen sekä jännitealueen määrittämiseen.

Työn tavoitteena on saada hartsaamon nykyisten työohjeiden rinnalle liite, jossa on esitettynä kaikki hartsaamossa käytössä olevat lämmityskytkennät. Työssä otetaan huomioon vain nykyisin hartsaamossa esiintyvät staattorit.

Kyt kentäkuvien ulkoasussa ei pyritä noudattamaan kaikkia sähköteknisten piirustusten normeja, vaan ne on suunniteltu hartsaajien nykyisten itse piirtämiensä epävirallisten piirustusten mukaisesti, jotka ovat itse työn suorittamisen kannalta selkeitä. Kuvissa tulee esiintyä kaikki staattorin liitinmerkinnät, sisäiset kytkennät sekä myös kuva kytkennässä muodostettavasta virtapiiristä. Lisäksi kuviin merkitään hartsaajien toiveesta kytkentöjen pääkytkentäkaavioiden tunnuksat.

Kytkentäkuvien lisäksi työnyhteydessä toteutetaan EXCEL-pohjainen laskuri, jonka avulla voidaan selvittää staattorin käämityksen lämmittämiseen tarvittavat suuret. Työssä toteutettava laskin perustuu hartsaamon nykyisen työohjeen laskentakaavioiden ja sen tulee olla ulkoasultaan mahdollisimman selkeä ja helppokäyttöinen.

2 YRITYSEESITTELY

2.1 ABB Oy

ABB on yksi maailman johtavista sähkövoima- ja automaatioteknologiayhtymistä, joka työllistää noin 140 000 henkilöä 100 maassa. Suomessa ABB työllistää noin 5200 henkilöä 21 paikkakunnalla ja sen suurimmat tehdaskeskittymät sijoittuvat Helsinkiin, Vaasaan ja Porvooseen. ABB:n liikevaihto oli Suomessa vuonna 2014 n. 2,1 miljardia euroa./2/

Vaikka ABB:n historia ulottuu jo 120 vuoden päähän, on nykyinen ABB perustettu vuonna 1988. Nimi ABB on lyhenne nimistä Asea Brown Boveri joka otettiin käyttöön yritysten yhdistyessä vuonna 1988. Yksi ABB:n menestyksen avaintekijöistä on sen jatkuva panostus tutkimukseen sekä tuotekehitykseen./2/

ABB:n toiminta jakautuu viiteen divisioonaan, jotka ovat Power Products, Power Systems, Discrete Automation and Motion, Low Voltage Products ja Process Automation. Yrityksen menestyksekkäimpiin tuotteisiin kuuluvat teollisuuden moottorit, taajuusmuuttajat, tuuliturbiinigeneraattorit ja sähköverkot. Opinnäytetyö toteutettiin Vaasan ABB:n Motors & Generators - yksikköön. /2/

2.2 Motors & Generators

Kaksi kolmasosaa kaikesta maailmassa käytetystä sähköenergiasta kuluu teollisuuteen ja kaksi kolmasosaa teollisuuteen kulutetusta sähköenergiasta käytetään sähkömoottoreihin. /3/

Motors & Generators –yksikkö kuuluu ABB:n Discrete Automation and Motion divisioonaan. ABB:n sähkömoottorit ovat edelläkävijöitä energiatehokkaiden sähkömoottorien kehittämisessä ja Suomen ABB:n Motors and Generators -yksikkö keskittyy vahvasti korkean hyötysuhteen sähkömoottoreiden tuotekehitykseen. /3/

Suomessa ABB:n sähkömoottoreita valmistetaan Helsingin ja Vaasan tehtaissa, joista Vaasan tehtaalla on myös maailmanlaajuinen vastuu yhtiön valmistamista räjähdysvaarallisten tilojen moottoreista. Helsingin moottoritehtaalla valmistetaan

ja kehitetään suurjännitemoottoreita, kestopagneettimoottoreita sekä tuuli- ja dieselgeneraattoreita. ABB on johtava tuuliturbiinigenaattoreiden toimittaja./3/

3 HARTSAUS

3.1 Hartsausmenetelmät

3.1.1 Valutuskyllästysmenetelmä

Valutuskyllästysmenetelmässä 5-20 asteen kulmaan asetettu esilämmitetty staattori kyllästetään hartsilla pyörittämällä sitä hitaasti akselinsa ympäri ja valuttamalla hartsia staattorin käämitykseen staattorin N-päähän. Valutuksen jälkeen hartsi kovetetaan lämmittämällä käämitys noin 130-150 °C asteen lämpötilaan. Viimeiseksi hartseille tehdään loppukovetus 160 asteissa erillisessä uunissa. Valutuskyllästysmenetelmää tarkastellaan tarkemmin myöhemmässä luvussa, jossa tarkastellaan valutuskyllästyksen hartsausprosessia. /1/

3.1.2 Tyhjiökyllästysmenetelmä

Tyhjiökyllästysmenetelmässä yksi tai useampia staattoreita voidaan hartsata samanaikaisesti. Staattorit asetellaan vinoittain erilliseen häkkiin. Staattoreiden kaapelit suojataan kiinnittämällä ne häkkiin koholleen, jolloin estetään hartsin pääseminen kaapeleihin. Häkki nostetaan kyllästyssäiliöön. Hartsausprosessin aikana säiliöstä imetään ilma pois ja hartsi pumpataan säiliöön. Ilman poiston takia kylästyssäiliöön muodostuu alipaine, jonka ansiosta hartsi levittyy tasaisesti ja nopeasti staattorin käämityksiin tunkeutuen jokaiseen käämityksessä olevaan ilmara-koon. Tämän jälkeen hartsi valutetaan pois säiliöstä. Tyhjiökyllästysvaihe kestää noin tunnin. Häkki asetetaan 150 asteiseen uuniin noin neljäksi tunniksi, jonka aikana hartsattujen staattoreiden loppukovetus tapahtuu. /1/

