

Teollisuusverkon simulointi ja sähkönlaatumittaukset

Mikko Karvonen

Opinnäytetyö

__15__. __5__. 2013_____

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Sähkötekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Mikko Karvonen	
Työn nimi Teollisuusverkon simulointi ja sähkönlaatumittaukset	
Päiväys 15.5.2013	Sivumäärä/Liitteet 65/13
Ohjaaja(t) Yliopettaja Juhani Rouvali ja lehtori Jari Ijäs	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Valio Oy Suonenjoen hillotehdas / Marko Haimila	
Tiivistelmä <p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli mallintamalla ja mittaamalla selvittää Suonenjoen Valion hillotehtaan pienjänniteverkon nykytila.</p> <p>Mittaamalla oli tarkoitus selvittää mahdollisten yliaaltojen määrää, verkon käyttämää tehoa, kompensoinnin toimivuutta ja yleinen sähkönlaatu mittauskohteessa. Mittalaitteena käytettiin Fluke 434 - sähkönlaatuanalysointilaitetta, jonka antamia mittaustuloksia verrattiin SFS EN - 50160 sähkönlaatustandardiin. Sähkönlaadun selvittämisen lisäksi mittaustulokset toimivat mallintamisen lisätietoina. Simuloinnin tarve työssä oli tarkastella tehdasverkon käyttäytymistä eri kuormitustilanteissa, moottorikäyttöjen vaikutusta yliaaltoihin ja oikosulkuvirtoihin sekä mahdollisesti antaa kehitysideoita.</p> <p>Työn tuloksena saatiin sähkönlaatu tutkimus ja simuloimalla tehty selvitys verkon nykytilasta, jotka luovutettiin tehtaan kunnossapidolle.</p>	
Avainsanat Sähköverkon mallinnus, sähkönlaatu	

Field of Study Technology, Communication and Transport		
Degree Programme Degree Programme in Electrical Engineering		
Author(s) Mikko Karvonen		
Title of Thesis Industrial Network Modelling and Power Quality Measurements		
Date	15.5.2013	Pages/Appendices 65/13
Mr Juhani Rouvali Principal Lecturer and Lecturer Jari Ijäs		
Client Organisation/Partners Valio Oy Suonenjoen hiltotehdas / Mr Marko Haimila		
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to research the current state of the grid in the Valio Jam factory in Suonenjoki by measuring and by using a computer based program.</p> <p>The main goal of the measurements was to find out the quantity of harmonic currents and voltages, power used by the grid, functionality of compensation and general power quality. The measurements were made with a Fluke 434 power quality analyzer. The results were then compared to the SFS EN-50160 standard for power quality. Power quality measurements also gave additional information for the computer model of the studied grid.</p> <p>The need to build a computer model was for observing grid behavior in different loads, see the AC drive impact on harmonics and short circuit currents and possibly give ideas to develop the studied grid further.</p> <p>As a result of this thesis, a power quality research and a study on grid's present state was achieved and were given to the factory's maintenance department personnel.</p>		
Keywords Power quality, power grid simulation		

SISÄLTÖ

1	ALKUSANAT	7
2	JOHDANTO	8
3	SUONENJOEN HILLOTEHDAS VALIO OY	9
4	SÄHKÖNLAATU	10
3	YLIAALLOT	14
3.1	Yliaaltoanalyysi	15
3.2	Energian kulutuksen kasvu ja yliaallot	17
3.2.1	Yliaallot muuntajissa	17
3.3	Yliaaltojen aiheuttamat resonanssitilanteet	19
3.3.1	Sarjaresonanssi	20
3.3.2	Rinnakkaisresonanssi	20
3.4	Loisteho	20
3.5	Loistehon kompensointi ja yliaaltojen suodatus	22
3.5.1	Kompensointitavat	23
3.6	Kompensointilaitteet	23
3.6.1	Automatiikkaparisto estokeloilla	24
3.6.2	Yliaaltosuodatin	24
3.6.3	Aktiivisuodatin	25
3.6.4	Kompensoinnin valinta	26
3.7	Muut keinot vähentää yliaaltoja	28
3.7.1	Ylimoittaminen	28
3.7.2	Taajuusmuuttajan pulssiluvun vaikutus yliaaltoihin	29
4	OIKOSULKUVIRRAT	30
4.1	Oikosulkuvirran ominaisuudet	30
4.2	Oikosulkuvirran komponentit	32
4.2.1	Tasavirtakomponentin vaimeneminen	32
4.2.2	Vaihtovirtakomponentin vaimeneminen	32
4.3	Alkuoikosulkuvirta	34
4.4	Sysäysoikosulkuvirta	35
4.5	Terminen oikosulkuvirta	36
4.6	Pysyvän tilan oikosulkuvirta	38

5	THEVENININ MENETELMÄ OIKOSULKUVIRRAN LASKENNASSA	39
5.1	Vikavirtojen laskenta.....	40
5.1.1	Laskuperiaatteita.....	40
6	KOMPONENTIT	42
6.1	Syöttävä verkko.....	42
6.2	Kaksikäämimuuntajat ja kuristimet	43
6.3	Epätahtikoneet	43
6.4	Kaapelit, johdot ja kiskot	44
6.5	1-, 2- ja 3-Vaiheisten oikosulkuvirtojen kaavat	44
7	SUONENJOEN VALION PIENJÄNNITEVERKKO	47
8	SÄHKÖNLAATUMITTAUKSET	49
8.1	Mittalaite	50
8.2	Turvallisuus.....	52
8.3	Mittausten suorittaminen	53
8.4	Pääkeskuksen mittaus.....	54
8.4.1	Pääkeskuksen mittaustulokset	55
8.4.2	Tulosten arviointi	59
8.5	Nousukeskuksien mittaus	61
8.5.1	Nousukeskuksien mittaustulokset	61
8.5.2	Nousukeskuksien mittaustulokset	63
9	VERKON MALLINTAMINEN.....	64
9.1	Simulointiohjelma	64
9.2	Simulointi.....	65
9.2.1	Taajuusmuuttajamalli	67
9.3	Arvio taajuusmuuttajien aiheuttamista yliaalloista.....	68
9.3.1	Simuloinnin tulokset	69
9.4	Tehonjaon laskenta	70
9.4.1	Tulokset	70
9.4.2	Kompensoinnin vaikutus jännitteenaleniin	70
9.5	Oikosulkuvirtojen laskenta	71
9.5.1	Laskutulokset.....	72
10	YHTEENVETO	73
11	LÄHDELUETTELO JA TUOTETUT MATERIAALIT	74

LIITTEET

Liite 3 - Vaiheiset oikosulkuvirrat normaalitilassa

Liite 2 - Vaiheiset oikosulkuvirrat normaalitilassa

Liite 1 - Vaiheiset oikosulkuvirrat

1 ALKUSANAT

Haluan ensinnäkin kiittää perhettäni saamastani avusta ja tuesta opintojeni aikana sekä opinnäytetyön valvojia Juhani Rouvalia, Marko Haimilaa ja Jari Ijästä saamastani avusta. Lisäksi kiitän Valio Oy Suonenjoen hillotehtaan kunnossapitoa.

Suonenjoella 15.5.2013

Mikko Karvonen

2 JOHDANTO

Teollisuuden sähköverkko kokee usein muutoksia. Muutokset voivat olla isoja, kuten laajennusten ja sitä mukaa uusien kuormien liittäminen olemassa olevaan verkkoon tai pienempiä pitkällä ajalla tapahtuvia. Kuormituksen muuttuessa myös sähköverkon tila muuttuu, mikä vaikuttaa kapasiteettiin, suojaukseen sekä sähkönlaatuun. Sähkönlaatu tulee kysymykseen etenkin vanhemmissa teollisuusverkoissa, joissa on yliaaltoja tuottavien laitteiden määrä on kasvanut paljon.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli aluksi selvittää tutkittavan verkon nykytila sähkönlaadun kannalta. Työn tarkoitus on mallintaa tutkittava verkko nykyhetkellä sekä tarkastella tulevaisuudessa käyttöönotettavien uusien muuntajien vaikutusta sähköverkkoon. Mallinnusta varten hankitaan tietoa tutkittavasta verkosta ja tehdään nykytilan selvitystä. Nykytilanteen selvittämiseksi tutkittavalle verkolle tehdään sähkönlaatumittauksta ensin pääkeskustasolla, josta siirrytään mittaamaan nousukeskuksia. Mittausten lisäksi työssä tehdään mallintamisen mahdollistava päivitetty nousujohtokaavio, sekä tarkastellaan verkon tilaa normaalikuormitusten aikana. Mallintaminen tehdään Digsilent Power Factory-tietokoneohjelmalla.

Tarve työlle oli selvittää sähkönlaatu Suonenjoen hillotehtaalla sekä tarkastella verkon tämänhetkistä tilaa simuloimalla. Oikosulkuvirtojen laskenta oli myöskin syytä tehdä mahdollisimman perusteellisesti, sillä näitä tietoja ei ollut käytettävissä. Työn teetti Suonenjoen hillotehdas Valio Oy. Valio on Suomen suurin maidonjalostaja ja markkinajohtaja monissa tuoteryhmissä. Yrityksen omistaa 18 osuuskuntaa, joista 9 kuuluu valioryhmään. Valioryhmään kuuluu noin 9 000 maidontuottajaa.

3 SUONENJOEN HILLOTEHDAS VALIO OY

Suonenjoen hillotehdas kehittää ja valmistaa erilaisia hilloja sekä Valion, että muun elintarvike- ja leipomoteollisuuden tarpeisiin. Tehdas on perustettu vuonna 1974, jolloin se toimi pakastamona; vuonna 1984 tehdas siirtyi Valion omistamaksi. Hillotehdas työllistää noin 100 henkeä, johon luetaan tuotannon, kunnossapidon, tuotekehityksen ja hallinnon henkilöstö. Tehtaan johtajana toimii Markku Ihasalo.

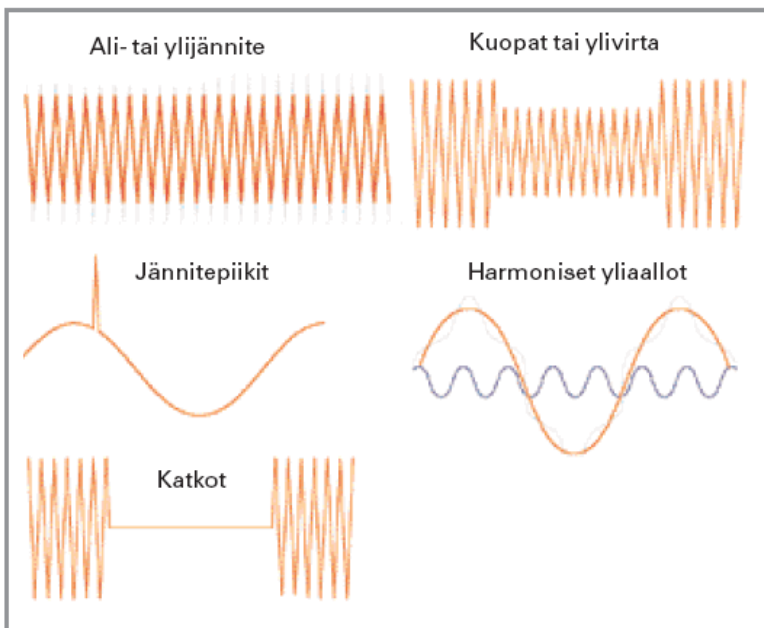
Tehtaan valmistus on noin 16 miljoonaa kiloa vuodessa, eräkohtaista tuotantoa 600 – 3 000 kiloa. Tuotanto koostuu 8 tuotantolinjasta sekä useista esikäsitteilylinjasta. Valmiita tuotteita pakataan pienistä 3,5 kilon sankoista aina 1000 litran kontteihin. Tuotteita ovat muun muassa rahka- ja viililisät, leipomohillot, -marmeladit ja -täytteet, soseet ja kastikkeet sekä lastenruokasoseet.

4 SÄHKÖNLAATU

Sähkölaitteet on tarkoitettu toimimaan sinimuotoisella jännitteellä. Virheetön, hyvälaatuinen sähkö on yhä tärkeämmässä osassa monissa nykyajan laitteessa. Kasvanut sähkönkäyttö on lisännyt sähköisiä häiriöitä ja niihin on alettu kiinnittää yhä enemmän huomiota. Siltikin heikentynyt sähkönlaatu tulee monesti yllätyksenä. (Korpinen 2008a, 3.)

Sähkönlaatuun vaikuttavat:

- taajuus
- jännitteen taso
- hitaat ja nopeat jännitteenvaihtelut
- jännitepiikit
- yliaallot
- kolmivaihejärjestelmän epäsymmetria
- tasajännitekomponentti
- keskeytykset. (Korpinen 2008a, 3.)



KUVA 1. Sähkönlaatua heikentäviä tekijöitä (Sähköala.fi 2006.)

Kuvan 1 selvennyksien lisäksi sähkönlaatuun liittyviä käsitteitä ovat:

Välkynnällä tarkoitetaan (Flicker) valonlähteen luminanssivaihtelu, joka aiheutuu jännitteen muutoksista. Välkynnän häiritsevyyteen vaikuttaa sen amplitudi ja taajuus.

Transienttilyijännitte tarkoittaa lyhytaikaista värähtelevää tai ei - värähtelevää ylijännitettä. Transienttilyijännitteen kestoaika on hyvin lyhyt ja se vaimenee nopeasti. Transienttilyijännite aiheutuu esimerkiksi ukkosesta tai sulakkeiden laukeamisesta.

Jännitteen tasakomponentti. Tasakomponentteja syntyy tasasuuntaajista ja elektronisesta ohjauksesta. Tasakomponentin osuus on usein pieni, mutta kasvaessa korkeaksi se voi vahingoittaa muuntajaa, lisätä korroosiota liitoksissa ja aiheuttaa häiriötä herkille laitteille.

Verkon signaalijännite tarkoittaa verkkojännitteeseen lisättyä tiedonsiirtoon tarkoitettua signaalia.

Edellä mainittujen ilmiöiden lisäksi huono sähkönlaatu näkyy maadoitusvikoina, virtojen aiheuttamina magneettikenttinä, jännitteiden aiheuttamina sähkökenttinä ja radiotaajuisina häiriöinä. (ABB 2000a, 1.)

2 SÄHKÖNLAATUSTANDARDI SFS-EN 50160

Mittaustuloksien arvioimista varten on olemassa laatustandardi, joka määrittelee jännitteen pääominaisuudet sähkökäyttäjän pien- ja keskijännitejakeluverkossa normaalikäyttötilanteessa. Standardissa annetaan rajat, joiden sisällä jännitteen ominaisuuksien on pysyttävä eli mikä sähkönlaadun perustason on oltava, tämä ei siis vielä itsessään riitä todistamaan sitä, että verkko olisi täysin häiriövapaa. (Viitala 2006a, 1.)

Pienjänniteverkoissa pääjännite on 1000 VAC tai alle, nollan ja vaiheen välinen nimellisjännite 230 V. Rajat määritellään jännitteen taajuudelle, suuruudelle, aaltomuodolle, jännitemuutoksille, harmoniselle yliaaltojännitteille, signaalijännitteille ja jakelujännitteen epäsymmetrialle. Standardia sovelletaan 35 kV jännitetasoon asti. (Viitala 2006a, 1.)

Standardi on tarkemmin selitettyä seuraavassa taulukossa 1:

TAULUKKO 1. EN50160 - laatustandardi (Viitala 2006a, 2-5.)

