

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikka

Tutkintotyö

Matti Jussila

SÄHKÖVERKON UUDISTUKSEN AIHEUTTAMAT MUUTOKSET
400 VOLTIN TEOLLISUUSVERKOSSA

Työn ohjaaja
Työn teettäjä
Tampere 2006

Yliopettaja Väinö Bergman
M-real Tako Board oyj, valvojana DI Jouni Luukkonen

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tekniikka ja metsätalous
Sähkövoimatekniikka

Jussila, Matti

SÄHKÖVERKON UUDISTUKSEN AIHEUTTAMAT MUUTOKSET
400 VOLTIN TEOLLISUUSVERKOSSA

Tutkintotyö
Työn ohjaaja
Työn teettäjä
Vuosi 2006

36 sivua + 10 liitesivua
Yliopettaja Väinö Bergman
M-real Tako Board Oyj, valvojana DI Jouni Luukkonen

Hakusanat:
Oikosulkuvirta
Jännitteenalenema
Selektiivisyys

TIIVISTELMÄ

Työssä tutkittiin sähköverkon ominaisuuksia muutostöiden jälkeen. Työn tarkoituksena oli laskelmilla varmistaa verkon turvallinen ja oikea toiminta muuntajan ja keskuksien uusimisen jälkeen. Kohteena oli 400 voltin vaihtosähköverkko Takon kartonkitehtaalla. Työssä mitattiin vanhan verkon kuormitustilanne. Näitä mittaustuloksia käyttäen laskettiin tarpeellisia arvoja uudistetulle verkolle. Verkon toiminta todettiin turvalliseksi ja toimivaksi. Tulokset perustuivat arvioihin sekä hetkellisiin mittaustuloksiin, joten niiden tarkkuus ei ole kovin suuri.

TAMPERE POLYTECHNIC
Department of Electrical Engineering
Electric power engineering

Jussila, Matti

THE CHANGES CAUSED BY THE REFORMATION OF AN
INDUSTRIAL 400 VOLT ELECTRICAL NETWORK

BSc thesis
Supervisor
Commissioned by
Year 2006

36 pages + 10 enclosures
Principal Lecturer Väinö Bergman
M-real Tako Board Oyj, instructor MSc Jouni Luukkonen

Keywords:
Short-circuit current
Voltage reduction
Selectivity

ABSTRACT

The aim of the study was to examine characteristics of the electrical network after modification. The idea was to make sure by counting that network will be safe and will work correctly after the change of transformer and electricity centres. Object was a 400 volt alternating current –network at paperboard mill M-real Tako Board. Loading situations were measured with old electrical network and with these findings necessary values were counted for the new plan. The function of network was found to be right and safe. The results are based on assessments and momentary measurements so they are not very accurate.

ALKUSANAT

Työn tarkoituksena on selvittää M-real Tako Board oy:n Tampereen kartonkitehtaan valaistusverkon toimivuus muutostöiden jälkeen. Verkon uudistaminen käsittää muuntajan vaihtamisen uuteen, teholtaan suurempaan muuntajaan. Uusittavia kohteita muuntajan lisäksi olivat pääkeskus ja useat alakeskukset. Työssä lasketaan uuden suunnitelman toimivuus ja suojaukset päämuuntajatasolta aina kulutuskohteille asti. Kiitokset tästä työstä kuuluu Takon kartonkitehtaalle, erityisesti DI Jouni Luukkoselle. Lisäksi haluan kiittää myös sähköinsinööri Jussi Pöysäriä NP Engineeringistä, jonka suunnittelema kuvia olen saanut käyttää työssäni.

Tampereella 20. huhtikuuta 2006
Matti Jussila

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	6
2 TAKO BOARD OYJ	7
3 TAKON KARTONKITEHTAAN VALAISTUSVERKKO	8
3.1 Vanhan tilanteen mukainen valaistusverkko	9
3.1.1 Tehon ja virtojen mittaus	10
3.1.2 Vanhan verkon kuormitustehot	12
3.1.3 Vanhan verkon kuormitusvirrat	14
3.1.4 Pitkän aikajakson mittaukset	15
3.2 Valaistusverkko uusimisen jälkeen	16
3.2.1 Impedanssit uuden verkon eri kohdissa	17
3.2.2 Laskennallinen oikosulkuvirta pääkeskuksessa V5	19
3.2.3 Laskennallinen oikosulkuvirta alakeskuksissa	20
3.2.4 Suurin oikosulkuvirta pääkeskuksessa	22
3.2.5 Keskuksilta lähtevän kaapeloinnin sallitut pituudet	23
4 JÄNNITTEENALENEMA	26
5 SELEKTIIVISYYS	29
6 YLIAALLOOT	30
6.1 yleistä	30
6.2 Harmonisten aaltojen mittaaminen	32
6.3 jännitteen harmoninen kokonaissärö	32
7 KOMPENSOINTIPATTERISTON SUUNNITTELU	34
8 TULOSTEN TARKASTELU	35
LÄHDELUETTELO	36
LIITTEET	36

1 JOHDANTO

Tässä työssä on tarkoituksena tutkia ja laskea valaistusverkkoa M-realin Tako Boardin tehtaalla. Valaistusverkkoa uudistetaan ja sen kapasiteettia lisätään. Tarpeelliseksi uudistamisen tekee vanhan muuntajan syöttämien keskuksien ikääntyminen. Samalla muuntajan kokoa suurennetaan yhdestä MVA:sta kahteen. Näin varaudutaan mahdolliseen lisätehon tarpeeseen. Projekti toteutetaan osittain kesän ja syksyn 2005 aikana sekä lopullisesti myöhemmin sopivana ajankohtana. Työssä käsitellään valaistusverkkoon liittyviä laskelmia, kuten jännitteenalenemaa, oikosulkuvirtojen riittävyyttä, selektiivisyyttä yms. vanhan ja uuden verkon osalta. Laskenta on tärkeä tehdä, jotta varmistetaan uuden verkon turvallisuus ja toimivuus. Kyseiset laskelmat kuuluvat tämän tutkintotyön piiriin.

Tutkintotyöstä on hyötyä Takon kartonkitehtaalle. Tutkiessani vanhan verkon tilaa ja laskiessani tulevaa, on eteeni tullut epäselviä asioita. Ilman tämäntapaista työtä osa epäselvistä asioista olisi saattanut jäädä huomaamatta. Itselleni työ antaa mahdollisuuden oppia lisää teollisuuden sähköverkoista sekä niihin käytettävistä laskentamenetelmistä.

2 TAKO BOARD OYJ /1/

Päättyöni tekopaikkana oli Tampereen keskustassa sijaitseva M-real Tako Board, osoite Hallituskatu 1, 33101 Tampere. Tako kuuluu M-real Oyj:n konserniin.



Kuva 1 Tako Board OYJ, Tampereen kartonkitehdas

Toimialana yrityksellä on metsäteollisuus. Tehdas perustettiin vuonna 1865, jolloin puuhiomo aloitti toimintansa. Vuonna 1932 alettiin tehtaassa valmistaa taivekartonkia. Tehtaalla on nykyään kolme kartonkikonetta, jotka tekevät päällystettyä taivekartonkia. Kartonkia käytetään pääosin erilaisten koteloiden raaka-aineena. Yleisimpiä käyttökohteita ovat erilaiset kuluttajapakkaukset, esimerkiksi savuke-, elintarvike- ja suklaapakkaukset.

Tehtaan keskeisen osan muodostavat siis kolme kartonkikonetta. Kukin kone toimii erillisenä yksikkönä. Lisäksi tehtaalla on oma voimalansa, josta tehdas saa sähköä ja höyryä toimintaansa. Käytetystä sähköstä (180 000 MWh/a) 41 % tuotetaan omassa voimalassa. Kartongin valmistusmateriaalina käytetty CTMP-massa (Chemical ThermoMechanical Pulping) eli kemikumahierre tulee nykyään M-realin Lielahden yksiköstä konsernin sellutehtaalta. Lisäksi tehtaaseen kuuluu ns. pastakeittiö, jossa valmistetaan kartongin pinnoitukseen tarvittava pasta. Lopputuotteen viimeinen vaihe tehtaalla on viimeistely, jossa valmiit kartonkirullat leikataan kahdella pituusleikkurilla rulliksi tai kuudella arkkileikkureilla asiakkaan haluamiin arkkikokoihin. Tämän jälkeen valmiit tuotteet pakataan huolellisesti ja kuljetetaan tehtaalta Viinikassa sijaitsevan terminaalin kautta eteenpäin.

Näiden tuotanto-osastojen lisäksi tehtaalla on oma laboratorio, jossa tarkkaillaan jatkuvasti mm. kartongin laatua. Myös erilaiset kunnossapito-osastot kuuluvat tehtaan toimintaan. Itselleni merkittävin on automaatio-osasto, josta olen saanut niin harjoittelu- kuin kesätyöpaikankin. Myös tämä päättötyö liittyy automaatio-osaston toimintaan.

Tehtaan nykyinen tuotantokapasiteetti on noin 250 000 tonnia taivekartonkia vuodessa. Tehdas työllistää noin 400 henkeä. Lisäksi mielenkiintoisena yksityiskohtana kerrottakoon, että tehtaan lattiapinta-ala on noin 6,2 ha tontin pinta-ala ollessa vain 2,05 ha.

3 TAKON KARTONKITEHTAAN VALAISTUSVERKKO

Tehtaan varsinaisen tuotannon käytössä on prosessisähköverkko, jonka pääjännite on 500 V ja taajuus 50 Hz. Verkko on maasta erotettu (IT). Suurimmat koneet ja kuormat kohdistuvat siis luonnollisesti siihen. Valaistusverkon, joka on siis 3-vaiheinen vaihtosähköverkko (230/400 V, 50 Hz, TN-C-S), kuormitus koostuu pienistä yksittäisistä kuormituksista. Nimitys valaistusverkko on siinä mielessä

harhaanjohtava, että siihen on kytketty tehtaan lähes kaikki laitteet, jotka käyttävät kyseistä jännitettä. Näiden verkkojen lisäksi tehtaalla on myös erillinen huoltosähköverkko (400 V, 50 Hz, TN-S).

3.1 Vanhan tilanteen mukainen valaistusverkko

Koko tehtaan syöttö saadaan Tampereen sähkölaitokselta Ratinan sähkönjakeluasemalta, josta sähkö tuodaan 20 kV:n linjalla Tammerkosken loppupään läheisyydessä sijaitseville muuntajille kolmella erillisellä linjalla. Päämuuntaja PM3 (20/5,3 kV) syöttää TAKO 3:a. PM3-muuntajan näennäisteho on 20 MVA. Keskuksessa TAKO 3 lähdössä 20 oli kytkettynä vanha jakelumuuntaja VB. Muuntaja syöttää keskuksia V1 ja V4.



Kuva 2 Pääkeskus V1 (ST216)



Kuva 3 Pääkeskus V4 (ST207)

Alakeskuksien katkaisijat on sijoitettu keskushuoneeseen ST206. Katkaisijat ovat vanhanaikaiset, joten niiden uusiminen on ajankohtaista (kuva 4).

Keskus V1 (kuvassa 2) sijaitsee sähkötilassa (ST216). Keskus on vanha, ja sen käytön jatkaminen ei ole mielekästä.

Pääkeskus V4 (kuva 3) sijaitsee tehtaan toisessa kerroksessa tilassa ST207. Tämä keskus on niin ikään vanhanaikainen eikä siten sovellu käytettäväksi uudistetussa verkossa.