Kyllästäminen tyhjiökyllästysmenetelmällä jättää koko staattorin pinnalle kauttaaltaan ohuen hartsikerroksen. Ohutta hartsikerrosta ei poisteta, koska siitä ei ole moottorille haittaa vaan sillä on jopa korroosiolta suojaava vaikutus. Tyhjiökyl-lästetyn staattorin hartsipinta on tasaisempi kuin valutuskyllästetyn staattorin, mutta kerros on ohuempi. Pienen runkokoon omaavien staattoreiden kyllästäminen on tyhjiömenetelmällä nopeaa, koska samanaikaisesti voidaan hartsata useita kappa-leita. /1/

3.1.3 Upotuskyllästysmenetelmä

Upotuskyllästysmenetelmässä staattori upotetaan kyllästysaineeseen vapaasti muutamaksi minuutiksi ja ilman annetaan poistua vapaasti eristeistä. Tämän jälkeen staattori nostetaan altaasta ja ylimääräisen hartsin annetaan valua takaisin astiaan. Myös upotuskyllästysmenetelmässä staattorin loppukovetus suoritetaan uunittamalla. /1/

3.2 Hartsien ominaisuudet

Vaasan Motors & Generators -yksikön hartsausosastolla on käytössä kaksi ominaisuuksiltaan erilaista hartsia. Yleisin osastolla käytettävä hartsi on polyesterihartsi, mutta hartsaukseen käytetään myös epoksipohjaista hartsia.

3.2.1 Polyesterihartsi

Polyesterihartsin ominaisuuksiin kuuluvat hyvä mekaanisen rasituksen kesto sekä erinomaiset eristeominaisuudet. Polyesterihartsi antaa staattorikäimitykselle hyvän pitkäkestoisen lämpösuojan. Kyllästetty materiaali saa suojan myös ympäristön olosuhteilta, kuten kosteudelta ja kuumuudelta sekä ulkopuolisilta öljyiltä ja kemikaaleilta. /1/

3.2.2 Epoksihartsi

Rakenteeltaan polyeettereitä olevat epoksimuovit on nimetty lähtöaineensa sekä välituotepolymeerissä esiintyvien epoksiryhmien mukaan. Eniten käytetyt lähtöaineet epoksimuoveissa ovat bisfenoli A sekä epikloorihydriini. Epoksimuovit ovat lähtöaineestaan riippuen joko nestemäisessä tai kiinteässä muodossa. Epoksimuovit kestävät hyvin lämpöä, liuottimia ja vettä sekä niiden kutistuminen kovetettaessa on vähäistä. Epoksihartsien vahvuuksia ovat myös sitkeys sekä luja kiinnittyminen pintoihin, kuten puuhun ja metalleihin. /1/

4 ERIKOISKÄÄMITYKSET

Työn perusteiden selvittämiseksi tutustuttiin aluksi käämintäosastoon sekä sen työvaiheisiin. Tutustumalla perusteellisesti käämintä- ja kytkentätyövaiheeseen saatiin parempi kokonaiskuva staattorin käämityksestä sekä sen sisäisistä kytkennöistä.

Työn kannalta keskeisiä käämityksiä ovat 2-kierroskoneiden sekä Dahlander-koneiden käämitykset. Molemmat ovat usean nopeuden omaavia moottoreita.

2-kierroskoneissa eri nopeudet on toteutettu kahdella erillisellä ja eri napalukuisella käämityksellä. Dahlander-moottoreissa on yksi käämitys, jossa käämitys on kytkennällisesti jaettu osiin.

4.1.1 Kierroskoneet

2-kierroskoneissa on tavallisen käämityksen sijaan kahdet erilliset eri napalukuiset käämitykset. Kahdella erillisellä käämityksellä saadaan aikaan sähkömoottori, jonka kierrosnopeutta voidaan muuttaa kytkentää muuttamalla. /3/

Kahdella erillisellä käämityksellä voidaan yhdistellä napaparilukuja vapaasti ja saada erilaisia synkroninopeusyhdistelmiä. Yleensä 2-kierrosmoottoreita mitoitettaessa nimellismomentti pyritään säilyttämään vakiona molemmilla nopeuksilla. Nimellismomentin säilyessä vakiona eri pyörimisnopeuksilla, hitaammalla pyörimisnopeudella moottorin teho pienenee. /4/

4.1.2 Dahlander

Dahlander-moottori on 2-nopeusmoottori, joka poikkeaa kuitenkin 2-kierroskoneista. Dahlander-staattoreissa ei ole 2-kierrosstaattoreiden tapaan kahta erillistä käämistystä vaan staattorin jokainen käämi on jaettu kahteen osaan väliotolla. /4/

Koneen pyörimisnopeutta voidaan muuttaa vaihtamalla syötön paikkaa. Vaihtamalla liittimiä toisen osakäämin virran suunta ja napapariluku muuttuvat. 2-

kierros koneista poiketen Dahlander-käämityksellä napaparilukua voidaan muuttaa vain suhteessa 1:2. /4/

5 KYTKENTÄKUVAT

5.1 Materiaalin keräys

Eri kytkentöjen etsiminen ja valinta aloitettiin tutkimalla hartsaamosta valmistuneita staattoreita.