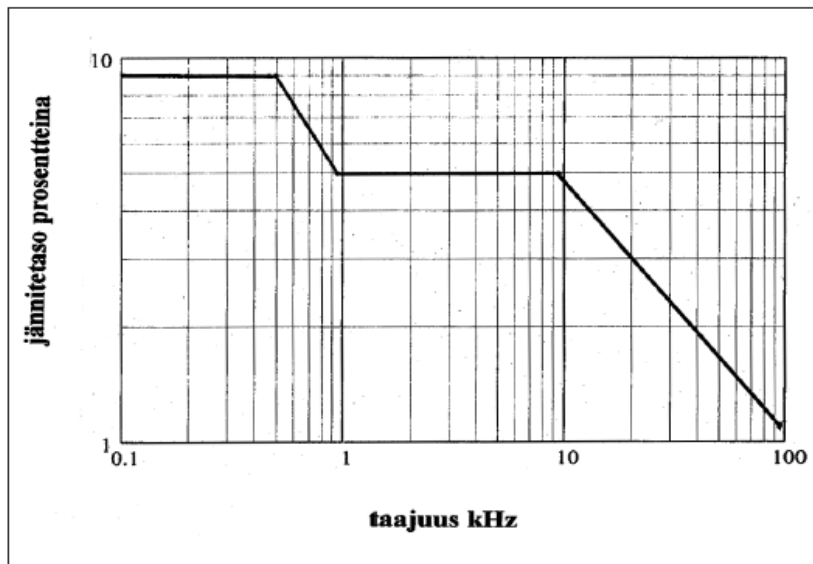
Mittattava suure	Mittaustapa	Rajat	Vuodessa
Taajuus	10 s keskiarvo	±1 % +4 %/-6 %	99,5 % vuodesta 100 % viikosta
Syöttäjännitetaso vaihtelut	Tehollisarvojen 10 min keskiarvo	Lyhyt kesto ja 5 % Un Lyhyt kesto ja 10 % Un	95 % viikosta 100 % ajasta
Nopeat jännitemuutokset	Muutosten lukumäärät	Lyhyt kesto, 5 % Un Lyhyt kesto, 10 % Un	Normaali Muutamia kertoja päivässä
Välkyntä	Plt(2h) mittauksia 84 kpl		95 % viikon Plt-arvoista ≤ 1
Epäsymmetria	Vastakomponentin 10 min rms-arvojen keskiarvo suhteessa myötäkomponenttiin	<2 %	Viikossa 95 % arvoista
Yliaaltojännitteet	10 min keskiarvo THD ≤ 8 %	Taulukko	95 % viikosta
Verkon signaalijännitteet	3 s keskiarvot		99 % ei ylitä käyrän rajaa

Esimerkiksi jännitetason vaihtelulla 95 prosentin raja 10 minuutin tehollisarvojen keskiarvolle on 207 ... 253 V ja 100 prosentin raja 195,5 ... 253 V. Yliaalloille on määrätty taulukon 2 mukaiset raja-arvot EN50160-standardissa:

TAULUKKO 2. Rajat yliaalloille (Viitala 2006a, 3.)

Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
Kolmella jaottomat		Kolmella jaolliset			
Järjestysluku	Suhteellinen	Järjestysluku	Suhteellinen	Järjestysluku	Suhteellinen
h	Jännite	h	Jännite	h	Jännite
5	6 %	3	5 %	2	2 %
7	5 %	9	1,5 %	4	1 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6...24	0,5 %
13	3 %	21	0,5 %		
17	2 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

Raja verkon signaalijännitteille on esitetty kuviossa 1:



KUVIO 1. Pien- ja keskijänniteverkossa käytettävien signaalitaajuuksien jännitetasot prosentteina nimellisjännitteestä (Viitala 2006a, 3.)

Jännitetason pitää olla yhtä suuri tai alle kuvion 1 ilmoittamasta rajasta. Laatustandardi ei määrittele rajoja jännitekuopille, sähköntoimitusvarmuudelle, keskeytyksille tai ylijännitteille.

3 YLIAALLOT

Oletuksena on, että verkosta mitattu jännite on puhdasta siniaaltoa. Näin ei kuitenkaan enää nykyisin ole, vaan jännitteen muoto voi poiketa paljonkin siniaallosta. Tämä ilmiö on yliaaltojen syytä, joita voi esiintyä jännitteessä ja virrassa. Jännitteen säröytymisen lisäksi yliaallot aiheuttavat mm (ABB 1999, 4.):

- elektroniikan ja automaation laitevikoja
- johdonsuojakatkaisijoiden ja vastaavien suojalaitteiden laukeamista
- ohjaus- ja mittaussignaalien vääristymistä
- ylimääräisiä teho- ja jännitehäviöitä kaapeleissa
- muuntajille ja moottoreille lämpenemistä ja vaurioita
- moottoreiden epätahtimomenteja, joista aiheutuu mekaanisia rasituksia moottoreiden laakereille ja rakenteille.

Yliaaltojen perusominaisuuksia taulukossa 3:

TAULUKKO 3. Yliaaltojen komponentteihin jako ja taajuudet (Fluke 2006, 48.)

Harm.	1.	2.	3.	4.	5.	6.
Taajuus	60 Hz	120 Hz	180 Hz	240 Hz	300 Hz	360 Hz
	50 Hz	100 Hz	150 Hz	200 Hz	250 Hz	300 Hz
Kiertosuunta	+	-	0	+	-	0

Harm.	7.	8.	9.	10.	11.	...
Taajuus	420 Hz	480 Hz	540 Hz	600 Hz	660 Hz	...
	350 Hz	400 Hz	450 Hz	500 Hz	550 Hz	...
Kiertosuunta	+	-	0	+	-	...

Yliaallot voidaan taulukon 3 mukaan jakaa myötä, vasta ja nollakomponentteihin. Yliaaltovirtojen vaikutukset komponentin mukaan:

TAULUKKO 4. Yliaaltovirtojen vaikutukset (ABB 1999, 7.)

Harmonisten yliaaltovirtojen vaikutukset		
Sekvenssi	Pyörimissuunta	Vaikutukset
+	Eteen	Kuumentamista
-	Taakse	Kuumentaminen, moottoriongelmat
0	Ei vaikutusta	Nollajohtimen kuumentaminen, summautuminen nollajohtimeen

Yliaaltoja aiheutuu esimerkiksi valaistus-, tietokone- ja puolijohdekuormista, kuten taajuusmuuttajista sekä UPS-laitteistosta sekä hitsauskoneista. Yleisimmät yliaallot ovat järjestysluvuiltaan kolmas, viides ja seitsemäs yliaalto. Yleisesti sanottuna 1-vaiheinen kuorma tuottaa kolmatta yliaaltoa ja 3-vaiheinen kuormitus muut yliaallot. (ABB 1999, 4-6.)

3.1 Yliaaltoanalyysi

Sinimuotoisesta poikkeavan jännitteen voidaan ajatella koostuvan useasta eritaajuisesta sinimuotoisesta signaaleista. Tällainen tilanne on tavallinen, sillä täysin puhdas sinimuotoinen jännitteen signaali on harvinainen. Yliaaltojen matemaattinen käsittely perustuu siihen, että jokainen jaksollinen funktio, jonka siirtofunktio on muotoa $f(t) = f(t+T)$ voidaan kehittää Fourierin sarjaksi. (Korpinen 2008b, 4-6; Nyysönen 2010, 10.)

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (1)$$

kaavassa U_0 = jännitteen tasakomponentti, n = yliaallon järjestysluku ja f = perustaajuuden suuruus. Jännitteen tasakomponentti ja kertoimet a_n ja b_n lasketaan arvot seuraavilla yhtälöillä:

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad (2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \cos(n \cdot 2 \cdot \pi \cdot t) dt \quad (3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \sin(n \cdot 2 \cdot \pi \cdot t) dt \quad (4)$$

Kaavoissa T = jakson aika.

Sarjakehitelmällä saadaan laskettua yksittäisten yliaaltojen särökertoimet, joiden avulla signaali voidaan esittää viivaspektrinä taajuuskomponentteihin muutettuna. Laskenta mahdollistaa myös THD:n, eli kokonaissärökertoimen laskemisen, joka

ilmaisee perusaaltoa suurempien taajuuksien määrän perustaajuudesta. THD lasketaan kaavalla 5 (Alanen 2006, 16.):

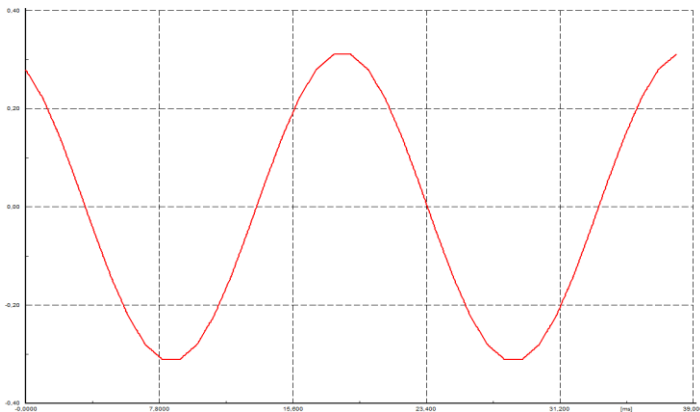
$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{F_n}{F}\right)^2} \quad (5)$$

kaavassa 5: F_n = n:nnen yliaallon peruskomponentti ja F = signaalin perustaajuuden tehollisarvo.

TAULUKKO 5. THD:n raja-arvot jännitteen yliaalloille (ALANEN 2006, 15.)

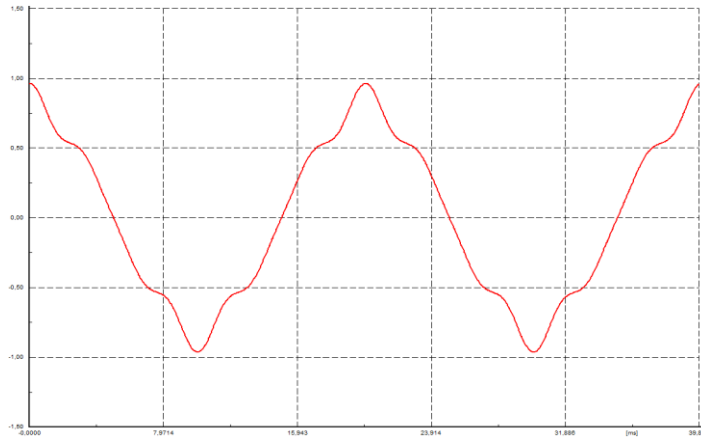
Jännitteen ominaisuus	Hyvä laatu (Sener)	Normaali laatu (Sener)	SFS-EN 50160:n mukainen laatu
Harmoiset yliaaltojännitteet	$U_{n\%} \leq$ Taulukko 2-3 arvot ja THD $\leq 3\%$	$U_{n\%} \leq$ Taulukko 2-3 arvot ja THD $\leq 6\%$	95 % $U_{n\%} \leq$ Taulukko 2-3 arvot ja THD $\leq 8\%$

Kuvissa 2 ja 3 on esiteltyinä puhdas sinikäyrä ja sinikäyrä, jossa on esitettyinä yliaaltojen vaikutusta jännitteen käyrämuotoon. Kuvat on tehty tässä työssä käytetyllä verkon mallinnusohjelmalla:



KUVA 2. Puhdas sinikäyrä Power Factory-ohjelmalla simuloituna (KARVONEN 2013-04-04)

Lisätään simulointiohjelmalla sinikäyrään kolmas, viides ja seitsemäs yliaalto:



KUVA 3. Säröytynyt sinikäyrä (KARVONEN 2013-04-04)

Power factoryn lisäksi jännitteen käyrämuodon tarkkailu onnistuu muillakin ohjelmilla, kuten vaikkapa Matlabilla.

3.2 Energian kulutuksen kasvu ja yliaallot

Yksi yliaaltojen haittapuoli on niiden aiheuttama kasvanut energian kulutus. Suurella yliaaltopitoisuudella voi olla iso vaikutus vuosittaiseen energiankulutukseen. Tämä on etenkin suurien tehdashallien ongelma, joilla yliaaltoja tuottavaa kuormaa löytyy paljon ja vuosittainen energian kulutus on suuri. Yliaaltojen aiheuttamista kustannuksista tehdashalleissa on esimerkkinä suuri 20 000 m²:n tehdashalli, jossa valaisutehoa yhteensä 600 kW:

"Kun huomasimme kolmannen yliaallon aiheuttavan ongelmia, etsimme niihin ratkaisua. Tämä THF-suodatin selvitti ongelmat. Totesimme 6 % energiansäästön ja megneettikentän pienenemisen tiloissamme. Suunnittelemmekin nyt suodattimien asentamista kaikkiin tiloihimme. Tämä merkitsee Scaniaalle noin miljoonan kruunun säästöä vuodessa." (ABB 1996, 4 .)

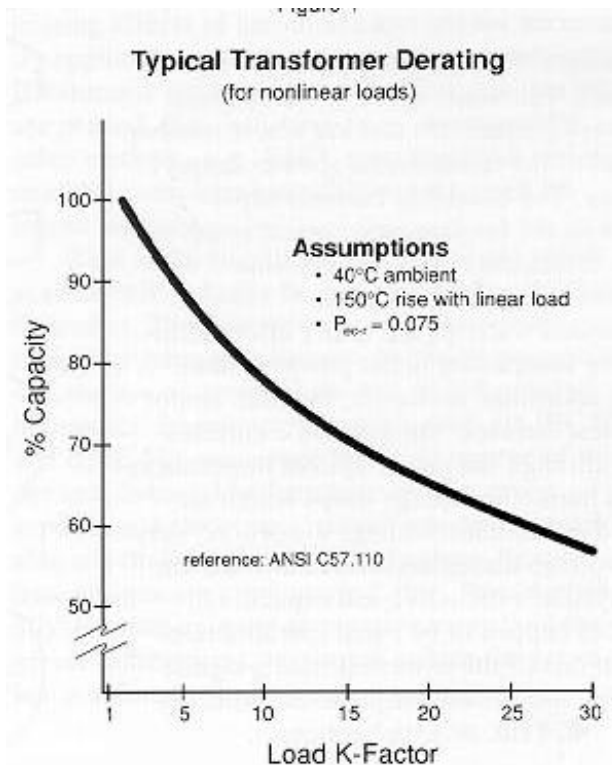
3.2.1 Yliaallot muuntajissa

Muuntajan nimellisarvojen mukaisen kuormituksen vaatimus on, että jännite ja virta ovat sinimuotoisia. Kun sinikäyrä vääristyy yliaaltojen vaikutuksesta, muuntajan tyhjäkäyntihäviöt kasvavat ja kuormitettavuus pienenee. Kuitenkin jännitekäyrän

yliaalloista aiheutuva tyhjäkäyntihäviön kasvu on niin pieni, ettei sitä tarvitse ottaa huomioon kuin tilanteissa joissa muuntaja on moottorin ja taajuusmuuttajan välissä. Virtakäyrän yliaallot suurentavat muuntajan kuormitushäviöitä. Tämä johtuu kuormitushäviöistä, joita kasvattaa taajuudesta riippuvat pyörrevirrat ja niistä seurauksena oleva virran epätasainen tiheys muuntajassa. (Hietalahti 2011, 30-31.) Kolmannen yliaallon aiheuttamia haittoja muuntajiin:

- tehohäviöiden kasvu
- resonanssiriski
- nollavirta jää kiertämään kolmiokäämitykseen
- elinikä lyhenee
- äänekkyyys
- lämpeneminen. (ABB 1999, 18.)

Yliaaltovirtojen kuormittavuutta kuvaa k-factor (k-kerroin). Kerroin ilmaisee, kuinka suurella kuormalla muuntajaa voidaan käyttää kun kuorma aiheuttaa tietyn k-kertoimen. Kertoimen vaikutusta muuntajaan kuvaa seuraava kuva:



KUVIO 2. K-kertoimen vaikutus muuntajan kuormitettavuuteen (Pulkinen 2012, 14.)

Kuvan perusteella voidaan sanoa, että yliaaltopitoisessa verkossa on muuntaja ylimitoitettava, jolloin sitä voidaan kuormittaa riittävän pienellä kuormituksella. Toinen vaihtoehto on käyttää ns. K-muuntajia, jotka on suunniteltu käytettäväksi yliaaltopitoisessa verkossa. (Pulkinen 2012, 14.)