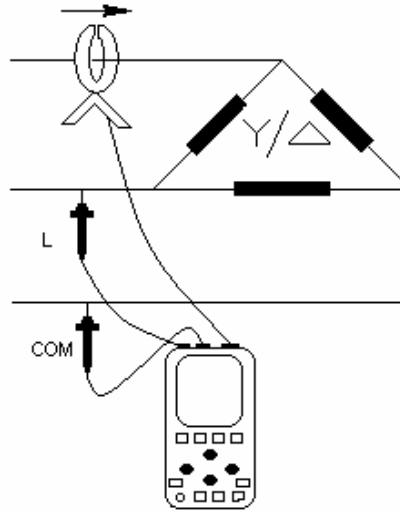


Kuva 4 Kuvasarja vanhasta katkaisijahuoneesta (ST206)

3.1.1 Tehon ja virtojen mittaaminen

Tehon ja virtojen mittaamiseksi täytyi tehdä kuvan 5 mukainen kytkentä. Mittaukset suoritettiin Fluke Power Quality Analyzer 43B -mittarilla, jonka tarkkuus ja ominaisuudet on esitelty taulukossa 1. Mittaustekniikka on siis yksinkertainen. Vaihevirtoja mitattaessa kytkettiin ainoastaan pihtimittari oikein päin haluttuun vaiheeseen. Virrat mitattiin vaihe-, nolla- ja suojajohtimista. Saadut tulokset taulukoitiin. Lisäksi kuvan mukaisella kytkennällä pystyttiin mittaamaan 3-vaiheinen

teho (lois- ja pätöteho). Mikäli johdotus oli tehty siten, että jokaista vaihetta kohden oli useampia johtimia, saatiin vaiheen kokonaisvirta kertomalla yhden johtimen virta johtimien lukumäärällä. Tämä tietysti edellytti sitä, että johtimet olivat samanlaisia ja näin ollen virta jakautuu tasan niiden kesken.



Kuva 5 Mittauskytkentä

Yleensä johdotuksessa käytetään useaa johdinta tilanteessa, jossa poikkipinta-alaa halutaan enemmän. Etuna yhteen vahvempaan johtimeen nähden on pieni taivutussäde. Tällöin johtimen vetäminen ahtaissa johtokanavissa on mahdollista. Lisäksi useampaa johdinta käytettäessä kuormitettavuus poikkipinta-alaan nähden kasvaa verrattuna yhteen vahvaan johtimeen.

Kaapeloinnin hintaan ei sanottavaa eroa tule, käytetään sitten useaa johdinta vaihetta kohden tai yhtä isoa (tarkastettu Kokkolan sähkötarvikkeen hinnastosta osoitteesta <http://www.kokkolan-sahkotarvike.fi/hinnasto.pdf> [lainattu 13.1.2006]). Oikea kaapelimetrimin hinta-yksikkö on €/mm².

Taulukko 1 Fluke 43B -mittarin tekniset tiedot

Fluke Power Quality Analyzer 43	
Pienin syöttöjännite	4 V huipusta huippuun
Jännitteen mitta-alueet	5-500 V $\pm(1\% +10 \text{ lukemaa})$
Virran mitta-alueet	50 A -500 kA $\pm(1\% +10 \text{ lukemaa})$
Teho	Total 250 W -250 mW $\pm(2\% +6 \text{ lukemaa})$
	Fundamental 250 W -250 mW $\pm(4\% +6 \text{ lukemaa})$
Harmoniset yliaallot Vrms/lrms	Fundamental $\pm(3\% +2 \text{ lukemaa})$
Harmoniset yliaallot W	Fundamental $\pm(5\% +10 \text{ lukemaa})$
Perustaajuuden alue	$\pm 0,25 \text{ Hz}$

3.1.2 Vanhan verkon kuormitustehot

Vanhan valaistusverkon tilanne kartoitettiin 14.10.05 sekä 28.10.05, jolloin koko tuotanto oli tehtaalla käytössä. Mittaukset suoritettiin vanhoista keskuksista.

Pääkeskuksista mitattiin myös joidenkin alakeskusten kuormitustilanne, mikäli sen mittaaminen oli helppoa ja turvallista. Syötöistä mitattiin aluksi vaiheiden virrat. Näin saatiin selville, kuinka tasaisesti lähtö kuormittaa muuntajaa. Koska keskuksien perässä oli erillisiä lähtöjä, joista moni oli yksivaiheinen, eri vaihevirroissa oli suuriakin eroja. Lisäksi kuormitus mitattiin satunnaisella hetkellä, jolloin tuloksista ei voida tehdä tarkkoja päätelmiä. Suuntaa antavina niitä voidaan kuitenkin pitää.

Koska vaihevirratt olivat erisuuruisia keskusten eri vaiheissa, kolmivaihemittauksia ei voi pitää kovin luotettavana. Tarkahko tulos tehoista saadaan laskemalla vaihetehot yhteen. Seuraavassa taulukossa ovat eri keskuksien vaihetehot ja niiden summat.

Keskuksien V1 ja V4 lähtöjen kuormitustehot ovat taulukossa 2.

Taulukko 2 Vanhan järjestelmän mitatut tehot

		Tehot vaiheittain								
		Vaihe 1		Vaihe 2		Vaihe 3		Ryhmiä kok. tehot		
Keskus, jota syöttää muuntaja UB	ST -tila	Pätöteho P [kW]	Loisteho Q [kvar]	Pätöteho P [kW]	Loisteho Q [kvar]	Pätöteho P [kW]	Loisteho Q [kvar]	Näennäisteho S [kVA]	Pätöteho P [kW]	Loisteho Q [kvar]
V1	216	98,3	50,3	86,0	44,0	95,0	48,7	313,7	279,2	143,0
V1.2	305	11,7	13,7	9,3	10,9	11,0	12,8	49,3	32,0	37,4
V1.9	AT400	1,7	0,7	1,7	0,7	1,6	0,6	5,3	4,9	2,0
V1.11	AT301	3,1	1,4	1,9	0,9	1,5	0,7	7,1	6,5	3,0
V1.15	5kr. kont	8,0	7,7	8,0	7,7	4,4	4,2	28,4	20,5	19,7
V1.16	302	10,8	9,5	11,7	10,3	9,7	8,5	42,9	32,2	28,4
V1.17	304	13,4	10,1	11,6	8,7	12,5	9,4	46,9	37,5	28,2
V1.21	303	7,7	6,6	7,7	6,6	9,4	8,1	32,7	24,8	21,2
V1.22	216	24,4	0,0	34,0	0,0	29,8	0,0	88,2	88,2	0,0
V1.23	sos.rak	8,8	1,2	7,6	1,1	10,5	1,5	27,1	26,9	3,8
V1.24	st220 1.kr sos	2,7	1,5	2,6	1,5	1,5	0,9	7,9	6,9	3,9
V4	207	88,3	66,2	66,2	49,7	72,9	54,6	284,3	227,4	170,6
V4.1	207	32,8	32,6	28,7	28,4	32,6	32,3	132,5	94,1	93,3
V4.2	ruokala	9,0	1,8	10,1	2,1	11,0	2,2	30,8	30,2	6,1
V4.3	207	13,3	2,7	10,8	2,2	13,5	2,7	38,4	37,6	7,6
V4.4	101	23,9	12,3	28,0	14,4	26,6	13,6	88,3	78,6	40,3

Taulukon arvot on mitattu satunnaisena aikana, jolloin kuitenkin koko tehtaan toiminta on ollut käynnissä. Mittaukset tehtiin 14.10.2005 klo 7-13 ja 28.10.2005 klo 7-12. Taulukon arvot on saatu mittaamalla erikseen kunkin vaiheen kuormitusvirta sekä yhteisesti kolmivaihemittauksella $\cos \varphi$. Mittauksien virherajat tutkitaan myöhemmin kokeella, jossa satunnaisesti valitun lähdön kuormitusvaihtelut mitataan pitkällä aikavälillä. Tällöin saadaan käsitys, kuinka suuria eroavaisuuksia kuormituksessa tapahtuu.

3.1.3 Vanhan verkon kuormitusvirrat

Taulukossa 3 on esitetty mittauksessa saadut virta-arvot sekä syöttöjen pääsulakkeiden koot. Taulukkoon on koottu vain syötöt, jotka lähtevät suoraan pääkeskuksilta V1 ja V4. Kaikki mitatut virrat on taulukoitu liitteessä 1. Lähdöt, joista mittaustuloksia ei ole esitetty, olivat tyhjiä.

Taulukko 3 Vanhan verkon kuormitusvirrat

keskus	ST-tila	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	Summa- virta [A]	I_{nolla} [A]	I_{kevi} [A]	Sulakekoko I_N /A
V1	216	480	420	464	1364	112		
V1.2	305	78,5	62,2	73,5	214	7,5	8	100
V1.9	AT400	7,8	7,8	7,5	23,1		0,7	35
V1.11	AT301	15	9	7	31	12,5	1,5	63
V1.15	5kr. kont	48,5	48,5	26,5	124	8,5		125
V1.16	302	62,5	68	56	187	13,5		250
V1.17	304	73	63	68	204	8,5		125
V1.21	303	44	44	54	142			100
V1.22	216	106	148	130	384	19	20	250
V1.23	sos.rak	38,5	33,5	46	118		0,9	125
V1.24	st220 1.kr sos	13,5	13,2	7,7	34,4		2	100
V4	207	480	360	396	1236			
V4.1	207	201	176	200	576	0,3		250
V4.2	ruokala	40	45	49	134	8		250
V4.3	207	59	48	60	167			400
V4.4	101	117	137	130	384			315

Taulukosta huomataan, että keskuksien lähdöt ovat yleensä suhteellisen vähän kuormitettuja. Suurin syy tähän lienee se, että näiden vanhojen keskuksien syöttöjä ei ole otettu käyttöön enää aikoihin, vaan syötöt on otettu uudemmista keskuksista. Kaikki lähtöjen sulakkeet olivat ns. gG-tyyppin kahvasulakkeita. Kyseinen sulaketyyppi on tarkoitettu yleiskäyttöön. G tarkoittaa, että sulake soveltuu johdon suojaukseen, ja g kertoo sen soveltuvan sekä ylikuormitus- että oikosulkusuojaukseen. Lähdöistä on satunnaisesti löydetty myös aM-sulakkeita, jotka eivät kuitenkaan sovellu tämän kaltaisiin lähtöihin. Ne ovat tarkoitettu käytettäväksi moottorilähdöissä.

3.1.4 Pitkän aikajakson mittaukset

Pidempi mittausjakso toteutettiin 17.3 klo 12:00–20.3.06 klo 11:00. Mitattavaksi lähdeksi valittiin vanha lähtö V4.3, jossa tiedettiin olevan kuormitusvaihtelua. Koska kuormitusmuutokset olivat suhteellisen samankaltaisia koko mittausjakson aikana, otettiin jännitteen ja virran keskiarvot vain mittauksen viimeisen vuorokauden ajalta eli 19.3 klo 11:00–20.3 klo 11:00. Vaiheen L3 jännitteen keskiarvo oli 234,6 V ja saman vaiheen kuormitusvirran keskiarvo 53,4 A. Minimi- ja maksimi-arvot katsottiin koko mittausjakson ajalta eli alkaen 17.3 klo 12:00. Jännitteen maksimi-arvo tällä aikavälillä oli 238,4 V ja minimi 227,8 V. Vaihteluväli oli siis 10,6 V.

Kun mitattua jännitettä verrataan nimellisjännitteeseen, saadaan vaihteluille seuraavat prosenttiluvut.

- jännitteen ylitys suhteessa nimelliseen on

$$U_{\max\%} = \frac{U_{\max} - U_{\text{nim}}}{U_{\text{nim}}} \cdot 100\% = \frac{238,4 \text{ V} - 230,0 \text{ V}}{230,0 \text{ V}} \cdot 100\% \approx 3,67\%$$

- jännitteen alitus suhteessa nimelliseen on

$$U_{\max\%} = \frac{U_{\text{nim}} - U_{\min}}{U_{\text{nim}}} \cdot 100\% = \frac{230,0 \text{ V} - 227,8 \text{ V}}{230,0 \text{ V}} \cdot 100\% \approx 0,96\%$$

Näistä laskuista huomataan, että syöttöjännite keskuksen V4.3 kolmosvaiheessa on tyypillinen keskuksille. Standardin SFS 50160 mukaan jännitteen tulisi olla $U_n \pm 10\%$ 95 % ajasta ja $U_n +10\% / -15\%$ 100 % ajasta. Jännite on korkealaatuista, mikäli se pysyy koko ajan välillä 225-235 V ja normaalilaatuista pysyessään välillä 207-244 V. Tämän keskuksen perään kytkettävä syöttöjohto voisi aiheuttaa noin 9 % jännitteenaleneman, ennen kuin siitä mahdollisesti aiheutuisi ongelmia.