2-kierrosstaattoreiden ja Dahlander-staattoreiden esiintyminen hartsaamossa ei ole säännöllistä, joten työjonoa täytyi tutkia takautuvasti. Jotta saataisiin selville yleisimmät tarvittavat kytkennät, tarkastelun aikaväliksi asetettiin 3 vuotta ja tarkasteluajankohdaksi valittiin 1.1.2012 - 31.12.2014.

Dahlander-käämityksissä lämmityskytkennän valintaan vaikuttavia ominaisuuksia ovat käämienkytkentäkaavion numero sekä liitântäkaapelien lukumäärä. 2-kierroskäämityksen lämmittämisessä kytkennän valitsemiseen vaikuttavat molempien staattoreiden sisäiset käämitykset sekä liitântäkaapelien lukumäärä.

5.2 Kuvien piirtäminen

Ennen kytkentäkuvien piirtämistä selvitettiin ulostulojen sijoittuminen staattorin kytkennässä. Sen selvittämiseksi tutustuttiin käämintäosaston kytkijän työhön. Kytkijän tehtävä on asettaa ulostulojen vaihejärjestys oikeanlaiseksi, jotta staattorin liittäminen olisi myöhemmässä kokoonpanovaiheessa mahdollisimman helppoa. Kytkennän muodostaminen aloitetaan selvittämällä staattorin pääkytkentäkaavio sekä käämintäkaavio. 2-kierroskoneiden tapauksessa täytyy molemmille käämityksille selvittää omat käämintäkaaviot, pääkytkentäkaavio on käämityksille yhteinen.

Kuvat piirrettiin CADS Planner-ohjelmalla käyttäen sen Electric Pro piirikaavio-sovellusta. Jokaiseen kuvaan piirrettiin ensin staattoria kuvaava ympyrä, johon lisättiin tarpeellinen määrä liitântöjä pääkytkentäkaavion mukaiseen järjestykseen. Lisäksi jokaiseen kuvaan piirrettiin piirikaavio, johon merkittiin katkoviivoilla käämien sisäiset kytkennät kokonaiskuvan muodostamisen helpottamiseksi.

Kuviin merkittiin käämien sisäiset kytkennät sekä hartsaajien pyynnöstä myös pääkytkentäkaaviot, joiden avulla he ovat ennen kytkentäkuvia selvittäneet tarvittavan lämmityskytkennän.

5.3 Lämmityksen toteutus

5.3.1 Kytkennän valinta

Lämmityskytkentä valitaan aina tapauskohtaisesti staattorin lähtötiedoista. Tärkein kytkentään vaikuttava asia on staattorin käämityksen kytkentä. Lisäksi kytkentään vaikuttavat liitântäkaapelien lukumäärä sekä joissakin tapauksissa myös rinnakkaisten johtimien ja liitântäkaapelien poikkipinta-ala. Jos kaapelien tai johtimien pinta-alalla laskettu maksimivirta ylittää koneen maksimivirran, voidaan käyttää joissakin tapauksissa niin sanottua virranpuolituskytkentää.

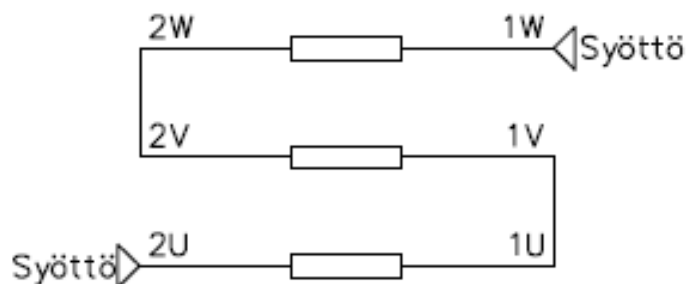
Virran laskenta tehdään joko liitântäkaapelien tai rinnakkaisjohtimien perusteella aina pienimmän pinta-alan mukaan. Pinta-alat johtimille ilmoitetaan aina työkor-tissa. 2-kierroskoneiden tapauksessa molemmille käämityksille lasketaan yksilölliset maksimivirrat.

Työkortista luetaan vaihevastus, jonka avulla määritellään lämmityksen kylmävastuksen arvo. Vaihevastuksen laskemiseen vaikuttavat käämien sisäinen kytkentä sekä lämmitykseen käytettävä kytkentätapa. Vaihevastukselle on 2-kierroskoneiden työkortissa ilmoitettu molempien käämitysten vaihevastukset ja molemmille käämityksille lasketaan omat kylmävastuksensa.

5.3.2 Y/D-kytkentä

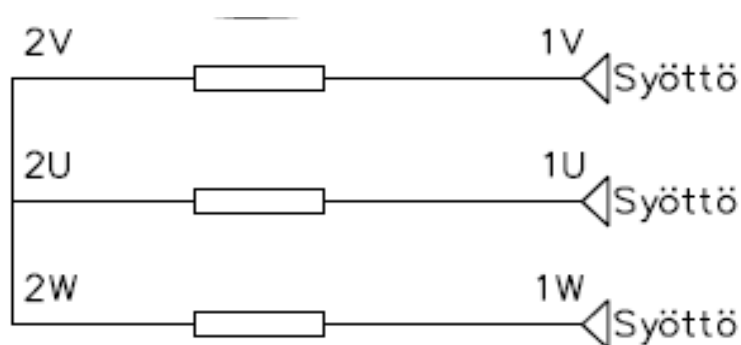
Y/D-kytkennässä jokaisen käämin päät ovat erikseen kytkettävissä, jolloin voidaan valita kytkentä joko laittamalla kaikki käämit sarjaan tai kytkemällä käämit tähtikytkentään.