3.3 Yliaaltojen aiheuttamat resonanssitilanteet

Energian kulutuksen kasvamisen ja nollajohtimen kuormittumisen lisäksi yliaallot aiheuttavat mm: mittareiden/ automaation virheikäyttäytymistä ja kompensointikondensaattoreiden eliniän pienenemistä tai rikkoontumista. (ABB 1999, 19.)

Nämä ongelmat syntyvät kun jokin yliaallon taajuus on lähellä verkon resonanssitaajuutta. Sarja- tai rinnakkaisresonanssitilanteessa yliaaltovirrat tai jännitteet voivat moninkertaistua normaaliin tilanteeseen nähden. Resonanssitaajuus lasketaan kaavalla 6: (Korpinen 2008b, 22; Nyysönen 2010, 16.)

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}} \quad (6)$$

Resonanssitaajuus voidaan laskea myös kaavoilla 7 ja 8:

$$f_r = f_1 \cdot \sqrt{\frac{X_C}{X_k}} \quad (7)$$

$$f_r = f_1 \cdot \sqrt{\frac{S_k}{Q_c}} \quad (8)$$

Kaavoissa f_r = rinnakkaisresonanssitaajuus, f_1 = verkon nimellistaajuus, X_C = kondensaattorin reaktanssi, X_k = verkon oikosulkureaktanssi, S_k = verkon oikosulkuteho, Q_c = verkon kompensointiteho

Kaava 8 osoittaa, että oikosulkutehon kasvaessa resonanssitaajuus kasvaa ja yhä suurempi osa yliaalloista kulkeutuu syöttävään verkkoon päin. Kompensointi taas

vaikuttaa pienentävästi resonanssitaajuuteen. Resistiivinen kuorma vaimentaa resonansseja, mutta ei vaikuta resonanssitaajuuteen. (Korpinen 2008b, 22.)

3.3.1 Sarjaresonanssi

Sarjaresonanssi aiheutuu tavallisesti loistehon kompensointikondensaattorien ja syöttävän muuntajan hajainduktanssien välille. Resonanssitilanteen reaktanssi on pieni, jolloin verkosta tulevalla yliaaltovirralla on pieni-impedanssinen sulkeutumistie. Yliaaltovirta määräytyy impedanssin ja yliaaltotaajuuden jännitteen perusteella, jolloin yliaaltovirran aiheuttama jännitesärö verkossa jää pieneksi. Tilanne on toinen kompensointikondensaattorilla, joka imee jänniteyliaallon pieneksi, toimien samalla kuten yliaaltosuodatin. (Korpinen 2008b, 23.)

3.3.2 Rinnakkaisresonanssi

Rinnakkaisresonanssi syntyy esimerkiksi suuntaajan rinnalle kytketyn kompensointikondensaattorin välille. Rinnakkaisresonanssissa impedanssi on suuri, joten jännite säröytyy voimakkaasti. Kyseisessä tilanteessa resonanssiipiirissä kulkee suuri virta, joka voi aiheuttaa kompensoinnin ylikuormittumisen. Tietyllä resonanssitaajuudella syntyvän jännitteen suuruus riippuu rinnakkaisresonanssiipiirin impedanssista ja yliaaltolähteen tehosta. (Korpinen 2008b, 24.)

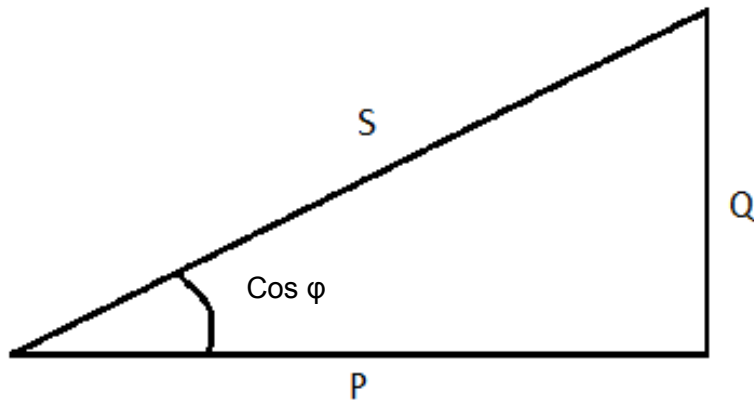
3.4 Loisteho

Jotku verkon komponentit, kuten moottorit, purkauslamput ja muuntajat tarvitsevat toimiakseen pätötehon lisäksi myös loistehoa, joka menee magneettikenttään tai sähkökenttään varastoituvaan energiaan. Pätöteho ja loisteho muodostavat kaavan 9 mukaisesti näennäistehon: (TUT.FI 2012, 4.)

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (9)$$

Kaavassa 5 S = Näennäisteho (VA), P = Pätöteho (W) ja Q = Loisteho (VAr)

Sama kaava voidaan esittää myös ns. tehokolmiona:



KUVIO 3. Tehokolmio (TUT.FI 2012, 3.)

Kuorman loistehon tarve suhteessa pätötehoon voidaan laskea kaavalla 10:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (10)$$

Näennäis-, pätö- ja loistehojen kaavat 3-vaihejärjestelmässä:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (11)$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (12)$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad (13)$$

Loisteho on välttämätön laitteen toiminnan kannalta, mutta sillä ei kuitenkaan voi tehdä varsinaista työtä, eli mikään laite ei toimi pelkästään loisteholla. Yhtäläistä loista ja pätöteholle on kuitenkin se, että ne kummatkin kuormittavat johdinta samalla tavalla ja kumpikin teho on jollain tavalla myös tuotettava sitä tarvitsevalle laitteelle. (STEK.FI 2009.)

Kun mitoituksessa lasketaan kuorman ottamia virtoja, on se tehtävä näennäistehon mukaan. Jos loistehon osuus näennäistehosta pidetään mahdollisimman pienenä, voidaan myös välttyä epätaloudelliselta ylimitoitukselta kuorman ottamien virtojen suhteen. Kuorman ottama virta näennäistehon mukaan lasketaan kaavalla: (HARSIA 2003.)

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U} \quad (14)$$

Myös yliaallot aiheuttavat loistehoa. Yliaaltojen tuottamaa loistehoa kutsutaan säröloistehoksi, se ei loistehon tapaan kykene sähkömekaaniseen työhön. Säröteho lasketaan monesti kaavalla:

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \quad (15)$$

3.5 Loistehon kompensointi ja yliaaltojen suodatus

Loisteho voidaan ottaa verkosta tai tuottaa se kulutuskohteessa joko keskitetysti tai laite tai ryhmäkohtaisesti kompensointiparistoilla. Mikäli loistehoa otetaan sähkölaitokselta, on käytäntönä, että tietyn ilmaisrajan yli menevästä loistehosta maksetaan loistehon käyttäjää. Esimerkiksi paikallisella verkkoyhtiöllä on seuraava tapa loistehon laskuttamiseen (Harsia 2003.):

” Loistehomaksu määräytyy 1.11.– 31.3. arkipäivisin (maanantai -lauantai) kello 7-22 välisenä aikana kuukausittain mitatun suurimman tuntikeskitetyn (60 minuuttia) mukaan. Loistehomaksua laskutetaan osuudesta, joka ylittää 20% ilmaisosuuden laskutettavasta pätötehosta. Loistehomaksua laskutetaan kuukausittain talvikuukausilta (1.11. – 31.3.).” Loistehon hinta on Internetistä löytyvän hinnaston mukaan 4,27 euroa / kVAr,kk. (Savon Voima 2013.)

Loistehomaksun määrittelyyn on kaava:

$$Q_{lask} = Q_{max} - kP_{max} \quad (16)$$

Kaavassa 13 Q_{lask} = Laskutettava loisteho (kVAr), Q_{max} = Loistehon mitattu huippuarvo, P_{max} = Pätötehon mitattu huippuarvo (kW), k = ilmaisosuus (kVAr/kW) (UUSIMÄKI 2004, 3.)

Kompensointitarve voidaan laskea yhtälöllä:

$$Q = \frac{P}{\eta} (\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) \quad (17)$$

Yhtälössä 17 Q = Loistehon tarve, P = kuormituksen pätöteho, η = kuormituksen hyötysuhde, φ_1 = tehokulma ennen kompensointia ja φ_2 = tehokulma kompensoinnin jälkeen. (ABBB 2000c, 1.)

3.5.1 Kompensointitavat

Loistehon kompensointi on edullisinta tehdä mahdollisimman lähellä loistehoa tarvitsevaa laitetta. Kompensointitapoja on kolmea erilaista (Harsia, 2003.):

- Laitekohtainen kompensointi, tätä sovelletaan normaalisti moottoreiden tarvitseman loistehon tuottamiseen. Tässä kompensointitavassa loistehoa tuottava kondensaattori on hyvin lähellä laitetta tai osana sitä.
- Ryhmäkohtainen kompensointi, joka soveltuu parhaiten sellaisille kuormille joiden loisteho vaihtelee vähän. Kompensointi toteutetaan asentamalla kompensointi laiteryhmiä syöttävään ryhmäkeskukseen.
- Keskitetyssä kompensoinnissa loistehoa tuottava kompensointi sijaitsee ryhmä- tai pääkeskuksella tai se on kytkettynä suoraan muuntajan alajännitenapoihin. Keskitetty kompensointi soveltuu parhaiten tehtaisiin.

Kompensoinnilla parannetaan tehon siirtokyvyn lisäksi myös jännitetasoja. Tämä perustuu siihen, että loisteho-osuuden pienentymisen myötä myös kuormitusvirrat pienentyvät, jotka edelleen pienentävät jännitteenalenemaa. Loistehon kompensoinnissa on kuitenkin pidettävä huoli, ettei ylikompensointia tapahdu. Suunnittelemattomassa kompensoinnissa riskinä ovat ylijännitteiden syntyminen sekä yliaaltojen aiheuttamat resonanssitilanteet. (Harsia 2003; Korpinen 2008a, 18.)

3.6 Kompensointilaitteet

Kompensointikondensaattori voi olla osana keskusta tai olla oma erillinen yksikkönsä, jolla on oma sulakesuojattu lähtö keskuksessa. Kompensointikondensaattorin koko määräytyy loistehon tarpeen mukaan, joka saadaan arvioitua joko rakennusvaiheen tietojen perusteella tai mittaamalla. Kuristin mitoitetaan sellaiselle taajuudelle, että sen impedanssi on pois suodatettavalla yliaaltotaajuudella mahdollisimman pieni. (ABB 2012, 2-3.)

3.6.1 Automatiikkaparisto estokeloilla

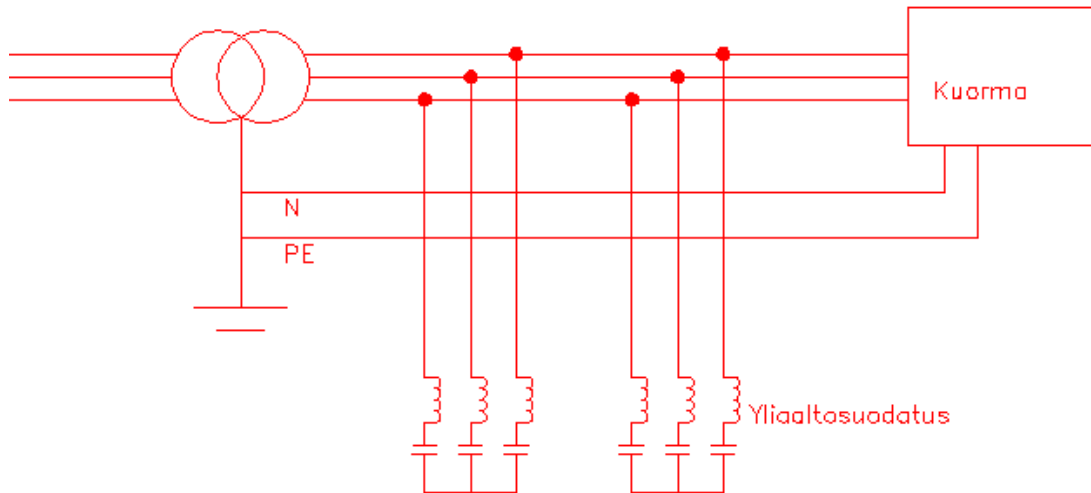
Lähes aina kompensointikondensaattorit koostuvat useammasta kondensaattorista ja kelasta koostuvista portaista, joissa sekä kondensaattori, että kela voivat olla mitoitettu eri suuruisiksi. Automatiikkaparistossa mikroprosessorilla toimiva loistehon säädin mittaa jatkuvasti verkon tehokerrointa ja lisää kompensointitarpeen mukaan portaittaisesti käytössä olevia kondensaattoreita. (Mäkinen 2004, 19.)

Kompensointikondensaattorin kapasitanssi muodostaa aina syöttävän verkon induktanssin kanssa rinnakkaisresonanssipiirin. Jos yliaaltoja esiintyy lähellä resonanssitaajuutta, ne voimistuvat moninkertaisiksi. Tämän takia kompensointia joudutaan ylimitoittamaan, jotta se kestäisi yliaaltojen vaikutukset. (ABB 2000c, 5; ABB 1999, 18.)

Estokeloilla varustetussa kondensaattorissa rinnakkaisresonanssin syntymisen vaara on estetty. Kuitenkaan estokelalla ei ole juurikaan yliaaltoja suodattavaa vaikutusta, vaan sen tarkoitus on suojata kondensaattoria. (ABB 2000c, 6.)

3.6.2 Yliaaltosuodatin

Yliaaltosuodatinta voidaan kutsua myös imupiiriksi. Se koostuu sarjaankytketyistä kondensaattorista ja kelasta. Imupiiri voidaan esimerkiksi mitoittaa viidennelle, seitsemännelle ja yhdelletoista yliaallolle. Perustaajuudella yliaaltosuodatin tuottaa loistehoa ja resonanssilanteessa suodattaa yliaaltoja. Yliaaltosuodattimien sijoitus kuviossa 4: (ABB 2000c, 8.)



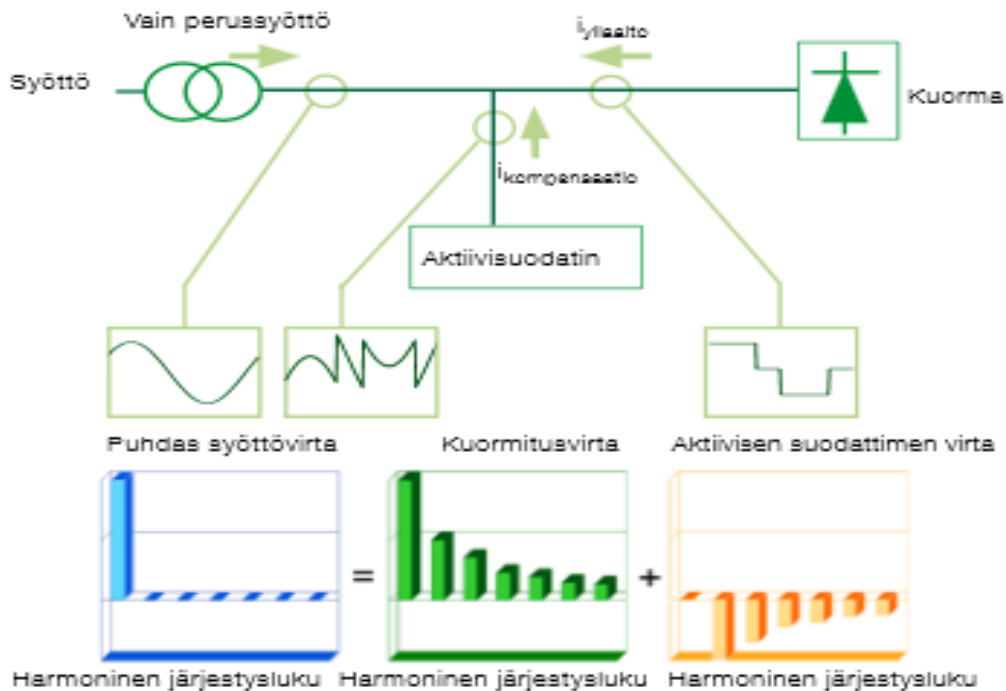
KUVIO 4. Imupiirien sijoitus (ABB 1999, 7.)