Kuormitusvirta todettiin olevan 60 A varsinaisessa mittaustilanteessa 14.10.05. Vuorokauden keskiarvoksi saatiin kuitenkin 53,4 A. Mikäli vuorokauden mittaustulosta pidetään tarkkana lukuna, saadaan suhteelliseksi mittausvirheeksi

$$\text{virheprosentti} = \frac{I_{\text{tarkka}} - I_{\text{mittaus}}}{U_{\text{tarkka}}} \cdot 100 \% = \frac{60 \text{ A} - 53,4 \text{ A}}{60 \text{ A}} \cdot 100 \% \approx 11 \%$$

Mitattuihin arvoihin voidaan tämän perusteella olettaa 11 % virhemarginaalia. Tämä tulos on vain suuntaa-antava. Hetkellisen kuormituksen tila verrattuna jatkuvan tilan keskiarvoon on mahdotonta tutkia tarkasti tämän kaltaisessa yleisverkossa. Mittauksessa saadut arvot ja Fluke 43B –mittarin kuva on liitteessä 2.

3.2 Valaistusverkko uusimisen jälkeen

Keskuksessa TAKO 3 lähdössä 20 on kytkettynä vanha syöttömuuntaja VB, joka poistetaan käytöstä uuden verkon käyttöönoton jälkeen. VB:n korvaa uusi syöttömuuntaja VC, jota niin ikään syötetään TAKO 3:sta. VC on teholtaan kaksi kertaa suurempi kuin poistuva muuntaja eli 2 MVA. Uutta muuntajaa syötetään lähdöstä 5. Lähtö jäi tyhjäksi kesällä 2005, kun hiokkeen tekeminen tehtaalla lopetettiin ja tähän käyttöön tarkoitetut hiomakivet poistettiin. Uusi piirikaavio on liitteessä 3. Piirikaavion on piirtänyt ja suunnitellut Jussi Pöysäri NP Engineeringiltä. Hän on antanut minulle luvan käyttää kuvaa tässä päättötyössä. Liitteessä 4 on muuntajan tekninen erittely. Muuntajan kuormana olevat tehot ovat taulukoitu liitteessä 5.

3.2.1 Impedanssit uuden verkon eri kohdissa

Impedanssien laskukaavat ovat yleisiä sähkötekniikan kaavoja /2/.

Oikosulkuvirta I_{th} keskijännitepuolella (5,1 kV) on TAKO 3:ssa mitattu 17,8 kA:ksi (Ekvivalenttinen terminen) sekä yhden sekunnin oikosulkuvirta I_{1s} 11,3 kA:ksi.

Symmetrinen alkuoikosulkuvirta I_k'' on mitattu olevan 19,8 kA. Alkuoikosulkuvirtaa käytetään laskettaessa verkon oikosulkuimpedanssia Z_k .

Verkon maksimi oikosulkuimpedanssi

$$Z_{k \max} = \frac{c_{\max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I_k''} = \frac{1,1 \cdot 5100 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 19800 \text{ A}} = 0,1636 \Omega.$$

Verkon minimi oikosulkuimpedanssi

$$Z_{k \min} = \frac{c_{\min} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I_k''} = \frac{1,0 \cdot 5100 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 19800 \text{ A}} = 0,1487 \Omega.$$

Riittävän nopean suojauksen kannalta kiinnostava oikosulkuvirta on pienin mahdollinen. Näin ollen käytetään verkon maksimioikosulkuimpedanssia laskuissa.

Verkon oikosulkuimpedanssi jaetaan kahteen komponenttiin:

$$R_k = 0,1 \cdot Z_k = 0,1 \cdot 0,1636 \Omega = 0,01636 \Omega$$

$$X_k = 0,995 \cdot Z_k = 0,995 \cdot 0,1636 \Omega = 0,16276 \Omega.$$

Tällöin verkon impedanssia voidaan käyttää muun muassa oikosulkuvirtojen laskennassa.

Verkon ominaisoikosulkuteho

$$S_k'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_k'' = \sqrt{3} \cdot 5100 \text{ V} \cdot 19800 \text{ A} = 174,9 \text{ MVA}.$$

Verkon impedanssin (Z_{verkko}) komponentit redusoidaan 400 V:n jännitepuolelle:

$$R'_{k0,4} = \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 \cdot R_k = \left(\frac{400 \text{ V}}{5100 \text{ V}} \right)^2 \cdot 0,01636 \Omega = 0,101 \text{ m}\Omega$$

$$X'_{k0,4} = \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 \cdot X_k = \left(\frac{400}{5100} \right)^2 \cdot 0,1628 \Omega = 1,001 \text{ m}\Omega.$$

Uuden 2 MVA:n muuntajan (ABB DTE 200/7.2) nimellisarvot ovat (liite 4).

$$I_{2n} = 2886,75 \text{ A}$$

$$S_n = 2000 \text{ kVA}$$

$$z_k = 6,22 \%$$

$$U_{2n} = 400 \text{ V}$$

$$U_{1n} = 5100 \text{ V}$$

Muuntajan häviötehot on otettu ABB:n taulukosta (lähde /3/).

Muuntajan oikosulkuimpedanssi alajännitepuolelta nähtynä on

$$Z_{\text{muuntaja}} = \frac{z_k}{100\%} \cdot \frac{U_{2n}^2}{S_n} = \frac{6,22 \%}{100 \%} \cdot \frac{(400 \text{ V})^2}{2000000 \text{ VA}} = 4,976 \text{ m}\Omega.$$

Muuntajan resistanssi alajännitepuolelta nähtynä

$$R_T = \frac{P_{\text{krT}}}{3 \cdot I_{2n}^2},$$

jossa

- P_{krT} = muuntajan kuormitushäviöt muuntajan lämpötilan ollessa 75 °C (lähde /3/)

- I_{2n} = muuntajan toision nimellisvirta

$$R_T = \frac{P_{\text{krT}}}{3 \cdot I_{2n}^2} = \frac{16200 \text{ W}}{3 \cdot (2886,75 \text{ A})^2} = 0,648 \text{ m}\Omega.$$

Muuntajan reaktanssi lasketaan kaavasta

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{(4,976 \text{ m}\Omega)^2 - (0,648 \text{ m}\Omega)^2} = 4,934 \text{ m}\Omega.$$

Verkon johtimien impedanssit lasketaan lausekkeesta $Z=2 \cdot (r+jx) \cdot l$. Kerroin kaksi tulee siitä, että yksivaiheisen oikosulkuvirta kulkee vaihe- ja nollajohtimen muodostamassa piirissä.

Arvot on otettu Nokia kaapeli, Energiakaapelit -kuvastosta. Saadut arvot ovat kompleksilukuja, joissa reaaliosan aiheuttaa kaapelin resistanssi ja imaginääriosan reaktanssi vaihetta kohden.

Kaapelitiedot ovat liitteessä 6.

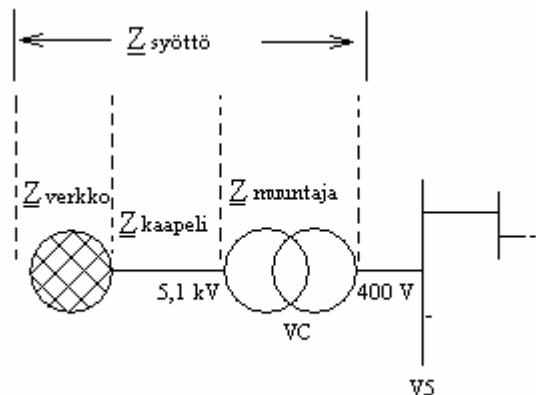
Muuntajan VC syöttökaapelista AHXCMK-WTC on taulukoitu todelliset ja redusoidut arvot (5,1 kV \rightarrow 400 V).

Syöttökaapelin impedanssi on määritetty 65 °C ja muiden kaapeleiden 70 °C lämpötilassa.

3.2.2 Laskennallinen oikosulkuvirta pääkeskuksessa V5

Verkossa ennen kiskostoa V5 impedanssia aiheuttaa taustaverkko (5 kV) ja muuntaja VC. Kiskosto muuntajalta pääkeskukseen on pituudeltaan muutaman metrin, joten sen huomioiminen oikosulkuvirtojen laskennassa on merkityksetön.

Tilanne on esitetty periaatetasolla kuvassa 6.



Kuva 6 Periaatekuva verkon impedansseista

Yksivaiheinen oikosulkuvirta lasketaan seuraavan kaavan avulla [2].

$$\underline{I}_k = \frac{c \cdot \underline{U}}{(\underline{Z}_{\text{verkko}} + \underline{Z}_{\text{kaapeli}} + \underline{Z}_{\text{muuntaja}}) \cdot \sqrt{3}}$$

- \underline{I}_k on pienin yksivaiheinen oikosulkuvirta
- Kerroin $c = 0,95$ ottaa huomioon jännitteenaleneman liittimissä, johdoissa, sulakkeissa, kytkimissä, jne.
- \underline{U} on pääjännite.

Johdinimpedansseina on käytetty arvoja johtimen ollessa $+ 70 \text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötilassa.

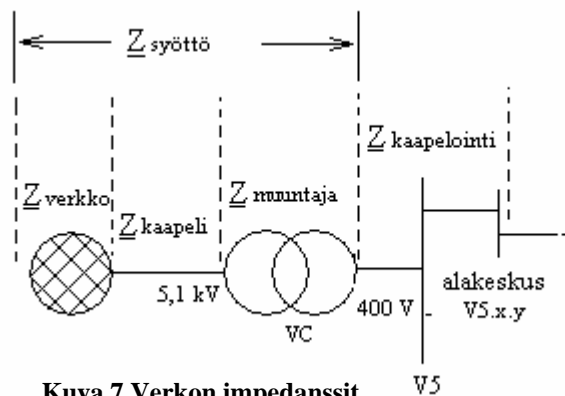
Yksivaiheisen oikosulkuvirran itseisarvo toisiossa, eli 400 V:n jänniteportaassa on

$$\underline{I}_k = \frac{0,95 \cdot 400 \text{ V}}{((0,101 + j1,001) \text{ m}\Omega + (0,089 + j0,041) \text{ m}\Omega + (0,648 + j4,934) \text{ m}\Omega) \cdot \sqrt{3}}$$

$$= 19918,7 \angle -82^\circ \text{ A}.$$

3.2.3 Laskennallinen oikosulkuvirta alakeskuksissa

Alakeskuksessa oikosulkuvirran kohtaama impedanssiketju on muuten sama kuin pääkeskuksenkin, mutta lisänä siihen tulee keskuksien V5-V5.X välinen kaapelointi (kuva 7).



Kuva 7 Verkon impedanssit

Alakeskuksien yksivaiheiset oikosulkuvirrat ovat taulukossa ampeereina:

ne on laskettu yhtälöstä

$$\underline{I}_k = \frac{c \cdot \underline{U}}{\left(\underline{Z}_{\text{verkko}} + \underline{Z}_{\text{kaapeli}} + \underline{Z}_{\text{muuntaja}} + \underline{Z}_{\text{kaapelointi}} \right) \cdot \sqrt{3}}$$