Y/D-käämityksen sarjakytkentä tehdään kuvan 1 mukaisesti kytkemällä syöttö 2-puolen U-vaiheeseen sekä 1-puolen W-vaiheeseen. Vapaaksi jääneet 2-puolen W- ja V-vaiheet sekä ja 1-puolen U- ja V-vaiheet yhdistetään väliyhdisteellä. /1/



Kuva 1 Y/D-kytkennän sarjakytkentä

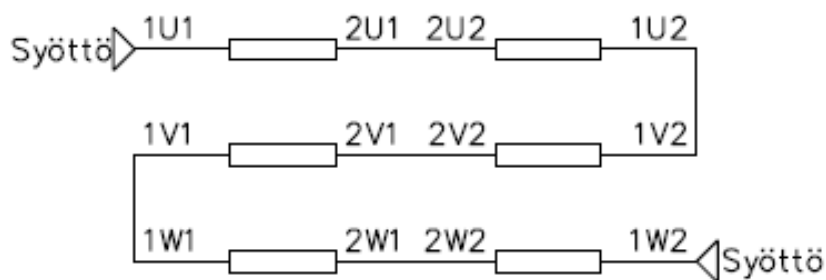
Y/D-kytkennässä on mahdollista käyttää myös kuvan 2 mukaista tähtikytkentää. Tällöin jokaisen vaiheen 1-puolen liittimeen kytketään syöttö ja vaiheiden 2-puolen liittimet kytketään yhteen väliyhdisteellä muodostaen tähtipisteen käämien 2-puolelle. Lämmitettäessä staattoria tähtikytkennällä hartsauskoneen vaihtaja kytketään päälle. Tällöin yksi vaihe on vuorollaan kylmänä ja kaksi vaihetta ovat keskenään sarjassa. /1/



Kuva 2. Y/D-kytkennän tähtikytkentä

Jos hartsattavassa staattorissa on 12 ulostuloa eli jokaista käämin napaa kohden on kaksi liittäntäkaapelia, voidaan käyttää kuvan 3 mukaista ns. "virranpuolitus"-kytkentää.

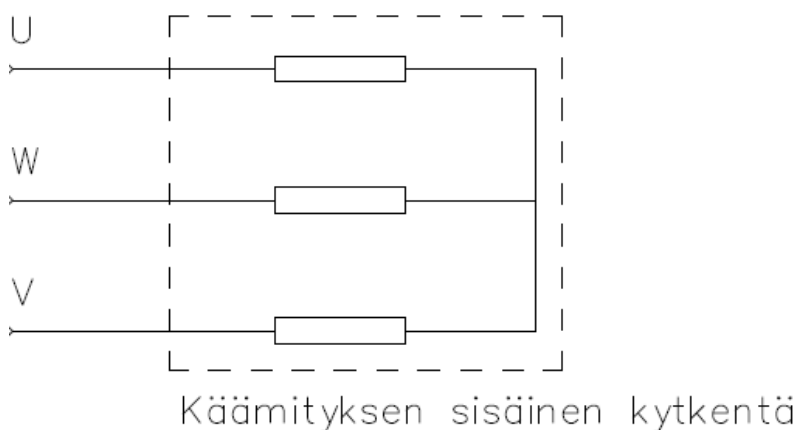
Kytkentä tehdään kytkemällä 1-puolella U2-liitin V2-liittimeen ja W1-liitin V1-liittimeen. 1-puolen vapaana oleviin U1- ja W2-liittämiin kytketään lämmityksen syöttö. Lopuksi 2 puolen liitinparit kytketään toisiinsa.



Kuva 3. Y/D-kytkennän piirikaavio virranpuolituskytkennällä

5.3.3 Sisäinen Y-kytkentä

Sisäisessä tähtikytkennässä käämityksen vaiheet ovat jo staattoria kytkettäessä kytketty sisäiseen tähtipisteeseen. Staattoria, jossa on kuvan 4 mukainen sisäinen tähtikytkentä, hartsattaessa jokaisen vaiheen liittimeen kytketään syöttö ja hartsaus koneen kytkennän vaihtaja kytketään päälle. Jos staattorissa vaiheilla on kaksi liitântäkaapelia liitetään saman vaiheenliitântäkaapelit toisiinsa väliyhdisteellä ja syötöt kytketään jokaisen vaiheparin ensimmäiseen liittimeen. /1/

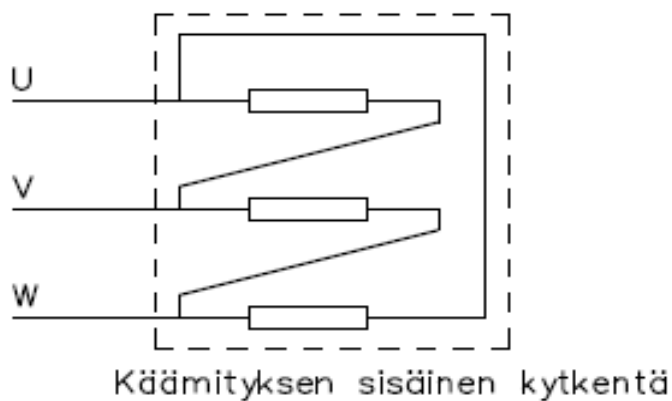


Kuva 4. Sis. Y-kytkennän piirikaavio

5.3.4 Sisäinen D-kytkentä

Sisäisessä kolmiokytkennässä staattorin käämityksen vaiheet ovat kuvan 5 mukaisessa staattorin kytkennässä kytketty sisäisesti kolmioon.