Kuviossa 4 on kuvattu kaksi erillistä imupiiriä, jotka voivat olla mitoitettu suodattamaan järjestysluvultaan eri yliaaltoja, kuten viidettä ja seitsemättä yliaaltoa. Kumpikin imupiiri on esitetty kuvassa 3 portaisena, johon kuuluu kondensaattori sekä yliaaltoja suodattava kela.

3.6.3 Aktiivisuodatin

Aktiivisuodatin on tehoelektroniikan sovellus, joka tuottaa yliaaltovirrälle vastakkaisia kompensatiovirtoja ja siten poistaa niitä. Aktiivisuodatin mittaa yliaalto- ja loistehokomponentin linjavirran ja vertaa sitä käyttäjän määrittämään arvoon, ero mitatun ja tavoitteen välillä poistetaan automaattisesti. Kompensointi ja suodatusmäärän lisäksi aktiivisuodattimella voidaan määrittää yliaallot, joita halutaan poistaa. (ABB 2011, 6.)

Aktiivisuodatin sopii sellaisten kuormien kompensointiin, joissa kuormitus ja yliaaltopitoisuus vaihtelevat nopeasti. Parhain ominaisuus on, ettei tähän kompensointiratkaisuun tarvita tarkkaa analyysia asennettavasta verkosta. (ABB 2011, 3.) Kuviossa 5 aktiivisuodattimen toimintaperiaate esiteltynä:



KUVIO 5. Aktiivisuodattimen toiminta (ABB 2011, 3.)

3.6.4 Kompensoinnin valinta

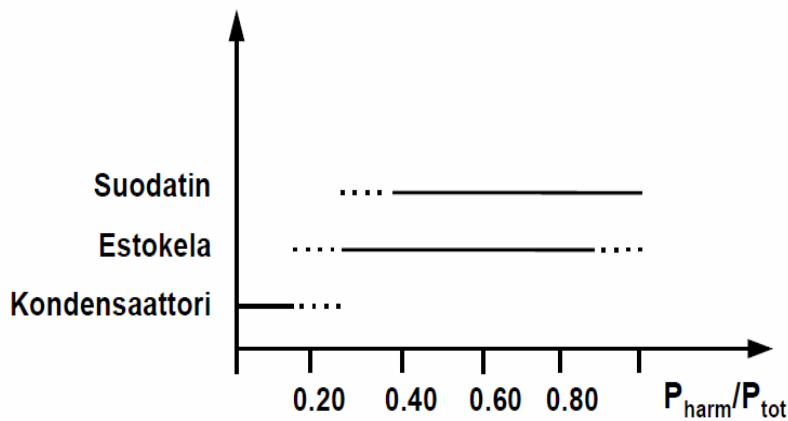
Kompensoinnin valinta voi perustua joko kuormituksen tarkkaan tuntemiseen tai mittaukseen, jossa voidaan selvittää samalla kertaa pätö- ja loistehon määrä sekä yliaaltojen määrä verkossa. Kun tehot ovat selvillä voidaan laskea kokonaistehokerroin kaavalla 13, samalla kaavalla saadaan myös tehokerroin kun otetaan huomioon ainoastaan verkkoyhtiön sallima loistehon ilmaisosuus.

Tuloksena saadaan nykyinen tehokerroin ja ilmaisen loistehon huomioon otettava tavoitetehtokerroin. Kun tehokerrointa halutaan nostaa tiettyyn lukemaan nykyisestä käytetään taulukkoa:

TAULUKKO 6. Tehokerrointaulukko (ABB 2000c, 2.)

$\cos \varphi_1$	$\cos \varphi_2$							
	1	0,99	0,98	0,97	0,95	0,90	0,85	0,80
0,50	1,73	1,59	1,53	1,48	1,40	1,25	1,11	0,98
0,53	1,60	1,46	1,40	1,35	1,27	1,12	0,98	0,85
0,55	1,52	1,38	1,32	1,27	1,19	1,03	0,90	0,77
0,58	1,40	1,26	1,20	1,15	1,08	0,92	0,78	0,65
0,60	1,33	1,19	1,13	1,08	1,00	0,85	0,71	0,58
0,63	1,23	1,09	1,03	0,98	0,90	0,75	0,61	0,48
0,65	1,17	1,03	0,97	0,92	0,84	0,68	0,55	0,42
0,68	1,08	0,94	0,88	0,83	0,75	0,59	0,46	0,33
0,70	1,02	0,88	0,82	0,77	0,69	0,54	0,40	0,27
0,73	0,94	0,79	0,73	0,69	0,61	0,45	0,32	0,19
0,75	0,88	0,74	0,68	0,63	0,55	0,40	0,26	0,13
0,78	0,80	0,66	0,60	0,55	0,47	0,32	0,18	0,05
0,80	0,75	0,61	0,55	0,50	0,42	0,27	0,13	
0,83	0,67	0,53	0,47	0,42	0,34	0,19	0,05	
0,85	0,62	0,48	0,42	0,37	0,29	0,14		
0,86	0,59	0,45	0,39	0,34	0,26	0,11		
0,87	0,57	0,42	0,36	0,32	0,24	0,08		
0,88	0,54	0,40	0,34	0,29	0,21	0,06		
0,89	0,51	0,37	0,31	0,26	0,18	0,03		
0,90	0,48	0,34	0,28	0,23	0,16			
0,91	0,46	0,31	0,25	0,20	0,13			
0,92	0,43	0,28	0,22	0,18	0,10			
0,93	0,40	0,25	0,19	0,14	0,07			
0,94	0,36	0,22	0,16	0,11	0,03			
0,95	0,33	0,19	0,13	0,08				
0,96	0,29	0,15	0,09	0,04				
0,97	0,25	0,11	0,05					
0,98	0,20	0,06						
0,99	0,14							

Taulukosta saadaan kerroin, jolla mittausjakson pätötehon huippuarvo kerrotaan. Tällöin saadaan laskettua tarvittavan loistehon määrä, joka nostaa tehokertoimen haluttuun arvoonsa. Kompensointityypin valinnassa voidaan käyttää seuraavaa kuviota:



KUVIO 6. Kompensointityypin valinta (ABB 2000c, 6.)

3.7 Muut keinot vähentää yliaaltoja

Imupiirit, aktiivisuodattimet ja kolmannen yliaallon suodatin ovat keino vähentää jo olemassaolevia yliaaltoja verkossa. Yliaaltojen määrää on kuitenkin vaikea tietää ilman mittauksia, tästä johtuen niiden rajoittamiseen ja vaikutusten minimoimiseen on varauduttava: (Nyyssönen 2010, 23.)

- ylilimitoittamalla
- taajuusmuuttajan pulssilukua kasvattamalla.

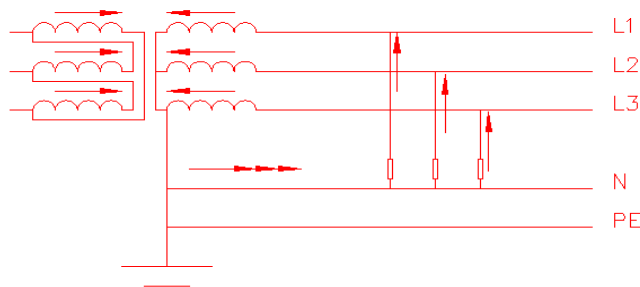
3.7.1 Ylilimitoittaminen

Yksi haitallisimmista yliaaltojen ominaisuuksista on niiden nollajohdinta kuormittava vaikutus. Suojaamattoman nollajohtimen yliaaltojen aiheuttama ylikuormitus voi johtaa jopa tulipalon vaaraan, eikä sähköverkkoja monesti myöskään ole mitoitettu yliaaltovirtojen tuoman lisäkuormituksen kestäväksi. Nollajohdinta kuormittavat kolmella jaolliset ja parittomat yliaallot. Kolmella jaolliset yliaallot esimerkiksi 3. yliaalto summautuu nollajohtimeen epälineaarissa kuormituksessa ja voi aiheuttaa jopa vaihejohtimen suuruisen yliaaltovirran verkkoon. (ABB 1999, 10.)

Nollajohtimeen koituvan haittavaikutuksen minimoimiseksi yleinen tapa on ylilimitoittaa verkko. Tällä ei kuitenkaan saada poistettua yliaaltoja verkosta, ainoastaan vähentämään niiden vaikutusta. Nollajohtimen koolle on annettu seuraavia määräyksiä:

- nollajohtimen on oltava yksivaihepiirissä sama vaihejohtimen poikkipinnasta riippumatta
- monivaihepiireissä nolla ja vaihe ovat yhtä suuret kun vaihejohdin on enintään 16 mm^2 kuparia tai 25 mm^2 alumiinia.

Yliaaltojen aiheuttaman tulipalovaaran ehkäisemiseksi amerikkalainen CBEMA (Computer Business Equipment Association) on antanut suosituksen, jonka mukaan nollajohtimen pitäisi olla 1,73 kertaa vaihejohtimen pinta-ala. (ABB 1999, 12.)
Kolmannen yliaallon summautumista nollajohtimeen on havainnollistettu kuviossa 7:



KUVIO 7. Kolmannen yliaallon summautuminen nollajohtimeen (ABB 1999, 13.)

Jos kuvion 7 mukaisessa tilanteessa yhden vaiheen yliaaltopitoisuus on esimerkiksi 10%, on nollaan summautuva yliaaltovirta $3 \times 10\%$ eli 0,3 kertaa vaihevirta. (ABB 1999, 10.)

3.7.2 Taajuusmuuttajan pulssiluvun vaikutus yliaaltoihin

3-vaiheisista yliaaltolähteistä merkittävimpiä ovat tasasuuntaukseen käytettävät siltakytkennät. Suuntaajia on olemassa pulssiluvultaan 6, 12 ja 24, joista yleisin käytössä oleva on 6-pulssinen diodisilta. Yleisin käytössä oleva suuntaajakytkentä aiheuttaa eniten yliaaltoja, jotka ovat järjestysluvuiltaan 5,7 ja 11. Suuntaajan pulssiluvun kasvaessa esimerkiksi kuudesta kahteentoista, jännitteen säröytyminen pienenee huomattavasti. (ABB 2001, 18.)

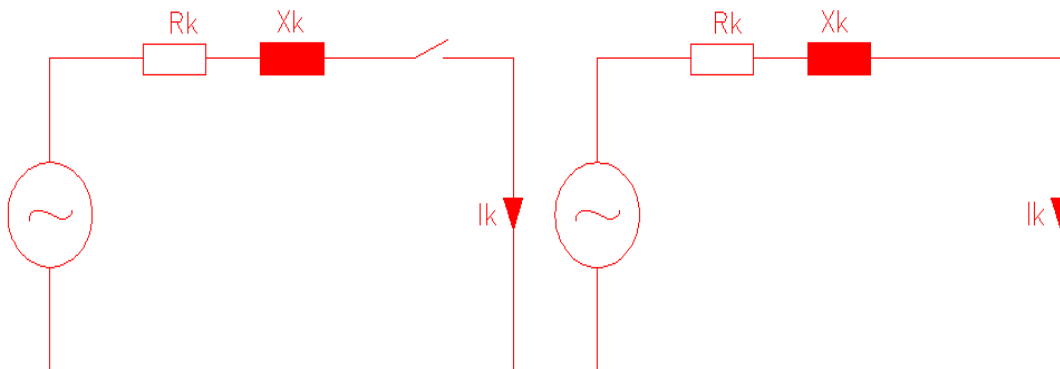
4 OIKOSULKUVIRRAT

Oikosulku tarkoittaa erittäin pieni-impedanssista vikaa normaalisti eri potentiaalissa olevien osien välillä. Oikosulussa esiintyvät virrat ovat huomattavasti suurempia kuin normaalissa tilanteessa esiintyvät virrat, tästä johtuen oikosulut pyritään poistamaan mahdollisimman nopeasti henkilö- ja laitevahinkojen estämiseksi. Erityisesti teollisuusverkoissa oikosulkuvirtojen hallinta on tärkeää, joissa on lyhyiden siirtoyhteyksien ansiosta suuret oikosulkuvirrat. (Tiainen 2010, 65; Huotari, Partanen 1998, 7.)

Mitoittamisen, oikosulkusuojauksen suunnittelun ja turvallisuuden takia on tunnettava oikosulkuvirrat eri verkon osissa. Oikosulkuvirtojen laskenta on tarpeen myös kun tarkastellaan, ovatko kaikki verkon osat oikosulkutilanteessa dynaamisesti ja termisesti kestäviä. Oikosulkua aiheuttaa esimerkiksi korjaus- ja huoltotöiden aikana sattuneet vahingot, eristysten vanheneminen, virheelliset käyttötoimenpiteet ja ylijännitteiden aiheuttamat valokaaret. (ABB 2000b, 1; Salminen 2009, 2.)

4.1 Oikosulkuvirran ominaisuudet

Oikosulkuvirralle voidaan muodostaa 1-vaiheinen sijaiskytkentä, jossa syöttöjännite $u(t) = \hat{u}\sin(\omega t + \varphi)$ ja oikosulkureaktansseja kuvataan oikosulkureaktanssina ja oikosulkuresistanssina. Oikosulkua kuvaa kuvion 8 mukainen tilanne, jossa kytkin menee kiinni jollain ajanhetkellä t : (Huotari, Partanen 1998, 2.)



KUVIO 8. Oikosulkupiirin 1-V. sijaiskytkentä (Huotari, Partanen 1998, 2.)

Tällöin pätee yhtälö:

$$R_k i_k + L_k \frac{di_k}{dt} = \hat{u} \sin(\omega t + \alpha) \quad (19)$$

Oikosulkuvirta voidaan esittää muodossa:

$$i_k(t) = \frac{\hat{u}}{Z_k} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\alpha - \varphi_k) \right] \quad (20)$$

Kaavassa \hat{u} = sinimuitoisen jännitteen huippuarvo, Z_k = oikosulkupiirin vaiheimpedanssi, ω = kulmataajuus, t = aika oikosulun alkuhetkestä, α = jännitteen vaihekulma nollakohdasta katsottuna oikosulun alkuhetkellä, φ_k = oikosulkupiirin impedanssin vaihekulma, τ = oikosulkupiirin aikavakio. Oikosulkuimpedanssille, vaihekulmalle ja aikavakiolle pätevät seuraavat kaavat:

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \quad (21)$$

$$\varphi_k = \arctan \frac{X_k}{R_k} \quad (22)$$

$$\tau = \frac{X_k}{\omega R_k} = \frac{L_k}{R_k} \quad (23)$$

Symmetrisessä kolmivaihejärjestelmässä laskenta tapahtuu myöskin kaavan 20 mukaisesti, jossa huomioidaan vaiheiden väliset vaihe-erot, jotka ovat 0, 120 ja 240 astetta:

$$i_k(t) = \frac{\hat{u}}{Z_k} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\alpha - \varphi_k) \right] \quad (24)$$

$$i_k(t) = \frac{\hat{u}}{Z_k} \left[\sin(\omega t + \alpha + 120^\circ - \varphi_k) - e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\alpha + 120^\circ - \varphi_k) \right] \quad (25)$$

$$i_k(t) = \frac{\hat{u}}{Z_k} \left[\sin(\omega t + \alpha + 240^\circ - \varphi_k) - e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\alpha + 240^\circ - \varphi_k) \right] \quad (26)$$

4.2 Oikosulkuvirran komponentit

Oikosulkuvirta koostuu yhtälön 20 mukaisesti kahdesta komponentista, tasa- ja vaihtokomponentista. Tasakomponentti vaimenee aikavakion τ mukaisesti. Koska kaava on johdettu sijaiskytkennästä, jossa ei ole lainkaan huomioitu oikosulun aikaista kuormitusta on virta oikosulun tapahtuessa nolla. Tästä johtuen tasa- ja vaihtovirtakomponentit ovat alkutilanteessa samansuuruiset, mutta vastakkaismerkkiset. (Huotari ja Partanen 1998, 3.)