Oikosulkuvirrassa kiinnostava tieto on itseisarvo, joka saadaan virran

kompleksiluvusta kaavalla

$$I_k = \sqrt{I_{\text{Re}}^2 + I_{\text{Im}}^2}$$

Taulukko 4 Yksivaiheinen oikosulkuvirta pää -ja alakeskuksissa

keskus	keskusta syöttävän kaapelin resistanssi [mΩ]	keskusta syöttävän kaapelin reaktanssi [mΩ]	Kokonais-impedanssi keskuselle asti [mΩ]	oikosulkuvirta \underline{I}_k [A]	Oikosulkuvirta kulمامuodossa \underline{I}_k [A]
V5	0,044	0,020	0,837 + j 5,976	2764,0 - j 19725,9	19918,7 ∠ -82,0
V5.1	7,50	2,95	15,84 + j 11,87	4860,5 - j 3641,8	6073,5 ∠ -36,8
V5.1.1	14,96	5,78	45,76 + j 23,43	2081,2 - j 1065,5	2338,1 ∠ -27,1
V5.1.2	131,40	5,28	278,64 + j 22,42	428,6 - j 34,5	430,0 ∠ -4,6
V5.1.3	110,40	6,53	236,64 + j 24,94	502,3 - j 52,9	505,1 ∠ -6,0
V5.1.4	151,80	8,98	319,44 + j 29,84	373,0 - j 34,8	374,6 ∠ -5,3
V5.1.5	27,90	4,71	71,64 + j 21,29	1541,6 - j 458,2	1608,3 ∠ -16,6
V5.1.6	3,06	0,79	21,96 + j 13,44	3982,5 - j 2437,1	4669,0 ∠ -31,5
V5.2	19,33	7,59	39,50 + j 21,16	2364,2 - j 1266,4	2682,0 ∠ -28,2
V5.2.1	53,30	7,85	146,10 + j 36,87	773,4 - j 195,2	797,6 ∠ -14,2
V5.2.2	15,99	2,36	71,48 + j 25,87	1486,6 - j 538,1	1581,0 ∠ -19,9
V5.2.3	20,00	7,85	59,50 + j 29,01	1631,9 - j 795,7	1815,6 ∠ -26,0
V5.2.4	3,23	0,75	45,96 + j 22,67	2103,4 - j 1037,3	2345,2 ∠ -26,3
V5.3	34,00	13,35	68,84 + j 32,68	1424,9 - j 676,4	1577,3 ∠ -25,4
V5.3.1	10,66	1,57	90,16 + j 35,82	1151,4 - j 457,5	1238,9 ∠ -21,7
V5.4	34,00	13,35	68,84 + j 32,68	1424,9 - j 676,4	1577,3 ∠ -25,4
V5.5	18,00	7,07	36,84 + j 20,11	2513,5 - j 1372,4	2863,7 ∠ -28,6
V5.5.6	6,00	2,36	48,84 + j 24,83	1955,7 - j 994,1	2193,9 ∠ -26,9
V5.6	30,00	11,78	60,84 + j 29,54	1598,8 - j 776,2	1777,2 ∠ -25,9
V5.7	8,00	3,14	16,84 + j 12,26	4665,3 - j 3396,8	5770,9 ∠ -36,1

Alakeskuksien lähdöissä käytetään lähes poikkeuksetta gG-tyypin sulakkeita, joiden minimivaatimukset oikosulkuvirran suhteen ovat liitteessä 7. Mikäli oikosulkuvirtaa haluttaisiin suurentaa, tarvitsisi sen edessä olevaa verkkoa vahvistaa eli pienentää jonkin yksittäisen impedanssin suuruutta. Jos oikosulkuvirta on liian suuri, tarvitsisi sitä rajoittaa esimerkiksi pienentämällä kaapeloinnin poikkipinta-alaa. Mikäli se ei ole kuormitettavuuden kannalta mahdollista, voidaan käyttää erillistä kuristinta impedanssin kasvattamiseen.

3.2.4 Suurin oikosulkuvirta pääkeskuksessa /2/

Lasketaan sysäyoikosulkuvirta I_s pääkeskuksessa V5. I_s saadaan laskettua kaavasta

$$I_s = k \cdot \sqrt{2} \cdot I_k''$$

jossa

k = kerroin, joka riippuu verkon R/X suhteesta ja on laskettavissa kaavasta

$$k = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot R / X}$$

I_k'' = symmetrinen alkuoikosulkuvirta.

I_k'' on mitattu aiemmissa mittauksissa $I_k'' = 19,8$ kA

Verkon impedanssi pääkeskuksella on $(0,837 + j5,976)$ m Ω , joten kerroin k on

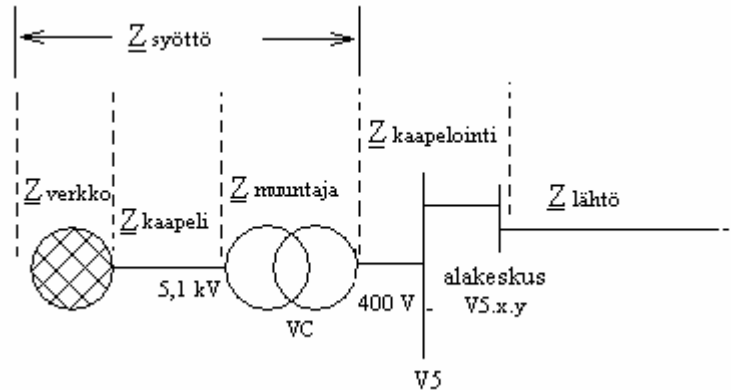
$$k = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot R / X} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot 0,837 / 5,976} = 1,664.$$

Näin ollen sysäyoikosulkuvirta pääkeskuksessa V5 on

$$I_s = k \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' = 1,664 \cdot \sqrt{2} \cdot 19,8 \text{ kA} \approx 46,6 \text{ kA}.$$

3.2.5 Keskuksilta lähtevän kaapeloinnin sallitut pituudet

Lisäksi lasketaan, kuinka pitkä kaapelointi on mahdollista tehdä kuparikaapeleilla alakeskuksilta eteenpäin. Tutkittavat pinta-alat ovat 2,5 mm² ja 6 mm². Nämä kaapelikoot ovat yleisimmin käytetyt.



Kuva 8 Impedanssit verkon eri osissa

Kaapelin enimmäispituus riippuu käytettävästä sulaketyypistä. Laskelmat tehdään 16 ja 25 ampeerin gG sulakkeille. Kyseiset sulakkeet ovat yleisimmin käytössä Takossa. Saadut arvot on esitetty taulukossa 4. Kyseisten sulakkeiden riittävän nopean toiminnan varmistavat oikosulkuvirrat ovat taulukossa (liite 7). Koska kaapelointi ja syöttöverkko ovat jo pienentäneet oikosulkuvirtaa, lasketaan jatkokaapeloinnin enimmäisimpedanssi $Z_{\text{lähtö}}$. Sulakkeen riittävän nopeaan palamiseen ei vaikuta virran kulma, vaan ainoastaan sen suuruus. Tästä syystä kaapelin pituus lasketaan itseisarvoja hyväksikäyttäen.

$$|I_k| = \frac{c \cdot \left| \frac{U}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ \right|}{|(Z_{\text{syöttö}} + Z_{\text{kaapelointi}} + Z_{\text{lähtö}})|} \Rightarrow |Z_{\text{lähtö}}| = \frac{c \cdot \left| \frac{U}{\sqrt{3}} \right|}{|I_k|} - |(Z_{\text{syöttö}} + Z_{\text{kaapelointi}})|$$

I_k on pienin yksivaiheinen oikosulkuvirta, joka aiheuttaa laukaisun sallitussa ajassa.

Kerroin c on 0,95, joka ottaa huomioon jännitteenaleneman liittimissä, johdoissa, sulakkeissa, kytkimissä, jne.

U on pääjännite [V].

$Z_{\text{syöttö}}$ on impedanssi, joka on aiheutunut verkosta pääkeskukselle asti.

$$Z_{\text{syöttö}} = Z_{\text{verkko}} + Z_{\text{kaapeli}} + Z_{\text{muuntaja}}$$

$Z_{\text{kaapelointi}}$ on impedanssi, joka on aiheutunut muuntajan ja ko. keskuksen välisestä verkon osasta.

Arvot on esitetty taulukossa 5.

Kaapelin maksimipituus saadaan kaavasta

$$l = \frac{Z_{\text{lähtö}}}{2 \cdot z} \cdot 1000 \frac{\text{m}}{\text{km}},$$

missä

l on kaapelin pituus [m]

z on kaapelin impedanssi 70 °C lämpötilassa [Ω/km]

kerroin 2 nimittäjässä tulee siitä tosiasiasta, että kaapelireitti käsittää syöttö- ja nollajohtimen.

Esimerkki Lähdön V5.1.1 kytkettävä 2,5 mm²:n kuparikaapelin enimmäispituus, kun oikosulkusuojana käytetään 16 ampeerin gG –sulaketta ja jonka pienin toimintavirta 0,4 s poiskytkentäajalla on 110 A (liitteestä 7).

Lähdön impedanssi keskukselle on laskettavissa

$$|Z_{\text{lähtö}}| = \frac{c \cdot \left| \frac{U}{\sqrt{3}} \right|}{|I_k|} - \left(Z_{\text{syöttö}} + Z_{\text{kaapelointi}} \right)$$

$$= \frac{0,95 \cdot \left| \frac{400 \text{ V}}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ \right|}{|110 \angle -27,1^\circ \text{ A}|} - |(45,76 + 23,43j)| \text{ m}\Omega \approx 1,943 \Omega.$$

Kaapelin maksimipituus saadaan kaavasta

$$l \approx \frac{Z_{\text{kaapeli}}}{2 \cdot z} \cdot 1000 \frac{\text{m}}{\text{km}} = \frac{1,943 \Omega}{2 \cdot (8,87) \Omega/\text{km}} \cdot 1000 \frac{\text{m}}{\text{km}}$$

$$\approx 109,5 \text{ m} \approx 110 \text{ m}.$$

Taulukko 5 Jatkokaapeleiden maksimipituudet eri poiskytkentäajoille ja kaapeleille

	kaapelin enimmäispituus 2,5 mm ² (gG 16 A) [m]		kaapelin enimmäispituus 6 mm ² (gG 25 A) [m]	
	0,4 s	5 s	0,4 s	5 s
Keskus				
V5	112	190	164	269
V5.1	111	189	162	267
V5.1.1	110	187	158	263
V5.1.2	97	174	127	232
V5.1.3	99	177	133	238
V5.1.4	94	172	122	227
V5.1.5	108	186	155	260
V5.1.6	111	189	162	267
V5.2	110	188	159	264
V5.2.1	104	182	145	250
V5.2.2	108	186	155	260
V5.2.3	109	187	156	261
V5.2.4	110	187	158	263
V5.3	108	186	155	260
V5.3.1	107	185	152	257
V5.4	108	186	155	260
V5.5	110	188	159	264
V5.5.1	109	187	158	263
V5.6	109	186	156	261
V5.7	111	189	162	267

Taulukon arvoista 5 sekunnin arvoja käytetään, kun lähdöstä syötetään toista keskusta. Tällöin suojaus ei huolehdi henkilöturvallisuudesta. 0,4 s laukaisuaika vaaditaan juuri henkilösuojaukseen.

Taulukosta näkee, että minimi oikosulkuvirta rajoittaa syöttöjen enimmäispituudet 2,5 mm² :n kuparikaapelille noin 94 metriin, ja 6 mm² :n kuparikaapelille 122 metriin.

Nämä arvot olivat lähdöstä V5.1.4 eli konttoreita syöttävältä alakeskuksesta.

Taulukon mukaiset kaapeleiden enimmäispituudet riittävät poikkeuksetta jokaiseen uuteen syöttöön, sillä tehtaalla on useita keskuksia, joista uusia syöttöjä voi ottaa. Jokaiselle uudelle asennukselle pitää lisäksi tehdä käyttöönottomittaukset, joissa riittämätön oikosulkuvirta viimeistään huomataan. Ohjeistuksena voi kuitenkin todeta, että mikäli uuden kuormituskohteen etäisyys on lähellä sataa metriä sitä syöttävästä alakeskuksesta, voi olla aiheellista käyttää poikkipinnaltaan suurempaa johdotusta.

4 JÄNNITTEENALENEMA

Jännitteenalenema tarkoittaa jännitteen suuruuden laskua tietyllä verkon osalla. Standardi SFS 50 160 määrittelee jännitteen ominaisuudet.

”SFS 6000:ssa on suositeltu, ettei jännitteenalenema saisi olla sähkölaitteiston liittymiskohdan ja sähkölaitteen välillä suurempi kuin 4 % sähkölaitteiston nimellisjännitteestä.” /4/

Muuntajan aiheuttama jännitealenema tarkoittaa ensiöjännitteen ja toisiojännitteen redusoitujen itseisarvojen erotusta. Johtimien impedanssit aiheuttavat myös jännitteenalenemaa.

Sähkönjakeluyhtiöillä on myös velvollisuus huolehtia siitä, että nimellisjännite pysyy sille määriteltyjen rajojen sisällä. Vaatimukset selviävät standardista SFS 50 160.

Kokonaisjännitteenalenemaa on syytä tarkkailla, jotta herkkienkin laitteiden toiminta voidaan varmistaa. /5/

Muuntajan jännitteenaleneman likiarvo lasketaan kaavasta /5/

$$U_a = |U_1| - |U_2| \approx I \cdot R_T \cdot \cos \varphi + I \cdot X_T \cdot \sin \varphi,$$

jossa

$$|U_1| = \text{ensiöjännitteen itseisarvo}$$

$$|U_2| = \text{reduoitu toisiojännitteen itseisarvo}$$

I = kuormitusvirta

R_T ja X_T = muuntajan oikosulkuresistanssi ja -reaktanssi.