Kolmiokytkentäinen staattori liitetään hartsauskoneeseen samalla tavoin kuin tähtikytkentäinen staattori.

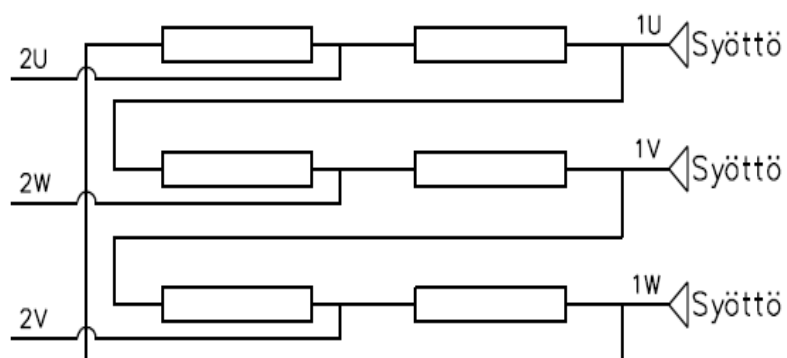


Kuva 5. Sis. D-kytkennän piirikaavio

5.3.5 Y-D-kytkentä

Y-D-kytkentä on Dahlander-moottorin kytkentä, jossa on mahdollista käyttää koko käämityksen kolmiokytkentää tai osakäämityksen tähtikytkentää. Dahlander kytkentöjen lämmityksessä ei käytetä osakäämitysten avulla tehtyjä kytkentöjä vaan kytkentöjä, jotka käyttävät koko käämistä. Näin toimittaessa staattorin käämityksen lämpeneminen ja hartsin kovettumien on tasaisempaa.

Staattorin lämmityskytkentä muodostetaan kuvan 6 mukaisesti kytkemällä syöttö 1-puolen jokaiseen vaiheeseen. 2-puolen liittimet jätetään vapaiksi. Lämmitystavaksi valitaan kolmevaiheinen lämmitys ja hartsauskoneen kytkennänvaihtaja kytketään päälle.

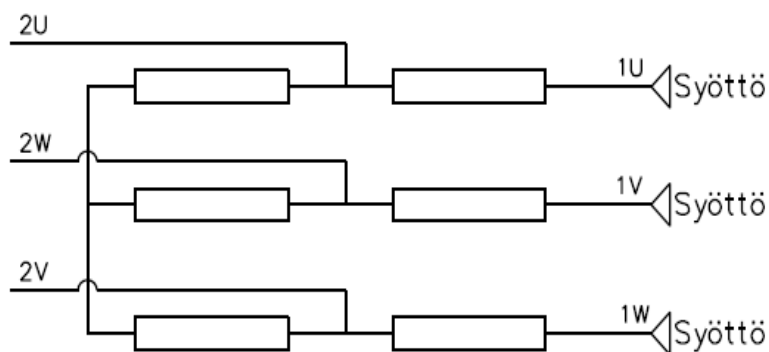


Kuva 6. Y-D-kytkennän kolmiokytkennän piirikaavio

5.3.6 Y-Y-kytkentä

Y-Y-kytkentä on Dahlander-kytkentä, joka voidaan kytkeä joko koko käämityksen tähtikytkentään tai osa käämityksen tähtikytkentään.

Lämmityskytkennän syöttö kytketään kuvan 7 mukaisesti jokaiselle 1-puolen vaiheelle ja 2-puolen liittimet jätetään kytkennässä vapaiksi. Tällä kytkennällä käämitys kytkeytyy tähtikytkentään, jolla lämmitetään staattorin koko käämitystä.

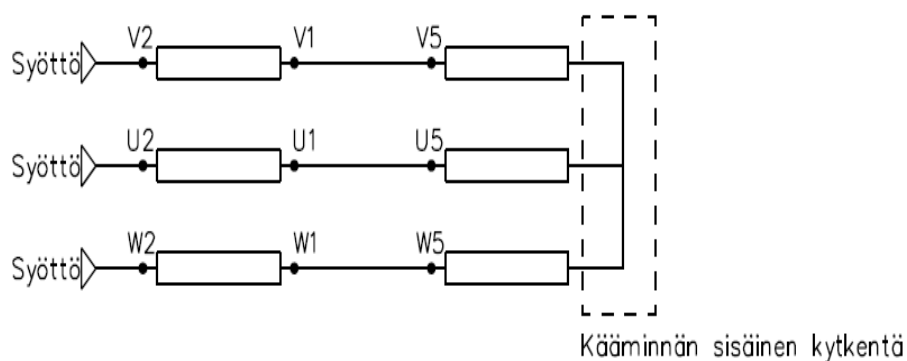


Kuva 7. Y-Y-kytkennän tähtikytkentä

5.3.7 Y-Y/Y-kytkentä

Kytkenä pitää sisällään Y/D-kytkentäisen käämityksen sekä sisäisen tähtikytkennän. Moottorille on suunniteltu käytettäväksi kolme erilaista tähtikytkentävaihtoehtoa.

Käämityksen lämmittäminen hartsaamossa on helpoin toteuttaa käyttäen nopean puolen Y-kytkentää. Kytkenä muodostetaan kuvan 8 mukaisesti liittämällä 1-puolen navat ja 5-puolen navat sarjaan vaiheittain ja kytkemällä syötön 2-puolen napoihin.



Kuva 8. Y-Y/Y-kytkennän lämmitys koko käämityksen tähtikytkennällä

6 LASKENTA

6.1 Lähtökohdat

Yhtenä työn tavoitteena oli tehdä yksinkertainen EXCEL-pohjainen laskin, jolla voidaan laskea lämmityksessä tarvittavat suureet. Laskimen lähtökohtana oli yksinkertaisuus ja helppokäyttöisyys.