4.2.1 Tasavirtakomponentin vaimeneminen

Tasavirtakomponentin vaikutuksesta oikosulkuvirta on joko symmetrinen tai epäsymmetrinen. Tasavirtakomponentin suuruuteen vaikuttaa aikavakion lisäksi paljon hetki, jolloin oikosulku tapahtuu: (Huotari ja Partanen 1998, 4-5.)

- kun $\alpha - \varphi_k = -90^\circ$ on tasavirtakomponentilla suurin mahdollinen alkuarvo
- kun $\alpha - \varphi_k = 0^\circ$ tai 180° ei tasavirtakomponenttia esiinny lainkaan.

Kun oikosulkutapahtuu lähellä tahtikonetta lasketaan tasavirtakomponenttiin vaikuttava aikavakio kaavalla:

$$\tau = \frac{X_d'' + X_n}{\omega(R_d + R_n)} \quad (27)$$

Kaavassa 27: X_d'' = generaattorin alkureaktanssi, X_n = verkon reaktanssi vikapaikan ja generaattorin välillä, R_d = generaattorin resistanssi, R_n = verkon resistanssi vikapaikan ja generaattorin välillä (Huotari ja Partanen 1998, 5.)

4.2.2 Vaihtovirtakomponentin vaimeneminen

Jos oikosulkuvirrasta merkittävä osa koostuu tahti- tai epätahtikoneiden syöttämästä oikosulkuvirrasta myös vaihtovirtakomponentti vaimenee tasavirtakomponentin tapaan. Vaihtovirtakomponentin vaimeneminen aiheutuu sähkökoneiden impedanssin kasvusta oikosulun aikana. Kun kuvassa 10 olevassa sijaiskytkennässä otetaan

huomioon tahtikoneet ja verkon muut impedanssit, saadaan kaava 28: (Huotari ja Partanen 1998, 5-7.)

$$i(t) = \sqrt{2} \left[(I_k'' - I_k') e^{\frac{-t}{\tau''}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + (I_k' - I_k) e^{\frac{-t}{\tau'}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + I_k \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + I_k'' e^{-t/\tau''} \sin(\alpha - \varphi) \right] \quad (28)$$

Kaavassa 28: I_k'' = alkuoikosulkuvirta, I_k' = muutosoikosulkuvirta, I_k = jatkuvan tilan oikosulkuvirta, τ'' = oikosulkuvirran alkuaikavakio ja τ' = oikosulkuvirran muutosaikavakio

$$I_k'' = \frac{E''}{\sqrt{(R_d + R_n)^2 + (X_d'' + X_n)^2}} \quad (29)$$

$$I_k' = \frac{E'}{\sqrt{(R_d + R_n)^2 + (X_d' + X_n)^2}} \quad (30)$$

$$I_k = \frac{E}{\sqrt{(R_d + R_n)^2 + (X_d + X_n)^2}} \quad (31)$$

Kaavoissa E'' = generaattorin alkutilan sähkömotorinen voima, E' = generaattorin muutos tilan sähkömotorinen voima, E = generaattorin pysyvän tilan sähkömotorinen voima, X_d'' = generaattorin alkureaktanssi, X_d' = generaattorin muutosreaktanssi, X_d = generaattorin pysyvän tilan reaktanssi, R_d = generaattorin resistanssi, R_n = generaattorin ja vikapaikan välinen resistanssi ja X_n = generaattorin ja vikapaikan välinen reaktanssi

Sähkömotoriset voimat lasketaan kaavoilla:

$$\underline{E}'' = \underline{U}_{ng} + jX_d'' \underline{I} \quad (32)$$

$$\underline{E}' = \underline{U}_{ng} + jX_d' \underline{I} \quad (33)$$

$$\underline{E} = \underline{U}_{ng} + jX_d \underline{I} \quad (34)$$

Kaavoissa \underline{U}_{ng} = tahtikoneen nimellinen vaihejännite ja \underline{I} = tahtikoneen kuormitusvirta ennen oikosulkua

Kun generaattori on tyhjäkäynnissä, pätee kaava:

$$E'' = E' = E = \frac{U_{ng}}{\sqrt{3}} \quad (35)$$

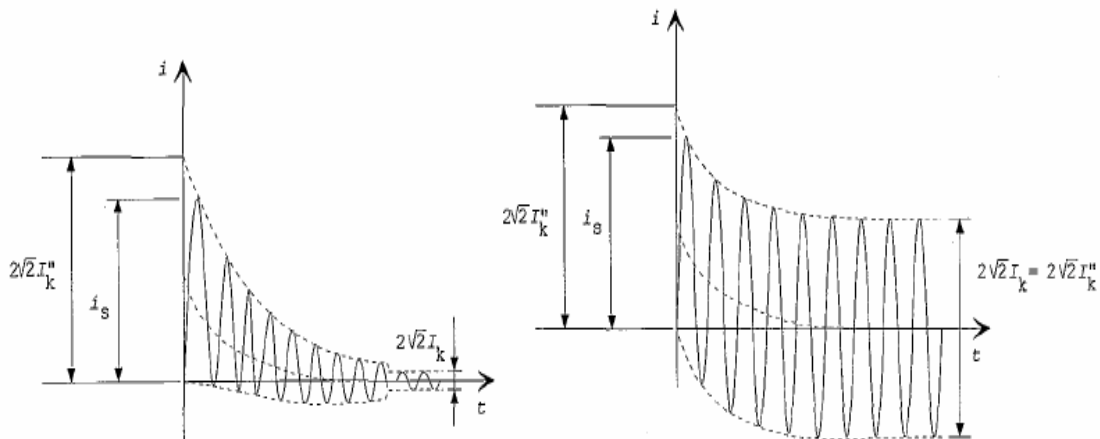
Ja aikavakioiden kaavat:

$$\tau'' = \frac{X_d'' + X_n}{X_d' + X_n} \tau_{d0}'' \quad (36)$$

$$\tau' = \frac{X_d' + X_n}{X_d + X_n} \tau_{d0}' \quad (37)$$

τ_{d0}'' = tyhjäkäyntitilan alku aikavakio ja τ_{d0}' = tyhjäkäyntitilan muutos aikavakio

Kuviossa esitetty oikosulkuvirtojen käyttäytymistä generaattorin läheisyydessä:



KUVIO 9. Vasemmalla oikosulku lähellä generaattoria ja oikealla oikosulku kaukana generaattorista (Huotari ja Partanen 1998, 7.)

4.3 Alkuoikosulkuvirta

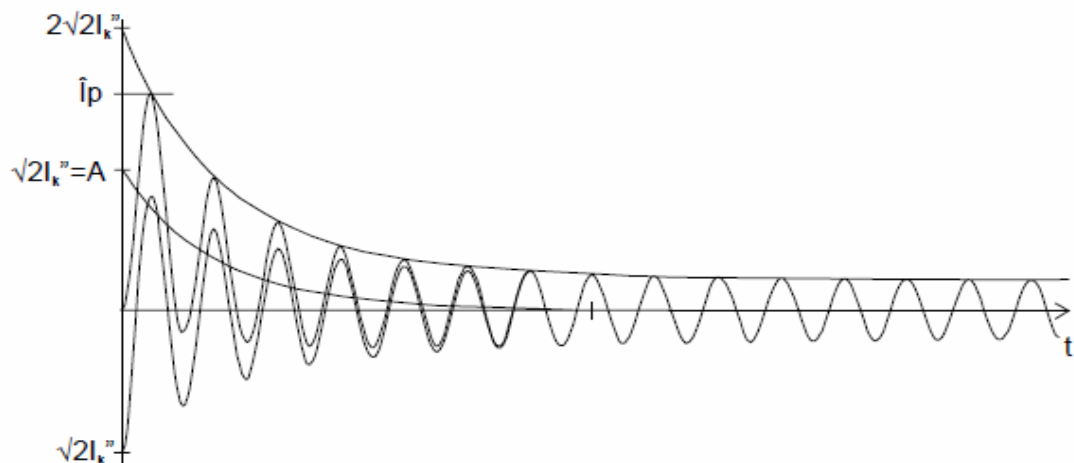
Alkuoikosulkuvirta tarkoittaa oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentin tehollisarvoa vian tapahtuessa. Alkuoikosulkuvirran laskeminen ei suoranaisesti ole käyttökelpoinen

mitoituksessa, sillä se johtaisi etenkin tehdasverkoissa ylimitoitukseen. Oikosulkuvirran arvo vian syntyhetkellä on kuitenkin hyvä selvittää, sillä sen avulla saadaan selvitettyä muita hyödyllisiä vikavirtoja. Virran suuruuteen vaikuttaa vikapaikkaa edeltävä verkon impedanssi ja etenkin tahti- ja epätahtikoneet. (Huotari ja Partanen 1998, 23.)

4.4 Sysäysoikosulkuvirta

Oikosulkuvirta saavuttaa suurimman arvonsa noin 10 millisekunnin kuluttua oikosulun tapahtuessa. Sysäysoikosulkuvirran suuruuteen vaikuttavat etenkin vikaa edeltävä kuormitus ja pyörivät koneet, jotka voivat kasvattaa oikosulkuvirtaa jopa 70%. Tästä johtuen moottorit on otettava huomioon sellaisissa sähköverkoissa, joissa moottorikäyttöä on paljon. (Salminen 2009, 19.)

Kuviossa 10 on esitetty vaimeneva tasavirtakomponentti (A), alkuoikosulkuvirta I_k'' ja sysäysoikosulkuvirta \hat{i}_p . Oikosulkuvirran käyrämuoto ja käyttäytyminen ajan suhteen on esitettyä kuviossa:



KUVIO 10. Oikosulkuvirran käyrämuoto (ABB 2000b, 1.)

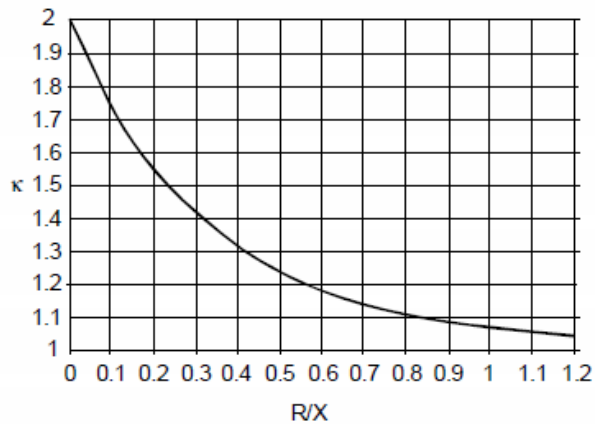
Sysäysoikosulkuvirta \hat{i}_p voidaan laskea alkuoikosulkuvirrasta seuraavalla kaavalla:

$$\hat{i}_p = k\sqrt{2}I_k'' \quad (38)$$

jossa k = sysäyskerroin, joka saadaan kaavasta:

$$k = 1,02 + 0,98e^{\frac{-3R}{X}} \quad (39)$$

Sysäyskerroimen määrittelyyn voi käyttää myös kuvaajaa, jossa kerroin on osoitettu suoraan R/X-suhteen mukaan:



KUVIO 11. Sysäyskerroin R/X-suhteen mukaan (Huotari ja Partanen 1998, 24.)

Tavallisia sysäyskerroimia pienjänniteverkossa:

TAULUKKO 7. Pienjänniteverkon sysäyskerroimia (Huotari ja Partanen 1998, 24.)

I_k''/kA	κ	$\cos\varphi$
≤ 10	1,2	0,5
≤ 20	1,4	0,3
≤ 50	1,5	0,25
> 50	1,6	0,2

Jos oikosulkupiiriä syöttää useampi toisistaan riippumaton lähde, voidaan vikakohtan sysäysoikosulkuvirta laskea eri lähteiden sysäysoikosulkuvirtojen summana kaavalla:

$$i_s = i_{s1} + i_{s2} + \dots + i_{sn} \quad (40)$$

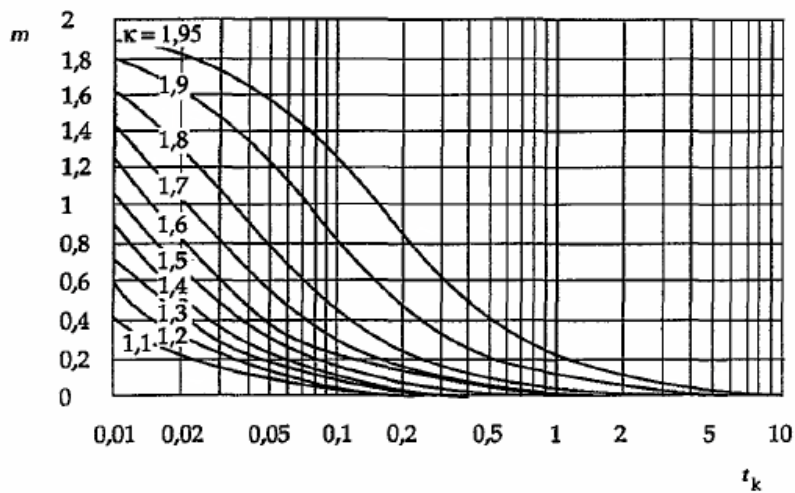
4.5 Terminen oikosulkuvirta

Koska oikosulku aiheuttaa verkon osissa lämpenemistä, on terminen oikosulkuvirta otettava huomioon mitoituksessa. Mitoitusta varten on mahdollista laskea virta, jolla on sama kestoaika ja lämmittävä vaikutus kuin varsinaisella oikosulkuvirralla.

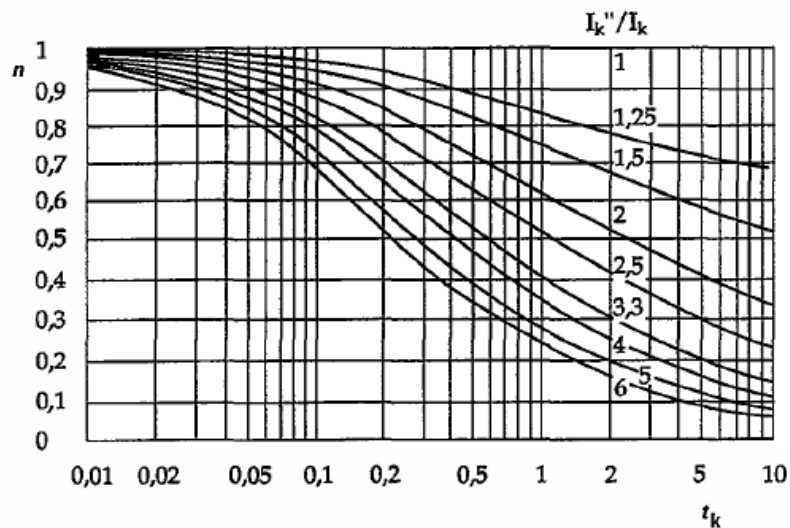
Terminen oikosulkuvirta saadaan laskettua alkuoikosulkuvirran avulla kaavasta: (Rauhala 2011, 37.)

$$I_{th} = I_k'' \cdot \sqrt{m + n} \quad (41)$$

kaavassa m = tasavirtatekijä ja n = vaihtovirtatekijä kummallekin on olemassa omat kuvaajansa, joista arvot voidaan määrittää:



KUVIO 12. Tasavirtatekijä m määrittämiseen käytettävä kuvaaja (Huotari ja Partanen 1998, 30.)



KUVIO 13. Vaihtovirtatekijän n määrittämiseen käytettävä kuvaaja (Huotari ja Partanen 1998, 30.)