Muuntajalle VC lasketaan jännitteenalenema

$$U_a \approx I \cdot R_T \cdot \cos \varphi + I \cdot X_T \cdot \sin \varphi.$$

Jännitteenalenema lasketaan vaihe kerrallaan, sillä kuormitusvirrat eroavat toisistaan hieman. Laskussa käytetyt arvot ovat mittauksien perusteella laskettu vastaamaan uuden suunnitelman mukaista tilannetta. käytetyt arvot ovat liitteessä 8.

Vaihevirrat ovat

$$I_1 = 1154,3 \text{ A}$$

$$I_2 = 1152,7 \text{ A}$$

$$I_3 = 1162,8 \text{ A}.$$

Muuntajan impedanssit 400 V jännitetasossa on laskettu kohdassa 3.2.1.

$$\cos \varphi = 0,87 \Leftrightarrow \text{ja } \sin \varphi = 0,49$$

Vaiheessa L1 syntyvä jännitteenalenema on

$$U_{aL1} \approx I_1 \cdot R_T \cdot \cos \varphi + I_1 \cdot X_T \cdot \sin \varphi$$

$$\approx 1154,3 \text{ A} \cdot 0,648 \text{ m}\Omega \cdot 0,87 + 1154,3 \text{ A} \cdot j4,934 \text{ m}\Omega \cdot 0,49 \approx 5,7 \text{ V}.$$

Samalla tavalla saadaan laskettua muiden vaiheiden jännitteenalenema

$$U_{aL2} \approx 5,7 \text{ V}$$

$$U_{aL3} \approx 5,8 \text{ V}.$$

Prosentteina jännitteenalenema on siis

$$U_{aL1} \% = \frac{U_{aL1}}{U_{Vn}} \cdot 100 \% = \frac{5,7 \text{ V}}{230 \text{ V}} \cdot 100 \% = 2,50 \%$$

$$U_{aL2} \% = 2,49 \%$$

$$U_{aL3} \% = 2,51 \% .$$

Pääkeskuksella sallittu jänniteenvaihtelu voi enimmillään olla +10/-15 %:a standardijännitteestä ($U_n = 230/400 \text{ V}$). Johtimien impedanssit saadaan taulukosta (SFS 6000-41. Arvot on ilmoitettu 70 °C:n lämpötilassa)

Kaapeliarvot saadaan taulukosta (liite 6).

Johtimien kuormitusvirrat voidaan laskea taulukon 3 (s.14) virroista. Verkon uudistuksen jälkeen virrat otetaan pääpiirikaavion (liite 3) mukaisesti.

Tulokset ovat liitteessä 8. Siihen on taulukoitu keskuksen syöttökaapelin aiheuttama jännitealenema jännitteinä (U_a) ja prosentteina ($U_{a\%}$). Lisäksi lasketaan jännitealenema muuntajalta keksukselle asti ($U_{a\% \text{ yht}}$). Tähän arvoon on summattu kaikki verkosta aiheutuneet jännitealenemat kyseiseen pisteeseen saakka.

Jännitealeneman laskennassa käytetyt virta-arvot perustuvat siis vanhojen keskuksien mittauksissa saatuihin arvoihin. Poikkeuksen tekee lähtö V5.5.6, johon vanhoja lähtöjä ei ole kytketty. Keskusta syöttävän kaapelin sulake on 250 A. Laskin ko. lähdön jännitealeneman sulakkeen nimellisvirran suuruisella kuormitusvirralla. kuormituksen $\cos\varphi$:ksi määrittelin 0,98. Tällöin kuormitus sulakkeen nimellisvirralla on mahdollista ilman, että jännitealeneman lasku antaisi liian positiivisen tuloksen. Taulukosta huomaa, että ($U_{a\% \text{ yht}}$) pysyy alle 10 %:ssa kaikkialla verkossa.

Taulukon ensimmäisellä rivillä on muuntajan jännitealeneman arvot toisiosta katsottuna. Jännitealenemaa U_{hkok} laskiessa on käytetty redusoitua jännitettä, sillä kaikkien laskussa mukana olevat arvot pitää olla saman jänniteportaan arvoja.

5 SELEKTIIVISYYS

Sähköverkossa laitetta suojaavat useat suojalaitteet. Kuormitus on kytketty alakeskuksella lähtöön, jonka sulakkeiden koot määräytyvät laitteen mukaan. Näin on suojattu laitteen syöttökaapeli ja itse laite oikosulun tai ylikuormituksen aiheuttamilta vaurioilta. Alakeskus on liitetty pääkeskukseen sulakkeiden tai katkaisijoiden kautta. Nämä suojaavat sekä keskuksen syöttökaapelia että alakeskusta itseään. Pääkeskus ja muuntaja käsitetään suojausteknisesti yhdeksi osaksi, jonka suojalaitteet on asennettu muuntajan ensiöpuolelle. Tässä tapauksessa käytetään ABB:n HPA12/640 SF6 630A:n vaunukatkaisijaa, jonka katkaisukyky on 50 kA. Verkko on suojattu lisäksi ylivirta- ja maasulkureleellä (SPAJ 141 C).

Selektiivisyys tarkoittaa sitä, että suojausketjussa lähimpänä vikaa oleva suojalaite toimii ensiksi, ja näin suojauksen toiminnasta aiheutuva häiriö jää mahdollisimman pieneksi. Suojalaitteiden tehtävänä on siis suojata verkkoa ja laitteita.

Kun sulakkeet asennetaan sarjaan, on huolehdittava, että lähempänä suojattavaa laitetta oleva sulake on ainakin yhtä virtaporrasta pienempi. Käytännössä sulakkeiden kokoeron olisi syytä olla kuitenkin kaksi virtaporrasta. Mikäli palamisen aiheuttama oikosulkuvirta on suuri, on peräkkäisten sulakkeiden välillä vain pieni ero toiminta-ajassa. Koska samantyyppiset sulakkeet voivat myös hieman poiketa toisistaan, toiminta-aikojen eron olisi syytä olla riittävä. Eräs nyrkkisääntö on, että sulakkeiden (gG) nimellisvirtojen suhteen pitäisi olla vähintään 1,6:1, jotta selektiivisyydestä voidaan olla varmoja sulakkeen valmistajasta riippumatta.

Kun sulakelähdöllistä keskusta suojataan katkaisijalla, on selektiivisyys syytä tarkastaa. Ensimmäinen keino on säätää katkaisijan terminen laukaisuarvo huomattavasti ryhmäsulakkeiden nimellisvirtaa suuremmaksi. Näin varmistetaan, että suojaus toimii selektiivisesti ainakin pienillä ylivirroilla. Kun ylivirta on suuri esimerkiksi oikosulussa, katkaisijassa toimii yleensä pikalaukaisu. Tämä pitää siis asetella sellaiseen arvoon, jolla suurimman kuormasulakkeen toiminta-aika on enintään 30 ms. /7/

Verkon suojauksen selektiivisyys tarkistettiin Schneider Electricin Ecodial 3 -ohjelmalla. Ohjelmaan luodaan pääpiirikaavio (liite 9). Verkon eri kuormitukset kuvattiin teho ja $\cos\varphi$:n avulla. Kuormien syötöt ilmoitettiin sekä pituuden että käytettävän kaapeloinnin osalta. Suojalaitteet pystyi valitsemaan siinä tapauksessa, että ohjelma tunnisti ne. Uuden verkon suojauksessa käytettiin Merlin Gerin – katkaisijoita. Nämä löytyivät ohjelman suojalaittekirjastosta. Verkkoon suunnitellut katkaisijat oli kuitenkin mitoitettu nykyiseen kuormitukseen nähden suuriksi, ja tämä pitää huomioida parametroinnissa. Kun kaikki arvot saatiin syötettyä oikeille paikoilleen, voitiin ohjelmalla laskea tulokset verkon eri pisteissä. Selektiivisyysvaatimus täyttyi tämän verkon osalta. Samaan näkee myös verkon pääkaaviota (liite 3) tarkastelemalla. Peräkkäisten sulakkeiden nimellisvirrat poikkeavat usealla virtaportaalla koko verkossa. Katkaisijat saadaan aseteltua myös siten, että niiden selektiivinen toiminta varmistuu.

6 YLIAALLOT

6.1 Yleistä

Yksi tutkittava asia oli verkossa esiintyvät harmoniset yliaallot. Niitä syntyy, kun verkkoon kytketään esimerkiksi taajuusmuuttajia, tyristori- ja diodisiltoja, hakkuriteholähteitä, tietokoneita tai kun kuormitus on epälineaarinen. Harmoniset yliaallot ovat perusaallon (50 Hz) kerrannaisia (tyypillisesti 3, 5, 7, 9 jne.) jolloin niiden taajuus voidaan laskea kaavasta

$$f = k \cdot f_n,$$

jossa

k = perusaallon kerrannainen (kokonaisluku)

f_n = verkon perustaajuus.

Jännite voi sisältää myös tasajännitekomponentin, jonka taajuus on 0 Hz.

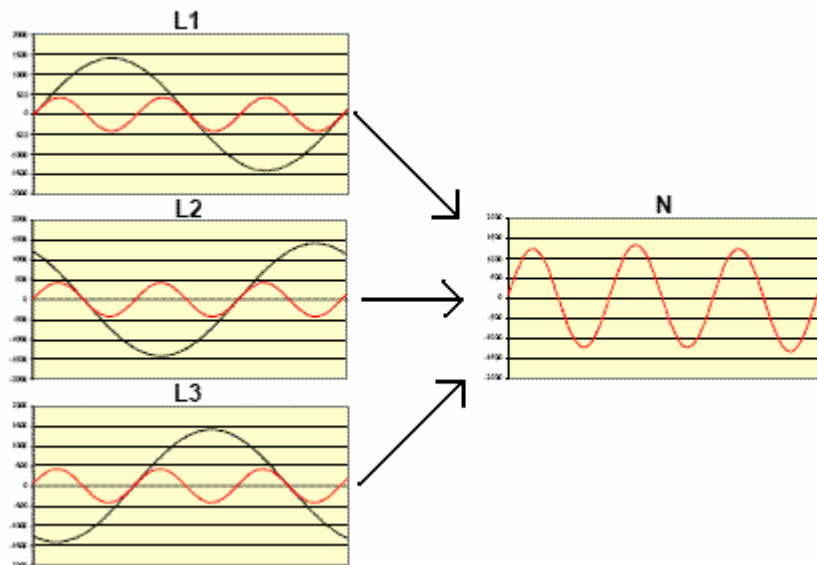
Kysymyksessä on siis vaihtosähköverkossa oleva tasajännitekomponentti. Tämän

osuus on yleensä pieni, mutta suurempana sen haittavaikutuksiin kuuluu mm. korroosion aiheutuminen liittimissä.

Yliaaltovirtojen aiheuttamia ongelmia ovat esimerkiksi:

- verkon kuormitettavuuden heikkeneminen
- häviöiden kasvu
- mittareiden virhenäyttämät
- nollajohtimen kuormittuminen

Suurimman yksittäisen ongelman aiheuttaa ns. kolmas yliaaltovirta (150 Hz), joka kertaantuu suoraan nollajohtimeen. Tämä siis aiheuttaa virran kulun nollajohtimessa ja vähentää näin nollajohtimen kuormitettavuutta virralla, joka aiheutuu normaalista kuormituksesta (kuva 9). /8/



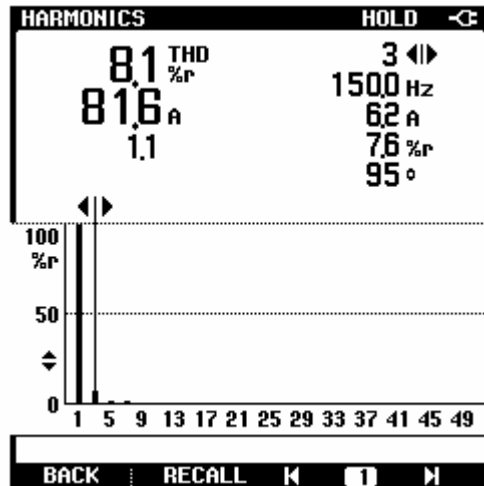
Kuva 9 Kolmannen yliaaltovirran summautuminen nollajohtimeen

Lisäksi verkkoa kuormittivat myös ns. epäharmoniset aallot. Ne ovat perustaajuuden kerrannaisista poikkeavia taajuuksia.