Aluksi määritettiin, mitä lähtötietoja täytyy antaa, jotta voidaan laskea maksimi virta, kylmävastus ja jännite.

Lähtötietoina laskemiselle tarvitaan rinnakkaisten johtimien poikkipinta-ala, liitäntäkaapeleiden poikkipinta-ala, vaihevastus, käämien kytkentä sekä kytkentä, jolla lämmitys suoritetaan. 2-kierroskoneiden arvoja laskettaessa täytyy antaa molempien käämien lähtöarvot erikseen. /1/

6.2 Laskimen toteutus

Excel-tiedoston ensimmäiselle sivulle kerättiin kentät lähtöarvojen syöttämiseksi. Johtimien ja kaapeleiden pinta-alat sekä vaihevastukset arvot syötetään kirjoittamalla niiden arvot.

Lähtötiedot	
(1) Liit. Kaapelien Poikkip-A / mm ²	(2) Liit. Kaapelien Poikkip-A / mm ²
180	150
(1) Rinn, Joht. Kok. Poikkip-A / mm ²	(2) Rinn, Joht. Kok. Poikkip-A / mm ²
170	140
(1) RL 6 Vaihevastus / mΩ	(2) RL 6 Vaihevastus / mΩ
12	15
(1) Käämien kytkentä	(2) Käämien kytkentä
Y/D	SIS. Y
(1) Kytkentä	(2) Kytkentä
Sarjakytkentä	Kolmivaiheinen
Tulokset	
(1) Kylmävastus - R20C/mΩ	(2) Kylmävastus - R20C/mΩ
36	30
(1) Lämmitysvirta - I _{max} /A	(2) Lämmitysvirta - I _{max} /A
1700	1680
(1) Jännitealue - U/V	(2) Jännitealue - U/V
61,2	50,4

Kuva 9. Laskimen lähtötiedot ja tulokset

Kytkentöjen valintaa varten käytettiin EXCELin dropdown-list toimintoa, jonka avulla saadaan hiirellä painamalla lista, joka näyttää kaikki mahdolliset kytkennät, jotka on määritelty listan käyttämään data-alueeseen.

tua koodi, joka hakee oikean tuloksen käyttäjän valitsemalla käämien kytkennälle sekä lämmityskytkennälle.

6.3 Käämitysten kytkentäkohtaiset laskelmat

6.3.1 Y/D-kytkentä

Y/D-kytkentäistä staattoria lämmitettäessä sarjakytkennällä kokonaiskylmävastus muodostetaan laskemalla yhteen jokaisen vaiheen vaihevastukset. /1/

$$R_{20C} = 3 \times R_{16} \quad , \text{ jossa } R_{20C} = \text{kylmävastus ja } R_{16} = \text{vaihevastus} \quad (1)$$

Kytkennässä käytettävä maksimi virta I_{Max} lasketaan kertomalla joko liitäntäkaapelien poikkipinta-ala tai rinnakkaisten johdinten poikkipinta-ala virrantiheydellä 10 A/mm^2 . /1/

$$I_{Max} = 10 \text{ A/mm}^2 \times a/\text{mm}^2 \quad , \text{ jossa } a = \text{liitäntäkaapelien tai rinnakkaisten johtimien poikkipinta-ala.} \quad (2)$$

Käytettäessä tähtikytkentää Y/D-kytkentäisen käämityksen kahden vaiheen käämejä lämmitetään samanaikaisesti yhden vaiheen ollessa kylmänä. Hartsauslaitteisto vaihtaa kytkentää ohjelmoidulla aikavälillä. Kylmävastus R_{20C} lasketaan kahden käämin sarjakytkentänä. /1/

$$R_{20C} = 2 \times R_{16} \quad (3)$$

Käytettäessä vaihtajaa lämmityksen toteutuksessa yksi vaihe on vuorollaan kylmänä ja tasavirta vaikuttaa käämiin vain $2/3$ ajasta. Jotta käämiin saataisiin sama lämmittävä vaikutus kuin käytettäessä jatkuvassa lämmityksessä virrantiheyttä 10 A/mm^2 , täytyy laskennassa käyttää virrantiheyden tehollisarvoa. Virrantiheyden tehollisarvo voidaan määrittää kaavasta 5.

$$J_{10} = \sqrt{\frac{J^2 \times \frac{2}{3} \times T}{T}} \quad , \text{ jossa } J_{10} = 10 \text{ A/mm}^2, J = \text{tarvittava virrantiheys ja } T = \text{jakson aika} \quad (4)$$

Yhtälöstä 4 saadaan johdettua tarvittava virrantiheys J .

$$J = \sqrt{J_{10}^2 \times \frac{3}{2}} = \sqrt{(10 \text{ A/mm}^2)^2 \times \frac{3}{2}} = 12,25 \text{ A/mm}^2 \quad (5)$$

Valutuskyllästyksen työohjeen mukaan maksimivirta I_{\max} lasketaan käytettäessä vaihtajaa kertomalla joko liitäntäkaapelien poikkipinta-ala tai rinnakkaisten johdinten poikkipinta-ala virrantiheydellä 12 A/mm^2 . /1/

$$I_{\max} = 12 \text{ A/mm}^2 \times a/\text{mm}^2 \quad (6)$$

Kun käytetään virranpuolituskytkentää sarjakytkenässä, käämityksen vaiheissa olevat rinnakkaiset käämit muutetaan sarjaan. Kun rinnan kytketyt johdinvyyhdit muutetaan sarjakytkenäisiksi, kylmävastus vaiheessa kasvaa nelinkertaiseksi verrattuna tavallisen sarjakytkenän kylmävastukseen ja maksimivirran laskennassa rinnakkaisten johtimien poikkipinta-ala jaetaan kahdella.