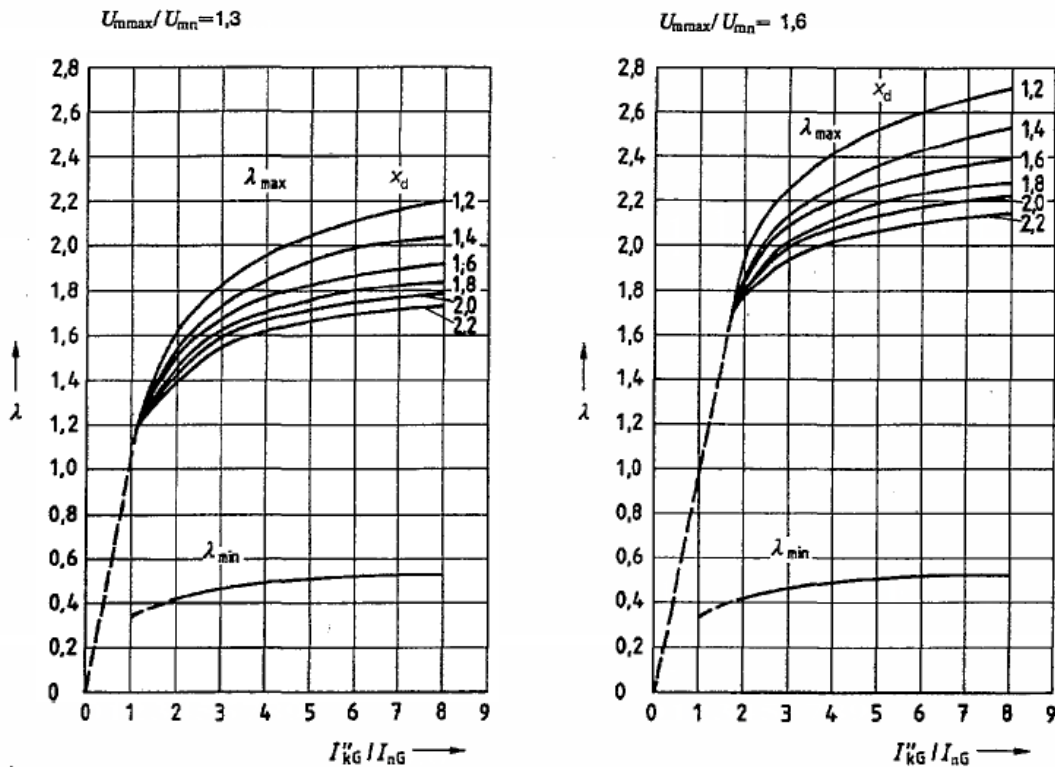
4.6 Pysyvän tilan oikosulkuvirta

Kun kaikki muutosilmiöt ovat vaimentuneet vikavirrasta, on se silloin saavuttanut pysyvän tilan oikosulkuvirran. Pysyvän tilan oikosulkuvirtaan vaikuttavat mm. tahtikoneiden magnetointitavat ja säädöt, verkon kytkentätilat ja muuntajien säädöt. Näin ollen tarkkojen arvojen laskeminen on vaikeaa. Yleensä riittääkin, että pysyvän tilan oikosulkuvirralla lasketaan vain sen maksimiarvo. Maksimiarvo riittää, koska suojat ehtivät yleensä toimimaan ennen kuin vikavirta saavuttaa pysyvän tilan arvon. (Huotari ja Partanen 1998, 25.)

Seuraavaa kaavaa voidaan käyttää tilanteessa, jossa vikaantunutta säteittäistä verkkoa syöttää vain yksi tahtikone:

$$I_{kmax} = \lambda_{max} I_{rG} \quad (42)$$

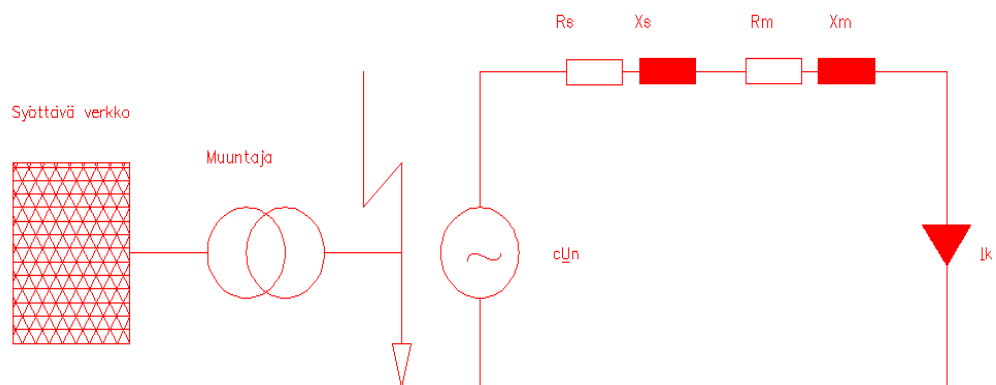
Kaavassa λ_{max} = tahtikoneen suurinta mahdollista magnetointia vastaava kerroin ja I_{rG} = tahtikoneen nimellinen virta. Kerroin saadaan kuviosta 14:



KUVIO 14. λ_{max} määrittäminen turbogeneraattorille ja umpinapakoneelle (Salminen 2009, 23.)

5 THEVENININ MENETELMÄ OIKOSULKUVIRRAN LASKENNASSA

Oikosulkuvirran laskemiseen käytetään monesti joko ominaisoikosulkutehooon perustuvaa menetelmää tai Theveninin menetelmää. Theveninin menetelmässä voidaan kaikki oikosulkuvirtaa syöttävät verkon osat korvata yhdellä vikavirtalähteellä, tämän takia menetelmä soveltuu hyvin teollisuusverkkoihin. Kuviossa 15 syöttävä verkko ja muuntaja sijaiskytkennällä esitettyinä (Huotari ja Partanen 1998, 8.):



KUVIO 15. Syöttävä verkko ja muuntaja korvataan sijaiskytkennässä niitä vastaavilla resistansseilla ja reaktansseilla (Huotari ja Partanen 1998, 8.)

Muuntajan ja syöttävän verkon impedanssien määrittely, impedanssit koostuvat laskentaan liittyvien komponenttien oikosulkuresistanssista ja -reaktanssista:

- muuntajan impedanssi = $R_m + jX_m$
- syöttävän verkon impedanssi = $R_s + jX_s$

Kolmivaiheinen oikosulkuvirta voidaan laskea kaavalla:

$$\underline{I}_k = \frac{c\underline{U}_n}{\underline{Z}_T} \quad (43)$$

Kaavassa \underline{U}_n = Verkon nimellisvaihejännite, \underline{Z}_T = Theveninin jännitelähteen navoista mitattu impedanssi redusoituna vikapaikan jännitetasoon ja c = jännitekerroin. Tässä tapauksessa sijaiskytkennän impedanssi koostuu syöttävän verkon ja muuntajan impedanssista, joka saadaan laskettua:

$$\underline{Z_T} = (R_s + jX_s) + (R_s + jX_s) \quad (44)$$

Jännitekertoimelle on eri arvoja riippuen siitä, lasketaanko minimi- vai maksimiarvoja.

Myös jännite vaikuttaa kertoimen suuruuteen. Taulukko kertoimen arvoista:

TAULUKKO 8. Jännitekerroin c standardin VDE 0102 mukaan (Huotari ja Partanen 1998, 9.)

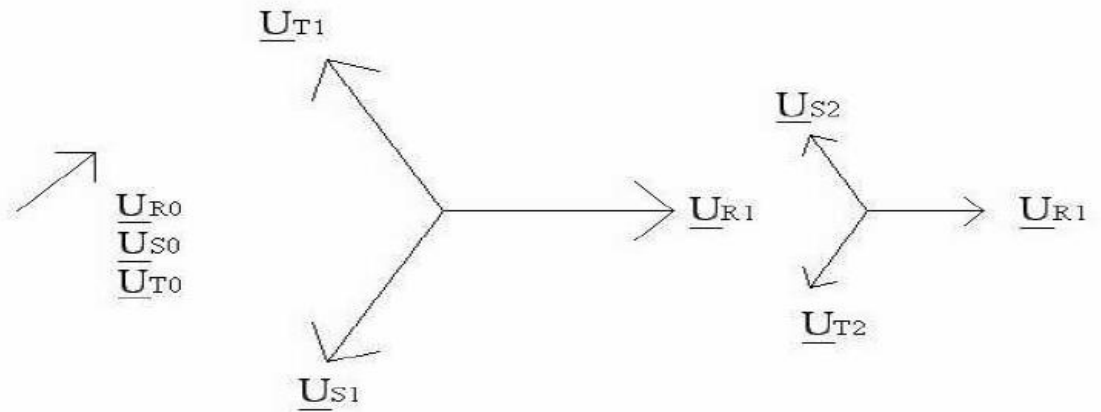
Nimellisjännite U_n	Suurinta oikosulkuvirtaa laskettaessa c_{maks}	Pienintä oikosulkuvirtaa laskettaessa c_{min}
Pienjännite 100 V - 1000 V		
a) 230/400 V	1,00	0,95
b) muut jännitteet	1,05	1,00
Keskijännite 1 kV - 35 kV	1,10	1,00
Suurjännite 35 kV - 230 kV	1,10	1,00

5.1 Vikavirtojen laskenta

Oikosulku voi tapahtua 3, 2 tai 1-vaiheisena. Näistä helpoin laskettava on 3-vaiheinen, jossa esiintyy ainoastaan myötäimpedansseja. Epäsymmetrisissä tilanteissa, eli 2- ja 1-vaiheisissa oikosuluissa ja myös johdon katketessa vaiheissa liikkuu eri suuruisia virtoja. Tällöin ei voida enää käyttää kuvion 15 mukaista sijaiskytkentää laskennan apuna. (Huotari ja Partanen 1998, 9-10.)

5.1.1 Laskuperiaatteita

Laskettaessa eri oikosulkuvirtoja, on tiedettävä komponenttien tehot, jännitetasot, impedanssit ja kytkentätavat toisiinsa nähden. Myös jännitteet ja impedanssit on reduceitava sille jännitetasolle, jolle tulokset halutaan. Lisäksi kun lasketaan 2- tai 3-vaiheisia oikosulkuvirtoja on otettava huomioon myötä-, vasta- ja nollaverkon impedanssit. Edellä mainittujen impedanssien, eli symmetrisen järjestelmän käyttäminen mahdollistaa laskemisen tilanteissa, joissa vaiheet eivät ole symmetriset keskenään. Kuviossa 16 järjestelmät on esiteltyä osoitinpiirrosmuodossa (Kukkonen 2007, 5.):



KUVIO 16. Nolla-, myötä- ja vastajärjestelmä (Kukkonen 2007, 6.)

Kuten kuvio 16 huomataan nollajärjestelmästä, että kaikki komponentit ovat samansuuntaiset. Myötäjärjestelmä on sama kuin tavallinen 3-vaihejärjestelmä, jossa vaihejärjestys on R-S-T. Vastajärjestelmässä vaiheet ovat järjestyksessä R-T-S, eli pyörimissuunta on muuttunut. Sekä myötä- että vastajärjestelmässä R-vaihe on määritelty perusvaiheeksi.

Symmetrisessä järjestelmässä myötä- ja vastaimpedanssit ovat käytännössä keskenään samansuuruiset johdoilla ja muuntajilla. Pyörivillä koneilla taas vastaimpedanssit ovat selvästi pienemmät kuin myötäimpedanssit. Nollaimpedanssit eroavat myötäimpedansseista kaikissa tilanteissa, joissa nollavirralla on paluutie muuta kautta kuin vaihejohdinta, kuten maata, ukkosköyttä tai nollajohdinta pitkin. (Rouvali 2011.)

6 KOMPONENTIT

Theveninin menetelmää käytettäessä on oikosulkuvirtaa syöttävät komponentit, kuten syöttävä verkko ja epätahtikoneet kuvattava riittävän tarkkuuden antavilla matemaattisilla malleilla. Pyörivien sähkökoneiden vaikutus pitää ottaa huomioon etenkin sysäysoikosulkuvirtojen laskemisessa. Oikosulkuvirtaa rajoittaa komponenttien impedanssit esimerkiksi muuntajat, kaapelit ja kuristimet. (Huotari ja Partanen 1998, 15-21.)

6.1 Syöttävä verkko

Kun syöttävästä verkosta tunnetaan joko alkuoikosulkuvirta I_{kv}'' tai näennäinen oikosulkuteho S_{kv}'' , saadaan syöttävän verkon impedanssi laskettua kaavalla 45:

$$Z_{kv} = \frac{cU_n^2}{S_{kv}''} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} \cdot I_{kv}''} \quad (45)$$

Kaavassa S_{kv}'' = Syöttävän verkon alkuoikosulkuteho, I_{kv}'' = syöttävän verkon alkuoikosulkuvirta, U_n = syöttävän verkon nimellispääjännite ja c taulukon 8 mukainen kerroin

Syöttävän verkon nimellispääjännitteen ollessa yli 35 kV syöttävän verkon impedanssi ja resistanssi saadaan seuraavasti:

$$R_{kv} = 0,1 \cdot X_{kv} \text{ ja } X_{kv} = 0,995 \cdot Z_{kv} \quad (46)$$

Pienjänniteverkoilla vastaavat arvot saadaan:

$$X_{kv} = \frac{1,1 \cdot U_n^2}{S_{kv}''} \text{ ja } R_{kv} = 0,1 \cdot X_{kv} \quad (47)$$

Kaavassa 47 U_n = pienjännitepuolen nimellispääjännite

6.2 Kaksikämmimuuntajat ja kuristimet

Kaksikämmisten muuntajien oikosulkusuureet voidaan kilpiarvoista saatavien tietojen avulla laskea seuraavasti:

$$Z_k = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad (48)$$

$$R_k = \frac{u_r}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{P_{kn}}{3 \cdot I_n^2} \quad (49)$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (50)$$

Kaavoissa Z_k = muuntajan oikosulkuimpedanssi, R_k = muuntajan oikosulkuresistanssi, X_k = muuntajan oikosulkureaktanssi, U_n = muuntajan nimellispääjännite, I_n = muuntajan nimellisvirta, S_n = muuntajan nimellinäennäisteho, P_{kn} = muuntajan kokonaispätötehohäviöt nimellisvirralla, u_k = muuntajan oikosulkujännite prosentteina, u_r = muuntajan resistanssin aiheuttama oikosulkujännite prosentteina

Kuristimen oikosulkusuureissa laskelmat tehdään kuten muuntajalle, jonka muuntosuhde on yksi.

6.3 Epätahtikoneet

Epätahtimoottorit on otettava huomioon etenkin teollisuuslaitoksissa niiden suuren lukumäärän takia. Epätahtikoneen oikosulkuimpedanssi saadaan kaavalla 51:

$$Z_m = \frac{1}{\frac{I_s}{I_n}} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad (51)$$

Jossa U_n = moottorin nimellispääjännite, I_n = moottorin nimellisvirta, I_s = moottorin käynnistysvirta ja S_n = moottorin nimellinäennäisteho

Suurjännitemoottorit mallinnetaan kaikki erikseen, mikäli niitä on vain muutama kappale. Pienjännitemoottoreiden monesti hyvin suuren lukumäärän takia ei niitä

kaikkia kannata ottaa erikseen huomioon, vaan ne on parempi mallintaa isompina kokonaisuuksina.