6.2 Harmonisten aaltojen mittaaminen

Tutkimme yliaaltoja Fluke 43 -mittarilla käyttäen samanlaista kytkentää kuin tehoakin mitattaessa kohdassa 3.1.1.

Yliaaltovirrat ja niiden suuruudet lähdöstä V1.2 on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10 Harmonisten yliaaltovirtojen spektri lähdössä V1.2

Kuva kertoo, mistä harmonisista virroista keskuksen kokonaisvirta on muodostunut. Harmonisia yliaaltoja näkyy kuvassa siten, että kolmatta yliaaltoa on 6,2 A (kohdistin on tämän virta-arvon päällä). Myös viidettä ja seitsemättä yliaaltovirtaa esiintyy, mutta niiden suuruus on vain noin ampeerin luokkaa.

6.3 Jännitteen harmoninen kokonaissärö

Yksi hyvä tunnus suure yliaalloille on THD (total harmonic distortion) eli jännitteen harmoninen kokonaissärö. Tämä tarkoittaa yliaaltojännitteiden määrää suhteutettuna jännitteen perustaajuiseen komponenttiin (THD-F) tai tehollisarvoon (THD-R). /8/

Tutkittava kohde oli harmonisten yliaaltojännitteiden osuus muuntajan VC jännitteeseen. Jokaisen lähdön impedanssi on laskettu kohdassa 3.2.3. Lisäksi mittasimme kolmannen, viidennen ja seitsemännen yliaaltovirran arvon. Näitä tietoja käyttäen lasketaan jännite, jonka jokainen jännite U_n erikseen aiheuttaa kulutuskohteella. Tämä on laskettavissa kaavasta

$$U_n = \sqrt{3} \cdot |(R + n \cdot jX_L)| \cdot I_n,$$

jossa

U_n = n:nen harmonisen yliaaltovirran aiheuttama jännite

R = verkon resistanssi mittauspisteessä

X_L = verkon reaktanssi mittauspisteessä

$n = 3, 5, 7$

I_n = n:nen harmoninen yliaaltovirta mittauspisteessä ($n=3,5,7$).

Näitä tietoja hyödyntämällä voidaan laskea kokonaissärö THD käyttäen kaavaa

$$\text{THD \%} = \frac{\sqrt{U_3^2 + U_5^2 + U_7^2}}{U_1} \cdot 100 \%$$

Esimerkki THD -prosentin laskemisesta:

Otetaan esimerkiksi lähtö V5.2.4, joka käännetään lähdöstä V4.4

Taulukosta (liite 10) nähdään yliaaltovirtojen suuruudet.

Taulukko 6 Yliaaltovirtojen suuruuden lähdössä V5.2.4

n	I_n [A]
3	9
5	1,6
7	5

Syötön impedanssi on taulukosta 4 (s. 21) $Z = (45,96+22,67j) \text{ m}\Omega$

Impedanssi Z on vastusarvo, jonka perustajuinen jännite kohtaa. Koska induktiivisuus lisää suurempien taajuuksien kohdalla virran kohtaamaa impedanssia, voidaan se huomioida siten, että suurennetaan impedanssia kunkin taajuuden osalta nimellistaajuuden kertoimella.

Jännite, jonka I_3 aiheuttaa on

$$U_3 = \sqrt{3} \cdot |(R + n \cdot jX_L)| \cdot I_3 = \sqrt{3} \cdot |(45,964 + 3 \cdot 22,668j) \text{ m}\Omega| \cdot 9 \text{ A} = 1,280 \text{ V}.$$

Kaavassa oleva $\sqrt{3}$ muuttaa saadun jännitetuloksen vastaamaan pääjännitteeseen aiheutettua jännitteenalenemaa. Samalla tavoin lasketaan muidenkin taajuuksien alenemat

Jännite, jonka I_5 aiheuttaa on

$$U_5 = 0,339 \text{ V}$$

Jännite, jonka I_7 aiheuttaa on

$$U_7 = 1,431 \text{ V}.$$

näin ollen särö THD-F % on

$$\text{THD - F}\% = \frac{\sqrt{U_3^2 + U_5^2 + U_7^2}}{U_1} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{1,280^2 + 0,339^2 + 1,431^2} \text{ V}}{400 \text{ V}} \cdot 100\% \approx 0,49 \%$$

Samalla tavalla lasketaan kaikki uuden suunnitelman syöttöpisteet. Nämä näkyvät taulukossa, joka on liitteenä 10.

7 KOMPENSOINTIPATTERISTON SUUNNITTELU

Kompensoinnilla tarkoitetaan sähköverkossa siirrettävän loistehon vähentämistä.

Useat kuormalaitteet ottavat myös loistehoa. Vaihesiirtokerroin $\cos \varphi$ on edullisinta pitää lähellä yhtä, jolloin lähes kaikki verkossa kuljetettu teho on pätötehoa.

Loistehon siirto verkossa aiheuttaa häviöitä ja pätötehon siirron pienenemistä. Mikäli sähkönjakeluverkosta joudutaan ottamaan tai sinne joudutaan syöttämään loistehoa, yritys joutuu maksamaan tästä siirrosta verkkoyhtiölle. Loistehon hinta on asetettu

niin suureksi, että useimmissa tapauksissa loisteho kannattaa kompensoida jo kulutuskohteissa.

Mikäli yksittäinen laite aiheuttaa suuren loistehon tarpeen, on järkevää kompensoida se omalla kompensointiyksiköllään. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi suuret moottorit ja kompensoimattomat loisteputkivalaisinryhmät.

Mikäli kompensoitavia kohteita on ripoteltu eri kohtiin kuluttajan sähköverkkoa, on silloin edullista käyttää keskitettyä kompensointia. Tällöin kompensointipatteriston tehtävänä on varmistaa, että kuluttaja ei siirrä loistehoa merkittäviä määriä valtakunnan verkon ja oman jakeluverkkonsa välillä. Oikein mitoitetuna kompensointipatteristo myös pienentää jännitteenalenemaa. /9/

Takon kartonkitehtaalla järkevä kompensointimuoto on keskitetty kompensointi. Verkossa ei ole yksittäisiä suuria loistehon tuottajia. Verkon sisäisesti siirtyvät loistehot ovat kohtuullisella tasolla (liite 5). Kompensointiparistot sijoitetaan pääkeskukseen V5 omaan lähtönsä. Käytettävä estokelaparisto on esimerkiksi Nokia Capacitorsin valmistama D300/4*75-400-500/189-0818E. Tämän estokelan kompensointiteho on 300 kVAr. Nykyisin käytettävät paristot sisältävät loistehon säätimen, joten paristo kompensoi sopivan määrän loistehoa kuormitustilanteen mukaan. Tällöin ei ole vaarana ylikompensoida verkkoa.

8 TULOSTEN TARKASTELU

Verkon uudistaminen tulee sopivaan aikaan, sillä vanhan verkon komponenttien kunto ei vastaa tämän päivän tarpeita. Uuden verkon kuormitustila mahdollistaa muuntajan VC kuormittamisen tulevaisuudessa uusilla lähdöillä. Muuntaja on uudistamisen jälkeen noin 30 % kuormassa, jonka voi todeta liitteenä 5 olevasta kuormitustaulukosta. Oikosulkuvirrat ovat riittävän suuret alakeskuksilla, sillä ne mahdollistavat noin sadan metrin pituisten lähtöjen käytön. Tarkemmin ko. tiedot näkyvät taulukosta 5 (s. 25). Mitattujen kuormitusten virhetarkkuudeksi arvioin noin 11 %.

LÄHDELUETTELO

- /1/ Tako-yleisesitys 122004 suomi (PowerPoint-esitys)(lukuja päivitetty).
- /2/ ABB Teknisiä tietoja ja taulukoita -käsikirja (luku 7), ilmestymisvuosi 2000.
- /3/ ABB muuntaja-esite internet sivulta www.abb.fi, hi-T180 high insulation transformer.
- /4/ Johdon mitoitus ja suojaus, sähkö- ja teleurakotsijaliitto STUL ry 2004, s.115.
- /5/ <http://leeh.ee.tut.fi/svtopus/teksti/Luku9.html>, 9.13, 4.4.2006.
- /6/ Teollisuuden sähkösuunnittelu-kurssin opetusmateriaali, L Hietalahti 8.3.2006.
- /7/ ABB Teknisiä tietoja ja taulukoita -käsikirja (luku 12.3), ilmestymisvuosi 2000.
- /8/ Nokian Capacitorsin kalvosarja, loisteho, 22.3.2006.
- /9/ <http://www.nokiancapacitors.fi/compensation.htm>, 22.3.2006.

LIITTEET

- Liite 1 Keskuksilta mitatut virrat ja sulakekoot
- Liite 2 Jatkuvan mittauksen tulokset
- Liite 3 Uusi piirikaavio
- Liite 4 Muuntajan tekninen erittely.
- Liite 5 Uuden tilanteen kuormitukset
- Liite 6 Kaapeleiden resistanssit ja reaktanssit
- Liite 7 gG-sulakkeiden edellyttämät pienimmät oikosulkuvirrat. (SFS-EN 60269).
- Liite 8 Jännitteenalenema
- Liite 9 Ecodial pääpiirikaavio
- Liite 10 Yliaaltojen aiheuttamat jännitteet ja THD

Liite 1

Keskuksista mitatut virrat ja sulakekoot

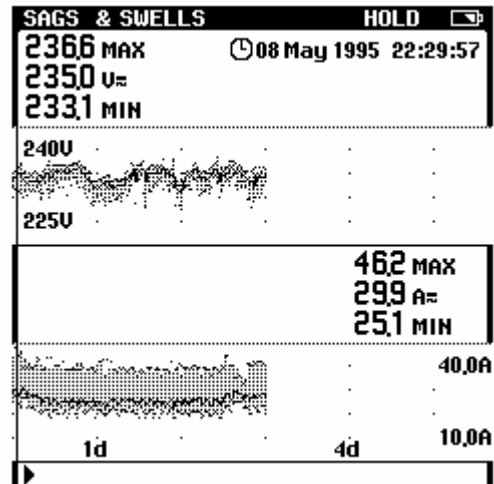
mitattava keskus	ST -tila	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	summa virta [A]	I_{nolla} [A]	I_{kevi} [A]	Sulakekoko
V1	216	480	420	464	1364	112		
V1.2	305	78,5	62,2	73,5	214	7,5	8	100
V1.2.29	305	3,5	1,9	1,6	7	2,2	0,8	
V1.2.32	305	28,5	15	12	55,5	8		
V1.9	AT400	7,8	7,8	7,5	23,1		0,7	35
V1.11	AT301	15	9	7	31	12,5	1,5	63
V1.15	5kr. kont	48,5	48,5	26,5	124	8,5		125
V1.16	302	62,5	68	56	187	13,5		250
V1.16.17	302	17,5	21,5	19,5	58,5	4,8		
V1.17	304	73	63	68	204	8,5		125
V1.21	303	44	44	54	142			100
V1.21.17	303	1,1	0,6	0,7	2,4	0,7	0,1	
V1.22	216	106	148	130	384	19	20	250
V1.22.22	305	4,5	4	3,5	12	0,7	0,7	25
V1.22.23	303	10,5	9	10	29,5			
V1.22.25	ST 005	6	8,5	4	18,5	5	2	25
V1.22.25.1	303	2	3	3	8	2	1,5	
V1.22.26	203	6	3	8	17	0	3	
V1.22.27	304	8	6,5	7	21,5	1,5	1	
V1.22.30	203	10,5	12,4	14	36,9	5,5	1	
V1.22.30.204	301	-	-	-		-	-	
V1.22.31	401	17	14	12	43	4	3	
V1.22.31.211	401							
V1.22.32	501	11,5	6	7	24,5	7	0,5	
V1.22.3	401	3	5	3,5	11,5	2,5		
V1.22.4	101	8	10,5	13	31,5			
V1.22.7	504	0,5	0,5	0	1	0,4	1	
V1.23	sos.rak	38,5	33,5	46	118		0,9	125
V1.24	st220 1.kr sos	13,5	13,2	7,7	34,4		2	100
V4	207	480	360	396	1236			
V4.1	207	201	176	200	576	0,3		250
V4.1.39	AT101	11,5	7	0,7	19,2	10		
V4.1.101	207	0,35	1,3	1,3	2,95			
V4.1.102	207	26	17	22	65	5,5	1,6	
V4.2	ruokala	40	45	49	134	8		250
V4.2.14	301	0	0	0,2	0,2			
V4.3	207	59	48	60	167			400
V4.4	101	117	137	130	384			315
V4.4.34	102	2,5	6,5	2,5	11,5			