Kylmävastus "virranpuolitus"-kytkennällä:

$$R_{20C} = 3 \times 4R_{16} = 12 \times R_{16} \quad (7)$$

Maksimivirta "virranpuolitus"-kytkennällä:

$$I_{\max} = (10 \text{ A/mm}^2 \times a/\text{mm}^2) / 2 \quad (8)$$

6.3.2 Sisäinen Y-kytkentä

Sisäisen tähtikytkentäisen staattorin lämmitys suoritetaan samalla tavoin kuin Y/D-kytkentäisen staattorin lämmitys käytettäessä tähtikytkentää ja vaihtajaa.

Kylmävastus lasketaan kaavan 3 mukaan ja maksimivirta lasketaan kaavalla 6.

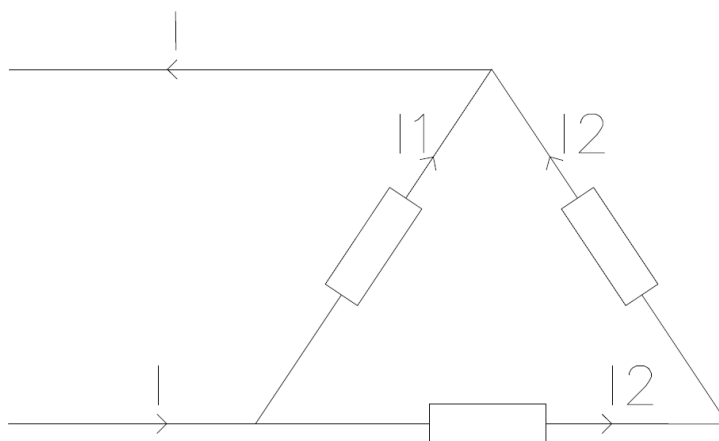
6.3.3 Sisäinen D-kytkentä

Kylmävastusta määritettäessä kahden vaiheen vaihevastukset lasketaan sarjakytkenään eli lasketaan yhteen. Kahden vaiheen sarjakytkenä lasketaan rinnan kolmannen vaiheen kanssa:

$$R_{20C} = (R_{16} \times 2R_{16}) / (R_{16} + 2R_{16}) = 2/3 \times R_{16} \quad (9)$$

Työohjeen mukaan sisäisen D-kytkentäisen staattorin lämmitykseen käytetty virta määritetään samalla tavoin kuin Y-kytkentäisen staattorin.

D-kytkennässä muodostuu virtapiiri, jossa virta ei jakaudu tasan käämien kesken. Kytkennässä muodostuu rinnankytkentä, jossa kaksi vastusta on keskenään sarjassa ja rinnan kolmannen vastuksen kanssa.



Kuva 11. Kolmiokytkennän virrat

Virta jakautuu virtapiirissä vastuksien suhteen mukaan, jolloin suurempi vaikuttava virta I_1 on kaksi kolmasosaa käytettävästä virrasta I ja virta I_2 on yhden kolmasosan virrasta I .

Kun kytkentää vaihdetaan vaihtajan avulla, jokaiseen käämiin vaikuttaa vuorollaan suurempi virta I_1 yhden kolmasosan lämmitysjästä ja pienempi virta I_2 kaksi kolmasosaa lämmitysjästä.

Kolmiokytkennässä lämmityksessä käytettävälle virrantiheyden tehollisarvolle saadaan seuraava kaava.

$$J = \sqrt{\frac{\left(\frac{2}{3} \times J\right)^2 \times \frac{1}{3} \times T + \left(\frac{1}{3} \times J\right)^2 \times \frac{2}{3} \times T}{T}}, \quad (10)$$

Jotta päästäisiin samaan lämmittävään tehollisarvoon 10 A/mm^2 kuin käytettäessä jatkuvaa lämmitystä, pitäisi maksimivirtaa laskiessa käyttää syötössä virrantihey-

den arvona 21 A/mm^2 olettaen, että syötön ja käämin poikkipinnat ovat samat. Käytettäessä vaihtajaa tulisi syötön poikkipinta-alan olla kaksinkertainen, jotta virran tiheyden tehollisarvo olisi sama syötössä ja käämissä.

Kolmiokytkentäistä staattoria lämmittäessä maksimivirran lähtökohta on työohjeessa kuitenkin sama kuin tähtikytkennässä. /1/

$$I_{\text{Max}} = 12 \text{ A/mm}^2 \times a/\text{mm}^2 \quad (6)$$

6.3.4 2Y-D-kytkentä

Käyttämällä kuvan 9 mukaista kolmiokytkentää maksimivirta ja kylmävastus muodostuvat samoin kuin sisäisessä kolmiokytkennässä.

Kylmävastus lasketaan kaavan 7 mukaan ja maksimi lämmitysvirta saadaan kaavalla 4.