6.4 Kaapelit, johdot ja kiskot

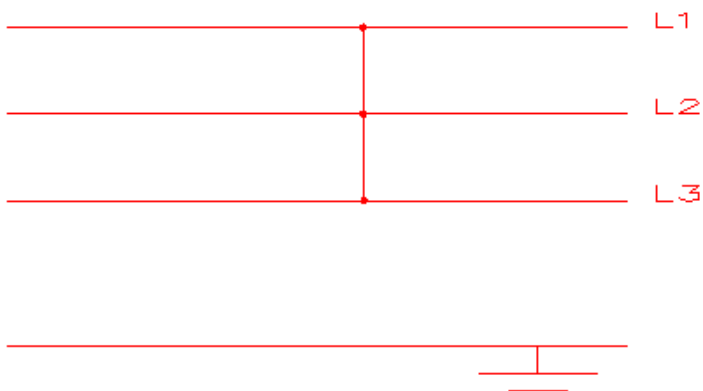
Teollisuusverkossa kaapeleiden vaikutus oikosulkuvirtoihin on pieni, pituuksien ollessa lyhyitä. Kaapelin impedanssi saadaan kaavalla 52:

$$\underline{Z}_j = (r + jx)l \quad (52)$$

Tässä r = kaapelin tasavirtaresistanssi / pituusyksikkö (+20°C), x = kaapelin reaktanssi / pituusyksikkö ja l = kaapelin pituus

6.5 1-, 2- ja 3-Vaiheisten oikosulkuvirtojen kaavat

Kolmivaiheisessa oikosulussa verkon kaikki kolme vaihetta ovat kytkeytyneenä toisiinsa. Kolmivaiheisessa oikosulussa vikavirta on suurimmillaan, jonka takia se pitää tietää verkon suojauksen kannalta. Oikosulku esitetty kuviossa 17 (Salminen 2009, 4-8.):

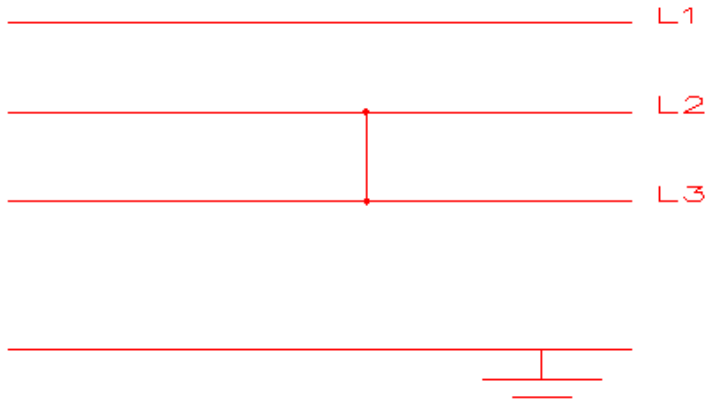


KUVIO 17. 3-Vaiheinen oikosulku

3-Vaiheisen oikosulkuvirran kaava:

$$\underline{I}_{k3} = \frac{cU_N}{\sqrt{3}Z_1} \quad (53)$$

Kaksivaiheisessa oikosulussa vikavirta jää melkein aina kolmivaiheista vikavirtaa pienemmäksi. Joissain tapauksissa se voi kuitenkin olla suurempi. Oikosulku esitetty kuviossa 18:



KUVIO 18. 2-Vaiheisessa oikosulussa 2 vaihetta ovat yhdistyneet toisiinsa
Kaksivaiheisen oikosulkuvirran kaava:

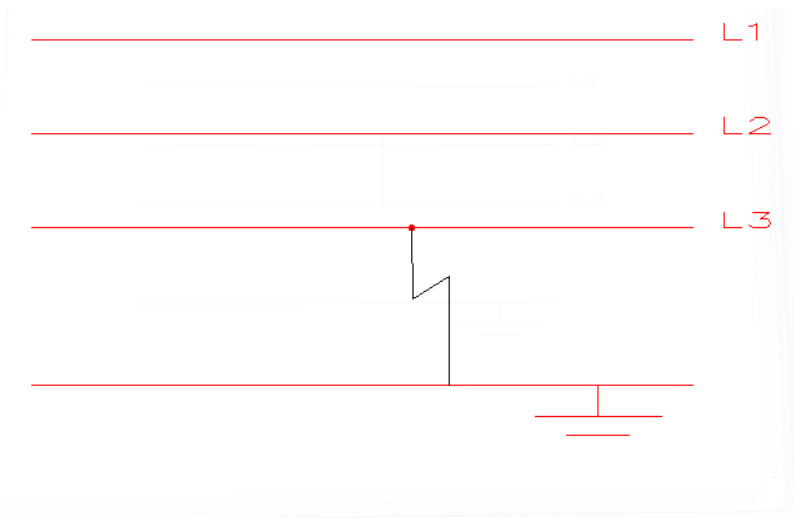
$$\underline{I}_{k2} = \frac{cU_N}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} \quad (54)$$

Kaavan 54 mukainen vikavirta voidaan esittää myös kolmivaiheisen vikavirran avulla, kaavan 55 esittämällä tavalla:

$$\underline{I}_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{1 + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1}} \cdot \underline{I}_{k3} \quad (55)$$

Jotta kaksivaiheinen oikosulkuvirta olisi suurempi kuin kolmivaiheinen, pitää $\underline{Z}_2 < 0,73 \cdot \underline{Z}_1$. Muuntajan, johtimien, ei pyörivien koneiden ja epätahtimoottoreiden myötä- ja vastaimpedanssit ovat samansuuruiset, jolloin 2-vaiheinen oikosulkuvirta ei voi olla suurempi. Tahtikoneilla puolestaan myötä- ja vastaimpedanssit ovat vian syntyhetkellä samansuuruiset, mutta oikosulun kestäessä myötäreaktanssi kasvaa ja lopulta on yhtä suuri kuin koneen tahtireaktanssi. Tämän takia pysyvä kaksivaiheinen oikosulkuvirta voi olla n. 1,4-kertainen pysyvään kolmivaiheiseen vikavirtaan nähden.

Kun verkko on maadoitettu suoraan tai impedanssin kautta, voi yksivaiheisen oikosulun vikavirta nousta korkeaksi. Muutoin tapahtuu maasulku, jossa virta voi jäädä pienemmäksi kuin kuormitusvirta maadoitustavasta riippuen. Maasulun aikana vaaran aiheuttaa kuitenkin vaaralliset kosketusjännitteet. Yksivaiheinen oikosulku esiteltynä kuviossa 19:



KUVA 19. 1-Vaiheinen oikosulku

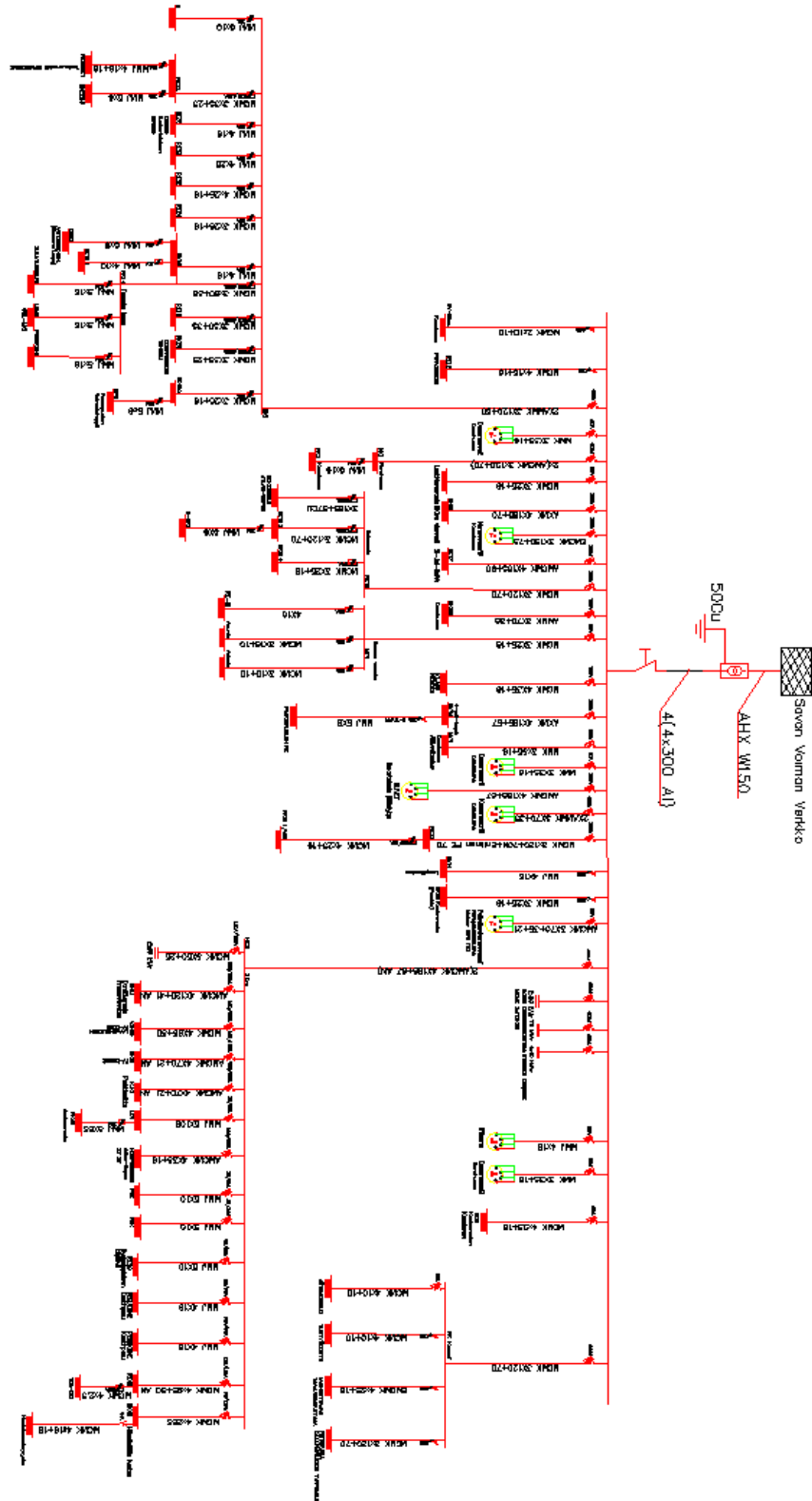
Yksivaiheisen oikosulkuvirran kaava:

$$\underline{I}_{k1} = \frac{\sqrt{3}\underline{U}_N}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0} \quad (56)$$

Kaavoissa: c = taulukon 8 mukainen jännitekerroin, \underline{U}_N = vikapaikan nimellispääjännite, \underline{Z}_1 = oikosulkupiirin myötäimpedanssi, \underline{Z}_2 = oikosulkupiirin vastaimpedanssi ja \underline{Z}_0 = oikosulkupiirin nollaimpedanssi

7 SUONENJOEN VALION PIENJÄNNITEVERKKO

Kuvassa työn aikana tehty päivitetty nousujohtokaavio työssä tarkastellusta pienjänniteverkosta, jonka pohjalta mittaukset ja mallinnus tehtiin:



KUVA 4. Suonenjoen Hillotehtaan pienjänniteverkko. Kuva Mikko Karvonen 2013

Tällä hetkellä verkkoa syöttää tehtaan rakentamisesta lähtien toiminnassa ollut pääkeskuksella sijaitseva muuntaja. Muuntajaa suojaa katkaisija, joka laukeaa 950 kW:n teholla. Muuntajan tiedot taulukossa 9:

TAULUKKO 9. Vanhan muuntajan kilpiarvot

817	20 000 \pm 2x2,5% V	P ₀ 1260 W
3-vaihemuuntaja	28,9 A	Kokonaispaino 3600 kg
No. 5088241	400 V	Öljynpaino 950 kg
Valmistusvuosi 1973	1444 A	
Laji: KTMU24x4627	Eristystaso 125/50 kV	
Standardi UEC 76/1967	Jäähdytystapa ÖNAN	
1000 kVA	Zk 6,1%	
Dyn11	Io 0,5%	
50 Hz	Pk 9900 W	

Tehdasverkon kuormitus koostuu suurimmaksi osaksi oikosulkumoottoreista, joita on noin 240 kappaletta. Moottoreista noin 17 % on taajuusmuuttajalla varustettuja. Ison kokonaisuuden tehtaalla muodostaa konehuone, jossa sijaitsevat esimerkiksi pakkasvaraston kompressorit. Tutkittavan tehdasverkon mittakaavassa iso osa käytetystä energiasta kuluu konehuoneen toimintojen ja tuotannon lisäksi ilmastointiin, jonka takia suurin sähkönkulutus onkin kesäisin. Tehtaalla on yli 500 valaisinta, joista valtaosa 2x58 wattisia, lisäksi tutkittavaan verkkoon kuuluu useita tietokoneita,. Omaa sähköntuotantoa tehtaalla ei ole.

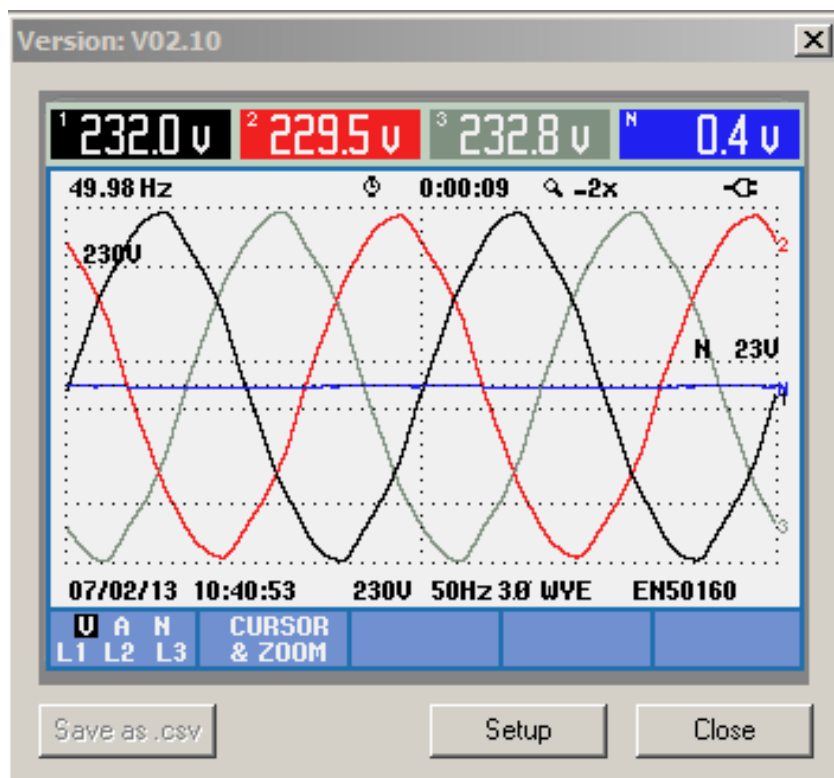
Tehtaan toiminnot on jaettu kahteen erilliseen rakennukseen, joissa sijaitsee korjaamotilat, varasto ja tuotekehityksen tilat. Tämä tehtaan osa ei kuulu pääkeskuksella sijaitsevan muuntajan syöttävään verkkoon, minkä takia sitä ei käsitellä tässä opinnäytetyössä lainkaan.

Lähiaikoina tutkittavaan verkkoo rakennetaan uusi pakkasvarasto ja vanha muuntaja korvataan kahdella uudella muuntajalla. Toisen uuden muuntajan on tarkoitus syöttää vanhaa tehdasverkkoa ja toisen tulevaisuudessa rakennettavaa pakkasvarastoa. Muutokset nostavat liittymistehon 1600 kilovolttiampeeriin.

8 SÄHKÖNLAATUMITTAUKSET

Sähkönlaadun tarkkailuun on olemassa kannettavia mittalaitteita, sekä keskuksiin kiinteästi asennettavia paneeleita. Kummastakin sovellutuksesta löytyvät kaikki tärkeimmät sähkönlaatuun vaikuttavat mittaukset, kuten virran ja jännitteen yliaallot, jännitteen ja virran mittaus sekä muun muassa tehokertoimen mittaus.

Pitempiaikaiseen tiedonkeruuseen erillinen mittari on kuitenkin ainoa järkevä vaihtoehto. Tällöin käyttäjä voi mitata esiohjelmoituja parametrejä tai valita itse, mitä tietoa mittariin kerätään. Lisäksi mittareista löytyy tiedonkeruun lisäksi muita hyödyllisiä ominaisuuksia, kuten oskilloskooppi ja virran sekä jännitteen osoitinesitykset. Esimerkki työssä käytetyn sähkönlaatuanalysoitsijan oskilloskooppikuvasta kuvassa 5 (Fluke, 2013a.):



KUVA 5. Jännitteen oskilloskooppikuva Fluke 434:ssa

Mittarin lisäksi laatumittauksien olennainen osa on suuren tietomäärän takia tietokone, joka mahdollistaa tiedon keräämisen ja muokkaamisen raportointia varten esimerkiksi Excelin avulla. Tietokonetta voidaan käyttää joissain tapauksissa myös jatkuvasti kiinnitettynä mittauslaitteeseen, jolloin tieto tallentuu suoraan kovalevylle.