Taulukko 1 Keskiarvomittauksen tulokset


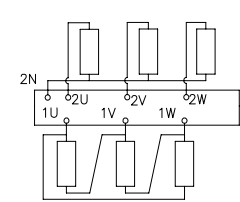

Mittarin kello	todellinen aika	U_{ka}	I_{ka}	$I_{ka}/mittaus$
21:00	11:00	234,8	53,6	26,8
20:30	10:30	234,5	57,4	28,7
20:00	10:00	234,4	58	29
19:20	9:20	234,9	56,2	28,1
18:45	8:45	234,1	53,4	26,7
18:00	8:00	234,8	54,4	27,2
17:30	7:30	232,2	57	28,5
17:00	7:00	233,4	53,6	26,8
16:30	6:30	233,3	53,2	26,6
16:00	6:00	233,8	56	28
15:30	5:30	234,5	55,6	27,8
15:00	5:00	234,6	53	26,5
14:00	4:00	234,9	57,8	28,9
13:30	3:30	235,6	58,2	29,1
13:00	3:00	235,1	59,4	29,7
12:30	2:30	235,3	58,8	29,4
12:00	2:00	236,1	58,4	29,2
11:30	1:30	236,4	53,2	26,6
11:00	1:00	235,9	53,6	26,8
10:00	0:00:00	235,2	57,4	28,7
9:30	23:30	234,9	56,6	28,3
9:00	23:00	234,7	53,6	26,8
8:30	22:30	235,2	48,6	24,3
8:00	22:00	233,7	49,4	24,7
7:30	21:30	235,4	52,4	26,2
6:50	20:50	236,2	52,8	26,4
6:15	20:15	235,7	52	26
5:40	19:40	235,4	46,8	23,4
5:00	19:00	234,3	49,4	24,7
4:30	18:30	233,9	52,8	26,4
4:00	18:00	234,1	52	26
3:30	17:30	234,3	49,4	24,7
2:50	16:50	234,1	47,6	23,8
2:15	16:15	234,5	53,4	26,7
1:40	15:40	235,1	52,6	26,3
1:00	15:00	236,0	53	26,5
0:30	14:30	235,5	52,2	26,1
0:00	14:00	234,6	52,2	26,1
23:30	13:30	234,4	48,4	24,2
23:00	13:00	234,6	49,2	24,6
22:20	12:20	234,2	53	26,5
21:40	11:40	233,7	52,4	26,2
21:00	11:00	231,3	47,2	23,6

Taulukko 2 mittaustulosten minimi-, maksimi ja keskiarvot

19.3.06 klo 23.00 - 20.3.06 klo 11:00	
$U_{ka} =$	234,6 V
$I_{ka} =$	53,4 A
$U_{max} =$	238,4 V
$U_{min} =$	227,8 V
$I_{max} =$	88,8 A
$I_{min} =$	37 A



Kuva 1 Fluke 43B:n näyttö keskiarvomittauksessa

	1	2	3	4	
A					A
	KOLMIVAIHE KUIVAMUUNTAJA - 50Hz - LUONNOLLINEN JÄÄHDYTYS				
	VALMISTUSNUMERO: 1LES91589		STANDARDI IEC 60076-11		
B	TYYPPI DTE 2000/7.2		YLÄJÄNNITE		
	VALMISTUSVUOSI	2005	Link.	JÄNNITE (V)	VIRTA (A)
	TEHO (kVA)	2000	3-4	5355	
	IMPEDANS. 120°C (%)	6.22	4-5	5228	
	MELU dB(A)	< 78	5-6	5100	226.41
	LÄMPENEMÄ YJ/AJ (K)	100 / 100	6-7	4972	
	ERISTYSTAPA YJ/AJ	F / F	7-8	4845	
C	MATERIAALI YJ/AJ	AL / AL	ALAJÄNNITE		
	KYTKENTÄTUNNUS YJ/AJ	Dyn5	JÄNNITE (V)	VIRTA (A)	
	PAINO (Kg)	4700	400	2886.75	
	PALOLUOKKA	F1			
	ILMASTOLUOKKA	C1			
	YMPÄRISTÖLUOKKA	E2			
	SUOJAUSLUOKKA	IP21			
	MAX. OIKOSULKUAIKA (s)	2			
	MAX. JÄNNITE / ERISTYSTASO	YJ (7.2kV) LI60 PF20/AJ (1.1kV) LI- PF3			
D	MATERIAALI:				D
	TULOSTUS:				
	REIKÄVÄLI: 138 x 95 mm.				
	KOKONAISMITTA: 148 x 105 mm.				
	YKSIKKÖ: 2				
E	TOLERANCIAS SEGUN: ISO 2768V				E
	REVISIONES 1° (7.12.05 J.A. GUADA) L.V. VALUES			Peso Kg.	
F	FECHA	NOMBRE	N° FABRICACION / TIPO		
	DIBUJADO	27/09/05	J.A.GUADA	1LES91589	
	COMPROB.	27/09/05	S.ROC	DTE 2000/7.2	
	ESCALA				1LES103470-PC
	ARVOKILPI				Sustituye a:
					Sustituido por:
	1	2	3	4	

Liite 5

Kuormitus tilanne uuden ryhmittelyn mukaan

ryhmittely uusien keskuksien mukaan						Sulake /katkaisija		
keskus		Näennäisteho S [kVA]	Pätöteho P [kW]	loisteho Q [kvar]	Virta k-a I_{ka} [A]	Uusi suunnitelma koot / [A]	vanhat koot / [A]	cosφ
V5	vanha	598,6	520,9	294,9	907,1	3150		0,87
V5.1		178,6	133,6	118,6	260,8	1250		0,75
V5.1.1	V1.2	49,3	32,0	37,4	71,4	100	100	0,65
V5.1.2	V1.9	5,3	4,9	2,0	7,7	25	35	0,93
V5.1.3	V1.11	7,1	6,5	3,0	10,3	63	63	0,91
V5.1.4	V1.15	28,4	20,5	19,7	41,2	63	125	0,72
V5.1.5	V1.16	42,9	32,2	28,4	62,2	125	250	0,75
V5.1.6	V1.17	46,9	37,5	28,2	68,0	100	125	0,80
V5.2		152,5	142,6	54,1	223,5	630		0,93
V5.2.1	V1.23	27,1	26,9	3,8	39,3	125	125	0,99
V5.2.2	V1.24	7,9	6,9	3,9	11,5	100	100	0,87
V5.2.3	V4.2	30,8	30,2	6,1	44,7	250	250	0,98
V5.2.4	V4.4	88,3	78,6	40,3	128,0	315	315	0,89
V5.3	V1.21	32,7	24,8	21,2	47,3	250	100	0,76
V5.3.1	V1.21	32,7	24,8	21,2	47,3	100	100	0,76
V5.4	V4.1	132,5	94,1	93,3	192,0	250	250	0,71
V5.5	V4.3	38,4	37,6	7,6	55,7	400	400	0,98
V5.5.6(?)	UUSI					250		
V5.6	V1.22	88,2	88,2	0,0	127,8	250	250	1,00
V5.7	V1	varasyöttö				1250		

Liite 6

Kaapeleiden resistanssit ja reaktanssit

keskus	Kaapeli	koko	johtotien resistanssi r (70°C) [Ω/km]	johtotien reaktanssi x (70°C) [Ω/km]	kaapelin ominaisimpedanssi r+xj [mΩ/km]	kaapelien pituudet [km]	kaapelin impedanssi R+Xj [mΩ]	kaapelin resistanssi R [mΩ]	kaapelin reaktanssi X [mΩ]
V5	AHXCMK-WTC	3*185/57	* 0,2	* 0,110	* 200+109,956j	0,035	* 7+3,848j	* 7,000	* 3,848
V5 **	AHXCMK-WTC	3*185/57	* 0,00127	* 0,00058	* 1,267+0,583j	0,035	* 0,0444+0,0204j	* 0,044	* 0,020
V5.1	4*AMCMK	4*185/57Cu	0,05	0,02	50,0+19,635j	0,150	7,50+2,945j	7,500	2,945
V5.1.1	MCMK	4(3)*120/70	0,19	0,07	187,0+72,257j	0,080	14,96+5,781j	14,960	5,781
V5.1.2	MCMK	4*10+10	2,19	0,09	2190+87,965j	0,060	131,4+5,278j	131,400	5,278
V5.1.3	MCMK	4*16+16	1,38	0,08	1380+81,681j	0,080	110,4+6,536j	110,400	6,535
V5.1.4	MCMK	4*16+16	1,38	0,08	1380+81,681j	0,110	151,8+8,985j	151,800	8,985
V5.1.5	MCMK	4(3)*50+25	0,47	0,08	465+78,540j	0,060	27,9+4,712j	27,900	4,712
V5.1.6	AMCMK	4(3)*120+42(41)	0,31	0,08	306+78,540j	0,010	3,06+0,785j	3,060	0,785
V5.2	3*AMCMK	4*185/57Cu	0,07	0,03	66,667+26,180j	0,290	19,333+7,592j	19,333	7,592
V5.2.1	AMCMK	3*70+35/16(21)	0,53	0,08	533+78,540j	0,100	53,3+7,8540j	53,300	7,854
V5.2.2	AMCMK	3*70+35/16(21)	0,53	0,08	533+78,540j	0,030	15,99+2,356j	15,990	2,356
V5.2.3	AMCMK	4*185/57Cu	0,20	0,08	200+78,540j	0,100	20+7,854j	20,000	7,854
V5.2.4	2*MCMK	4(3)*70/35	0,16	0,04	161,5+37,700j	0,020	3,23+0,754j	3,230	0,754
V5.3	AMCMK	4*185/57Cu	0,20	0,08	200+78,540j	0,170	34+13,352j	34,000	13,352
V5.3.1	AMCMK	3*70+35/16(21)	0,53	0,08	533+78,540j	0,020	10,66+1,571j	10,660	1,571
V5.4	AMCMK	3*185/57Cu	0,20	0,08	200+78,540j	0,170	34+13,352j	34,000	13,352
V5.5	2*AMCMK	3*185/57Cu	0,10	0,04	100+39,270j	0,180	18+7,069j	18,000	7,069
V5.5.6	AMCMK	4*185/57Cu	0,20	0,08	200+78,540j	0,030	6+2,356j	6,000	2,356
V5.6	AMCMK	4*185/57Cu	0,20	0,08	200+78,540j	0,150	30+11,781j	30,000	11,781
V5.7	4*AMCMK	4*185/57Cu	0,05	0,02	50+19,640j	0,160	8+3,142j	8,000	3,142