6.3.5 Y-Y-kytkentä

Kuvan 10 mukaista koko käämityksen tähtikytkentää käyttämällä voidaan laskennassa käyttää työkortissa annettuja vaihevastuksen arvoja. Laskenta tapahtuu silloin samalla tavoin kuin muidenkin tähtikytkentäisten käämitysten laskeminen.

$$R_{20C} = 2 \times R_{16} \quad (3)$$

$$I_{\text{Max}} = 12 \text{ A/mm}^2 \times a/\text{mm}^2 \quad (6)$$

6.3.6 Y-Y/Y-kytkentä

Y-Y/Y-kytkentäisen staattorin lämmitys on suunniteltu toteutettavaksi käyttäen koko käämityksen tähtikytkentää jolloin virran laskenta toteutetaan samalla tavoin kuin muidenkin tähtikytkentäisten staattoreiden lämmitys. Kylmävastuksen laskemiseen käytetään kaavaa 3 ja virran laskemiseen kaavaa 6.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Tämä insinöörityö tehtiin ABB Oy:n Motors & Generators -yksikön hartsausosastolle. Työn tarkoituksena oli tehdä työohjeen liite, joka kattaa kaikki hartsaamossa nykyisin hartsattavat staattorien lämmityskytkennät.

Työn tarkoituksena oli tehdä etenkin uusille hartsaajille ohjeet, joiden avulla itenäinen työskentely kytkentöjen tekemisessä ja laskennallisten arvojen määrittelymisessä helpottuisi. Työ tuo myös helpotusta mahdollisiin tilanteisiin, joissa hartsaamon henkilöstö vaihtuu äkillisesti.

Työn toteuttaminen aloitettiin perehtymällä ensin perusteellisesti hartsaamoon sekä kääminnän työvaiheisiin. Tämän jälkeen alettiin SAP-järjestelmästä kerätä tilastoja hartsatuista staattoreista. Tutkinta-aikaväliltä koottiin kaikki erilaiset käämityypit ja niille alettiin suunnitella sekä piirtää kytkentäohjeita.

Kytkentäkuvia ei piirretty sähkötekniikan normien mukaisesti, vaan ne piirrettiin työnteon kannalta helppolukuisiksi sekä edellisiä kytkentäkuvia mukaillen. Kytkentäkuviin lisättiin kaikki vaihemerkinnät, pääkytkentäkaaviot sekä sisäiset kytkennät. Myös piirikaaviot piirrettiin jokaisen kuvan yhteyteen selventämään muodostettavaa virtapiiriä sekä kuvaamaan virran kulkua.

Kuvien jälkeen toteutettiin laskentatyökalu, jolla voidaan tarvittaessa laskea lämmitykseen tarvittavat maksimivirta ja kylmävastus. Laskin toteutettiin EXCEL-ohjelmalla ja sen ulkoasussa keskityttiin helppokäyttöisyyteen ja yksinkertaisuuteen.

Opinnäytetyön aikana kuvia käytiin yhdessä läpi hartsaajien kanssa ja otettiin huomioon työntekijöiden mielipiteet sekä parannusideat. Kuviin tehtiinkin muutoksia koko opinnäytetyön tekoajan, jotta ne soveltuisivat parhaiten käyttötarkoitukseensa.

Työntekijät pitivät mieleisenä sitä, että harvinaisemman kytkennän staattorin tullessa hartsaukseen, ei tarvitse olla täysin oman muistin varassa, vaan voi varmistaa kuvista ja laskimesta tarvittavan kytkennän sekä laskennalliset arvot.

Työn mukana ABB:lle palautetaan PDF-kuvien lisäksi myös CADS-ohjelman kytkentäkuvien pohjat, joiden avulla uusien kuvien piirtäminen vanhojen kuvien pohjia muokkaamalla on helppoa. Toivottavaa onkin, että kytkentäkuvia sekä laskinta pidettäisiin ajan tasalla hartsaamon staattorikannan vaihtuessa.

Opinnäytetyötä aloitettaessa työntekijälle annettiin vapaat kädet työn toteuttamiseen ja ainoana kriteereinä työlle oli, että siinä esiintyvät kaikki hartsaamossa esiintyvät kytkentäkuvat ja työn yhteydessä tehdään laskin lämmitysarvojen laskemiseen.

Nämä annetut lähtökohdat täyttyvät. Tarvittavat kuvat piirrettiin ja niiden piirtämisessä kyseltiin mielipiteitä työntekijöiltä, joiden käyttöön kuvat tulevat. Kuvista saatiin riittävän selkeitä ja yksiselitteisiä. Kuvista ja laskimesta saatu palaute hartsaajilta oli positiivista.

Työn aloittamista vaikeutti se, että opinnäytetyön tekijälle hartsaus ja käämintä ei ollut ennestään tuttu aihealue. Vaikka ABB:llä on hyvät ja kattavat työhjeet jokaiseen tehtaan työvaiheeseen, työntekijöillä on hyvin paljon kokemuksen tuomaa tietoa, jota ei löydy työhjeista. Hartsaamon ja kääminnän työntekijöiden kanssa aiheeseen perusteellinen tutustuminen helpotti työn toteuttamista. Työssä käytettyjen kytkentöjen ja laskujen ollessa yksinkertaisia työtä teetti tutkittavan materiaalin runsaus.

LÄHTEET

- /1/ ABB Oy. 2015. ABB:n sisäinen tietokanta
- /2/ ABB Oy. 2015. ABB-Yhtymä. Viitattu 30.3.2015.
<http://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/yhtyma>
- /3/ ABB Oy. 2015. ABB Oy, Motors & Generators. Viitattu 30.3.2015.
<http://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa/yksikot/motors-and-generators>
- /4/ Jokinen, K. 2015. Moottorikäyttöjen ohjaus ja suojaus. Luentomateriaali. Vaasa. Vaasan Ammattikorkeakoulu.
- /5/ Seppälä, J. 2005. Polymeeritekniikan perusteet. Helsinki. Hakapaino Oy