* Kaapelin 65 °C lämpötilassa

** Kaapelin impedanssi redusoituna 5,1 kV jännitetasosta 400 V jännitetasoon laskuja varten

Liite 7

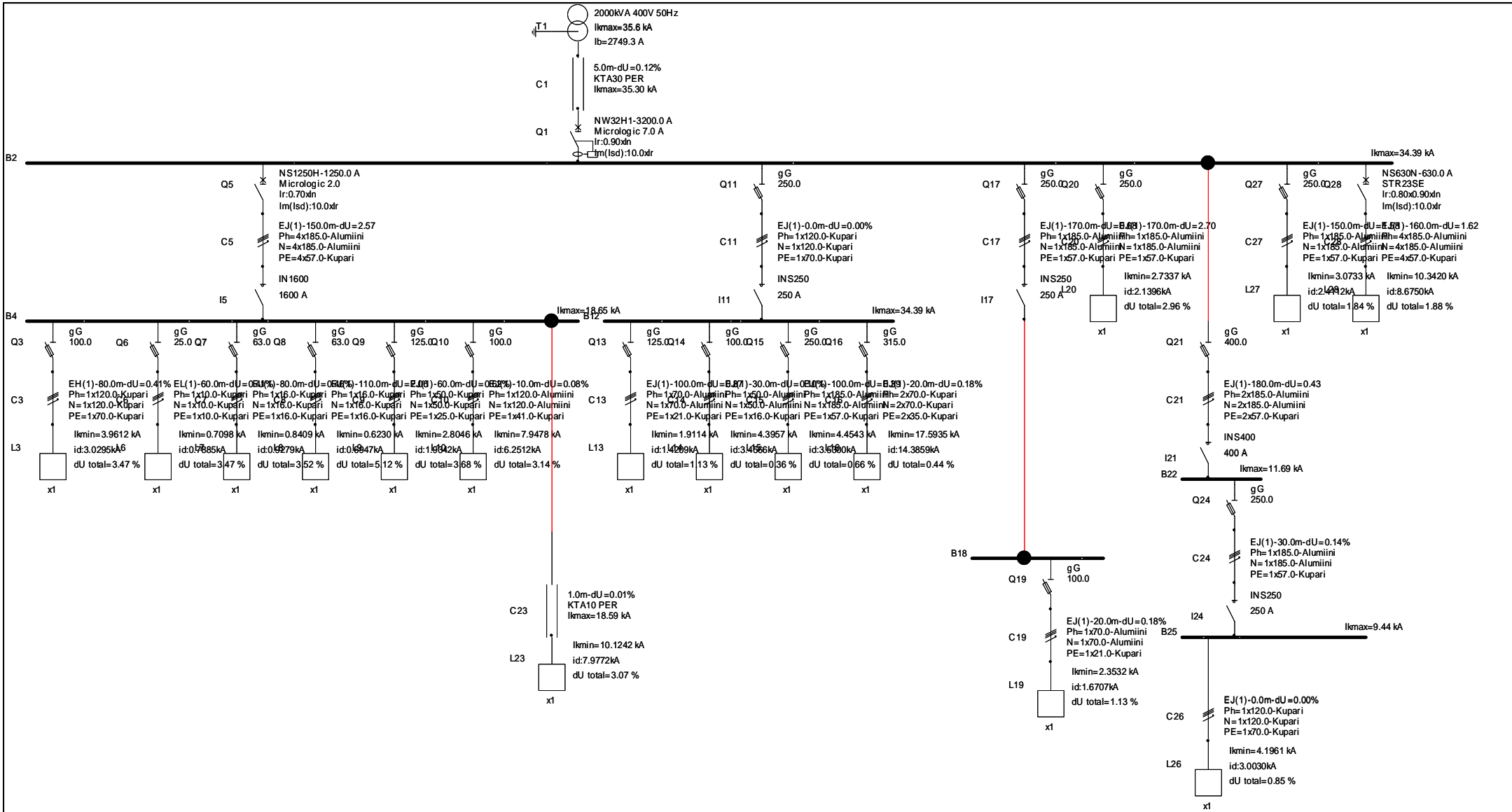
Gg-sulakkeiden edellyttämät pienimmät oikosulkuvirrat (SFS-EN 60269)

Pienimmät toimintavirrat gG-sulakkeille ja vaaditut mitatut arvot				
Nimellis- virta A	gG-sulake 0,4 s A	Vaadittu mitattu arvo A	gG-sulake 5,0 s A	Vaadittu mitattu arvo A
2	16	20	9	11,3
4	32	40	18	22,5
6	46,5	58,2	28	35
10	82	102,5	46,5	58,2
16	110	137,5	65	81,3
20	145	181,3	85	106,3
25	180	225	110	137,5
32	270	337,5	150	187,5
35			165	206,3
40	315	393,8	190	237,5
50	470	587,5	250	312,5
63	550	687,5	320	400
80	840	1050	425	531,3
100	1000	1250	580	725
125	1450	1812,5	715	893,8
160	1600	2000	950	1187,5
200	2100	2625	1250	1562,5
250	2800	3500	1650	2062,5
315	3700	4625	2200	2750
400	4800	6000	2840	3550
500	6400	8000	3800	4750
630	8500	10 625	5100	6375

Liite 8

Taulukko Jännitteenalenema

keskus	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	cos φ	sin φ	U_{aL1} [V]	U_{aL2} [V]	U_{aL3} [V]	U_a k-a [V]	$U_a\%$ syöttö L1	$U_a\%$ syöttö L2	$U_a\%$ syöttö L3	$U_a\%$ syöttö k-a	$U_a\%$ yht. L1	$U_a\%$ yht. L2	$U_a\%$ yht. L3	$U_a\%$ yht. k-a
V5 (5kV)	1154,3	1152,7	1164,2	0,87	0,49	5,7	5,7	5,8	5,8	2,50	2,49	2,52	2,50	2,50	2,49	2,52	2,50
V5.1	285,3	258,5	238,5	0,75	0,66	2,3	2,1	1,9	2,1	1,00	0,91	0,84	0,91	3,50	3,40	3,35	3,42
V5.1.1	78,5	62,2	73,5	0,65	0,76	1,3	1,0	1,2	1,1	0,55	0,43	0,51	0,50	4,04	3,83	3,87	3,91
V5.1.2	7,8	7,8	7,5	0,93	0,37	1,0	1,0	1,0	1,0	0,45	0,45	0,43	0,44	3,94	3,85	3,78	3,86
V5.1.3	15	9	7	0,91	0,41	1,7	1,0	0,8	1,1	0,72	0,43	0,34	0,50	4,22	3,83	3,69	3,91
V5.1.4	48,5	48,5	26,5	0,72	0,69	7,4	7,4	4,0	6,3	3,21	3,21	1,75	2,72	6,70	6,61	5,11	6,14
V5.1.5	62,5	68	56	0,75	0,66	1,8	1,9	1,6	1,8	0,77	0,84	0,69	0,76	4,27	4,24	4,04	4,18
V5.1.6	73	63	68	0,80	0,60	0,2	0,2	0,2	0,2	0,10	0,09	0,09	0,09	3,60	3,49	3,45	3,51
V5.2	209	228,7	232,7	0,93	0,35	4,3	4,8	4,8	4,6	1,89	2,07	2,10	2,02	4,38	4,56	4,62	4,52
V5.2.1	38,5	33,5	46	0,99	0,14	2,1	1,8	2,5	2,1	0,90	0,78	1,08	0,92	5,29	5,34	5,70	5,44
V5.2.2	13,5	13,2	7,7	0,87	0,49	0,2	0,2	0,1	0,2	0,09	0,09	0,05	0,08	4,48	4,65	4,67	4,60
V5.2.3	40	45	49	0,98	0,20	0,9	1,0	1,1	1,0	0,37	0,42	0,46	0,42	4,76	4,98	5,08	4,94
V5.2.4	117	137	130	0,89	0,46	0,4	0,5	0,4	0,4	0,17	0,20	0,19	0,18	4,55	4,76	4,81	4,71
V5.3	44	44	54	0,76	0,65	1,6	1,6	2,0	1,7	0,70	0,70	0,86	0,75	3,20	3,19	3,38	3,26
V5.3.1	44	44	54	0,76	0,65	0,5	0,5	0,6	0,5	0,21	0,21	0,25	0,22	3,40	3,40	3,63	3,48
V5.4	201	175,5	199,5	0,71	0,70	7,3	6,4	7,3	7,0	3,19	2,79	3,17	3,05	5,69	5,28	5,69	5,55
V5.5	309	298	310	0,98	0,20	6,0	5,8	6,0	5,9	2,60	2,51	2,61	2,57	5,10	5,00	5,13	5,07
V5.5.6	250	251	252	0,98	0,20	1,6	1,6	1,6	1,6	0,70	0,70	0,71	0,70	5,80	5,70	5,83	5,78
V5.6	106	148	129,5	1,00	0,00	3,4	4,8	4,2	4,1	1,49	2,07	1,81	1,79	3,98	4,57	4,33	4,29
V5.7	0	0	0	1,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	2,50	2,49	2,52	2,50



Yliaaltovirtojen aiheuttamat yliaaltojännitteet ja THD

keskus	3. Yliaalto [A]	5. Yliaalto [A]	7. Yliaalto [A]	syötön impedanssi Z_k [mΩ]	3. y-a [V]	itseisarvo [V]	5. y-a [V]	itseisarvo [V]	7. y-a [V]	itseisarvo [V]	THD [%]
V5	78,1	18,1	22,7	0,837 + j 5,976	0,113 + j 2,425	2,428	0,026 + j 0,937	0,937	0,033 + j 1,647	1,647	0,77
V5.1	19,9	3,7	0,6	15,837 + j 11,866	0,546 + j 1,227	1,343	0,101 + j 0,380	0,394	0,016 + j 0,086	0,088	0,35
V5.1.1	4,3	0,0	0,0	45,757 + j 23,427	0,341 + j 0,523	0,625	0,000 + j 0,000	0,000	0,000 + j 0,000	0,000	0,16
V5.1.2	1,4	0,5	0,0	278,637 + j 22,422	0,676 + j 0,163	0,695	0,241 + j 0,097	0,260	0,000 + j 0,000	0,000	0,19
V5.1.3	1,7	1,0	0,6	236,637 + j 24,935	0,697 + j 0,220	0,731	0,410 + j 0,216	0,463	0,246 + j 0,181	0,306	0,23
V5.1.4	3,3	0,0	0,0	319,437 + j 29,836	1,826 + j 0,512	1,896	0,000 + j 0,000	0,000	0,000 + j 0,000	0,000	0,47
V5.1.5	4,7	0,4	0,0	71,637 + j 21,291	0,583 + j 0,520	0,781	0,050 + j 0,074	0,089	0,000 + j 0,000	0,000	0,20
V5.1.6	4,5	1,8	0,0	21,957 + j 13,437	0,171 + j 0,314	0,358	0,068 + j 0,209	0,220	0,000 + j 0,000	0,000	0,11
V5.2	13,7	2,1	5,3	39,504 + j 21,160	0,937 + j 1,506	1,774	0,144 + j 0,385	0,411	0,365 + j 1,367	1,415	0,58
V5.2.1	2,5	0,0	0,0	146,104 + j 36,868	0,633 + j 0,479	0,793	0,000 + j 0,000	0,000	0,000 + j 0,000	0,000	0,20
V5.2.2	1,2	0,0	0,3	71,484 + j 25,873	0,149 + j 0,161	0,219	0,000 + j 0,000	0,000	0,041 + j 0,104	0,111	0,06
V5.2.3	1,0	0,5	0,0	59,504 + j 29,014	0,103 + j 0,151	0,183	0,052 + j 0,126	0,136	0,000 + j 0,000	0,000	0,06
V5.2.4	9,0	1,6	5,0	45,964 + j 22,668	0,717 + j 1,060	1,280	0,127 + j 0,314	0,339	0,398 + j 1,374	1,431	0,49
V5.3	4,5	0,7	1,2	68,837 + j 32,679	0,537 + j 0,764	0,934	0,083 + j 0,198	0,215	0,143 + j 0,475	0,497	0,27
V5.3.1	4,5	0,7	1,2	90,157 + j 35,821	0,703 + j 0,838	1,093	0,109 + j 0,217	0,243	0,187 + j 0,521	0,554	0,31
V5.4	11,0	0,2	0,0	68,837 + j 32,679	1,312 + j 1,868	2,282	0,024 + j 0,057	0,061	0,000 + j 0,000	0,000	0,57
V5.5	11,0	5,0	3,6	36,837 + j 20,113	0,702 + j 1,150	1,347	0,319 + j 0,871	0,928	0,230 + j 0,878	0,907	0,47
V5.5.6	0,0	0,0	0,0	48,837 + j 24,825	0,000 + j 0,000	0,000	0,000 + j 0,000	0,000	0,000 + j 0,000	0,000	0,00
V5.6	18,0	6,4	12,0	60,837 + j 29,538	1,897 + j 2,763	3,351	0,674 + j 1,637	1,771	1,264 + j 4,298	4,480	1,47
V5.7	0,0	0,0	0,0	16,837 + j 12,259	0,000 + j 0,000	0,000	0,000 + j 0,000	0,000	0,000 + j 0,000	0,000	0,00