Sähkönlaatumittaukset kestävät; useista päivistä viikkoihin. Tärkeintä on kuitenkin saada mitattua mahdollisimman paljon erilaisia kuormitustilanteita, nämä voivat esimerkiksi olla prosessien ylös- ja alasajoja.

Yksi mittaus ei vielä välttämättä riitä paljastamaan mahdollisia ongelmia mitattavassa verkossa, minkä vuoksi laatumittauksia on syytä tehdä säännöllisin väliajoin. Sähkönlaatumittaukset ovatkin monssa teollisuuslaitoksissa osa nykyaikaista sähkökunnossapitoa. (Fluke 2013a.) Kuvassa on esimerkki keskukseseen asennettavasta yleismittarista:



KUVA 6. Keskukseseen asennettava perusmittari nousukeskuksella. Kuva Mikko Karvonen 2013

8.1 Mittalaite

Mittauksissa käytettiin Fluke 434 sähkönlaatuanalysointilaitetta. Kuten kaikissa nykyisissä mittalaitteissa myös käytetyssä mittarissa oli runsaasti mittausvaihtoehtoja ja tulosten käsittely voidaan tehdä helposti tietokoneen avulla. Koska mittausvaihtoehtoja on erittäin paljon, on käyttäjän syytä tutustua huolellisesti mittalaitteeseen ja siihen, mitä tietoja verkosta halutaan. Koska sähkönlaadun mittauksessa mittausajat ovat pitkiä, on ohjekirjan lukemisen lisäksi hyvä harjoitella laitteen käyttöä ja siten varmistua, että mittaus tapahtuu halutulla tavalla. Mittalaite on esiteltyä kuvassa 7:



KUVA 7. Fluke 434 sähkönlaatuanalysointilaitteen lisälaitteineen. Kuva Mikko Karvonen 2013

Käytössä Fluke 434 on helppokäyttöinen ja erittäin monipuolinen. Mittaustulosten tarkastelussa mittalaite voidaan kytkeä tietokoneeseen, jota varten on oma tietokoneohjelmansa. Mittaustulosten tarkastelu tietokoneen avulla helpottaa työtä paljon ja mahdollistaa tulosten tallentamisen raportointia varten. Mittaaja voi itse määrittellä kaikki mittaukseen liittyvät asiat, kuten mitattavat parametrit, näytteenoton, mittauksen alkamisajankohdan sekä keston.

Erytisen hyvä ominaisuus mittarissa on niin sanottu Monitor - toiminto, jossa mittalaite vertaa sähkönlaatua ennalta asetelluin mittaasetusten kautta sähkönlaatustandardiin SFS EN-50160. Kyseinen mittaus sopii hyvin selvittämään mitattavan verkon yleisen tilan, josta voidaan edetä tarpeen ja mittaustulosten vaatiessa tarkempiin mittauksiin.

8.2 Turvallisuus

Sähkönlaatuanalysoija piti jokaisessa mittauksessa liittää jännitteet päällä olevaan keskukseen, mikä takaa turvallisuuden kiinnitettiin huomiota. Ennen mittausten aloittamista selvitettiin kohde, jonne mittari kytkettäisiin. Ennalta hankittujen tietojen perusteella päädyttiin käyttämään kaikissa mittauksissa suurille virroille tarkoitettuja virtapihtejä, jotka kestäisivät varmasti mittauksen aikana esiintyvät virrat, ja ne olisivat mahdollisimman helppo ja turvallinen kytkeä.

Virtapihteinä käytettiin Fluken valmistamia i2000 FLEX - mallia olevia, joilla mitattiin vaiheiden vaiheiden ja nollan virtoja. Työssä käytetty virtamittapää on esitelty kuvassa 8:



KUVA 8. Fluke i2000-FLEX kestää 2000 ampeeria ja tarvitsee erillisen 9 voltin patterin toimiakseen (Fluke 2013b.)

Jännite mitattiin 16A - pistorasiaan sopivan sovittimen kautta, jolloin jännitteenmittauspäitä ei tarvinnut kytkeä jännitteisiin osiin. Lisäksi näin jännitemittapäät saatiin sulakesuojauksen taakse. Mittauksissa käytetty liitin kuvassa 9:



KUVA 9. Jännitemittausta helpottava liitin. Kuva Mikko Karvonen 2012.

Näiden lisäksi työssä mittarin kytkemisessä käytettiin jännitetyöhanskoja sekä suojakypärää ja mittarin kytkemisen suoritti opinnäytetyön valvojana toiminut sähköalan ammattilainen.

8.3 Mittausten suorittaminen

Sähkönlaadun selvittämiseksi tutkittavalle verkolle tehtiin yhteensä neljä mittausta. Mittaukset aloitettiin pääkeskukselta, jossa mitattiin koko tutkittavaa verkkoa kerralla. Pääkeskustasolla tehtiin kaksi mittausta, joista ensimmäinen oli tiedonkeruuta useiden eri parametrien osalta yhden viikon ajan. Toisella mittauksella sähkönlaatua vertailtiin sähkönlaatustandardiin, joka on mittarissa nimellä "monitor". Sähkönlaatumittauksissa erityistä huomiota kiinnitettiin yliaaltoihin ja mallinnuksen kannalta kiinnostaviin tehotietoihin.

Aina ennen varsinaisen mittauksen aloitusta mittalaitteen oikea kytkentä tarkistettiin tarkastelemalla tehotietoja sekä mittalaitteen antamaa osoitinpiirrosesitystä jännitteestä ja virrasta. Etenkin jännitteen mittauksen kanssa oli oltava tarkkana, koska jännite mitattiin erillisen liittimen kautta. Näin ollen ei voitu olla varmoja, että jännitteen mittausta on kytketty oikein. Tehonäkymä kuvassa 10:

Version: V02.10

Power & Energy

FUND 13:06:03

	L1	L2	L3	Total
kW	15.5	12.6	12.9	40.9
kVA	15.5	12.6	13.0	41.1
kVAR	1.0	0.8	1.9	3.6
PF	0.99	0.98	0.97	0.98
Cos ϕ	1.00	1.00	0.99	
A rms	68	55	57	
U rms				
	231.06	232.30	233.11	
08/02/13 08:34:46 230V 50Hz 3 ϕ WYE EN50160				

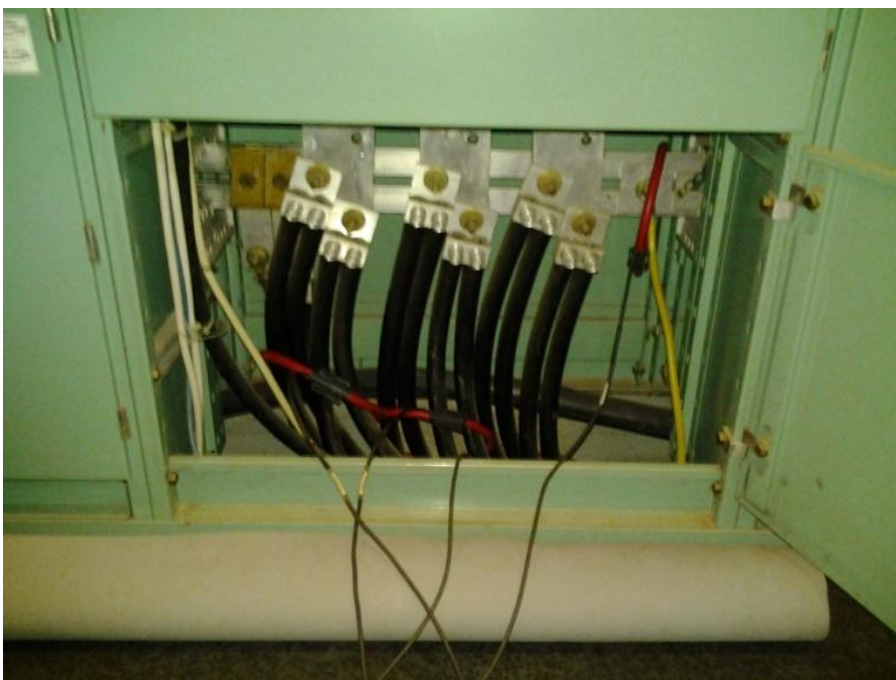
ENERGY TREND

Save as .csv Setup Close

KUVA 10. Tehonmittausnäkyä Fluke 434:ssa.

8.4 Pääkeskuksen mittaus

Pääkeskukselle tehdyt mittaukset kestivät yhden viikon, jossa näytteenottovälinä tiedonkeruussa oli 5 minuuttia. Sähkönlaatua standardiin vertaavassa mittauksessa kullekin mitattavalle parametrille oli mittalaitteeseen esiohjelmoitu näytteenottoväli vastaamaan sähkönlaatustandardia SFS EN-50160. Kuvassa 11 virtamittauspääät asennettuna pääkeskukselle tuleviin syöttökaapeleihin:



KUVA 11. Pääkeskuksen mittaus muuntajalta tulevilta syöttökaapeleilta. Kuva Mikko Karvonen 2013

8.4.1 Pääkeskuksen mittaustulokset

Pääkeskuksen jännitteet taulukossa 10:

TAULUKKO 10. Pääkeskuksen yhden viikon jännitteet

Vaihe	95 % ajasta	100 % ajasta
L1	225,74	222,14
L2	226,34	223,60
L3	233,40	234,49

Jännitteen puolesta laatu jää normaalille tasolle 1 ja 2-vaiheiden keskiarvojen takia, jonka pitäisi olla välillä 225...235 V. Tiedonkeruumittauksen mukaan:

TAULUKKO 11. Pääkeskuksen jännite

Vaihe	Pienin (V)	Keskiarvo (V)	Suurin (V)
L1	210,48	229,34	236,62
L2	205,26	230,07	237,37
L3	217,07	230,85	238,26
N	1,35	1,72	2,19

Mittausten perusteella voidaan sanoa, että jännite on standardin SFS EN-50160 rajojen sisällä. Tiedonkeruumittauksen tallentamat alhaiset ovat todennäköisesti aiheutuneet kuormien kytkennöistä.

Taajuus on mittaustuloksien mukaan 99,5% ajasta 49,873 Hz ja 100% ajasta 50,180 Hz. Epätasapainoa on 95% viikon ajasta ollut 0,7 %. Tiedonkeruussa taajuuden minimiarvo: 49,839 Hz, keskiarvo: 50 Hz ja maksimi 50,196 Hz. Jännitteen THD-arvot:

TAULUKKO 12. THD pääkeskuksella

Vaihe	THD(%)
L1	327,7
L2	2,7
L3	3

1-vaiheen erittäin suuren THD:n selittää ainoastaan jokin mittauksen aikana tapahtunut toimenpide, tai mittarissa tapahtunut häiriö. Sama mittaussuure tiedonkeruumittauksen tuloksien mukaan:

TAULUKKO 13. Tiedonkeruumittauksen THD-lukemia

Vaihe	Pienin (%)	Keskiarvo (%)	Suurin (%)
L1	0,79	2,25	6,3
L2	0,77	1,94	5,08
L3	0,93	2,27	5,54
N	10,78	24,22	48,41

Yliaaltojen kokonaisuuden lisäksi kunkin vaiheen yksittäiset yliaallot taulukossa:

TAULUKKO 14. Pääkeskukselta mitatut jännitteen yliaallot

Harmoninen	L1(%)	L2(%)	L3(%)
2	0,1	0,0	0,0
3	0,5	0,5	0,7
4	0,0	0,0	0,0
5	2,1	2,0	2,2
6	0,0	0,0	0,0
7	1,5	1,0	1,5
8	0,0	0,0	0,0
9	0,2	0,5	0,3
10	0,0	0,0	0,0
11	1,0	0,8	0,8
12	0,0	0,0	0,0
13	0,6	0,5	0,7
14	0,0	0,0	0,0
15	0,1	0,2	0,2
16	0,0	0,0	0,0
17	0,2	0,2	0,1
18	0,0	0,0	0,0
19	0,1	0,1	0,1
20	0,0	0,0	0,0
21	0,1	0,1	0,1
22	0,0	0,0	0,0
23	0,1	0,1	0,0
24	0,0	0,0	0,0
25	0,0	0,1	0,0

Suurimmat yliaaltopitoisuudet ovat viidennen, seitsemannen ja yhdennentoista yliaallon kohdalla, joka käy ilmi myös tiedonkeruumittauksesta. Kyseiset yliaallot ovat tyypillisiä moottorikäyttöjen aiheuttamia yliaaltoja. Välkyntäarvot pääkeskuksella taulukossa:

TAULUKKO 15. Pääkeskuksen välkyntä-arvot

Vaihe	Plt(%)
L1	0,53
L2	0,52
L3	0,53

Jokaisessa vaiheessa Plt-arvo on sähkönlaatustandardin mukaan korkeatasoista, koska se on alle 0,8%. Tiedonkeruun tulokset:

TAULUKKO 16. Välkyntä-arvot tiedonkeruun mukaan

Vaihe	Plt(%)
L1	0,42
L2	0,41
L3	0,40

Viikon aikana jännite laski kolme kertaa välille 1...90 % nimellisjännitteestä, tuli kaksi keskeytystilannetta ja nolla jännitepiikkiä. Nopeita jänniteenvaihteluita ei ollut. Sähköverkossa lähetettäviä tiedonsiirtoon tarkoitettuja signaaleja ei mittauskohteessa ole käytössä, mikä näkyy niiden olemattomana prosentuaalisena osuutena viikon mittauksista. Pääkeskuksen tehokertoimet:

TAULUKKO 17. PF ja cosfii pääkeskukselta mitattuna

Kerroin	Pienin	Keskiarvo	Suurin
PF	0,65	0,97	1,00
Cosfii	0,75	1,00	1,00

Taulukossa 17 PF on tehokerroin, joka ottaa huomioon myös yliaaltojen aiheuttamat särötehon. Näin ollen se on hieman alhaisempi kuin Cosfii. Tuloksista voidaan päätellä, että kompensointi toimii hyvin pääkeskukselta mitattuna.

Päto- ja loistehon mittaukset taulukoissa 18 ja 19:

TAULUKKO 18. Päto- ja loistehon mittaukset pääkeskuksella

Vaihe	Pienin (W)	Keskiarvo(W)	Suurin(W)
L1	46 800	109 638,8	227 333,3
L2	46 933,34	98 273,24	221 800
L3	42 333,34	106 594,1	227 333,3
Yhteensä	146 733,3	314 506,2	676 466,7

TAULUKKO 19. Loistehon mittaus pääkeskuksella

Vaihe	Pienin (VAr)	Keskiarvo (VAr)	Suurin(VAr)
L1	-21 133,3	19 046,24	168 333,3
L2	-36 266,7	9 433,92	157 266,7
L3	-32 733,3	12 154,83	161 733,3
Yhteensä	-86 400	40 636,07	48 5133,3

Jännitteen ja virran DC-komponentti taulukossa 20 esiteltyinä:

TAULUKKO 20. DC-komponentit pääkeskuksella

Jännitteen DC-komponentti	
Vaihe	Keskiarvo (%)
L1	0,0477
L2	0,0543
L3	0,0871
N	9,250
Virran DC-komponentti	
Vaihe	Keskiarvo (%)
L1	0,223
L2	0,213
L3	0,310
N	0,349

DC-komponenttien osuus on hyvin pieni tehtyjen mittausten perusteella, eivätkä ne aiheuta jatkotoimenpiteitä. DC-komponentti on erittäin haitallinen muuntajille, sillä se aiheuttaa rautasydämen kyllästymistä, mikä puolestaan aiheuttaa häviötehoa. Jo 1 %

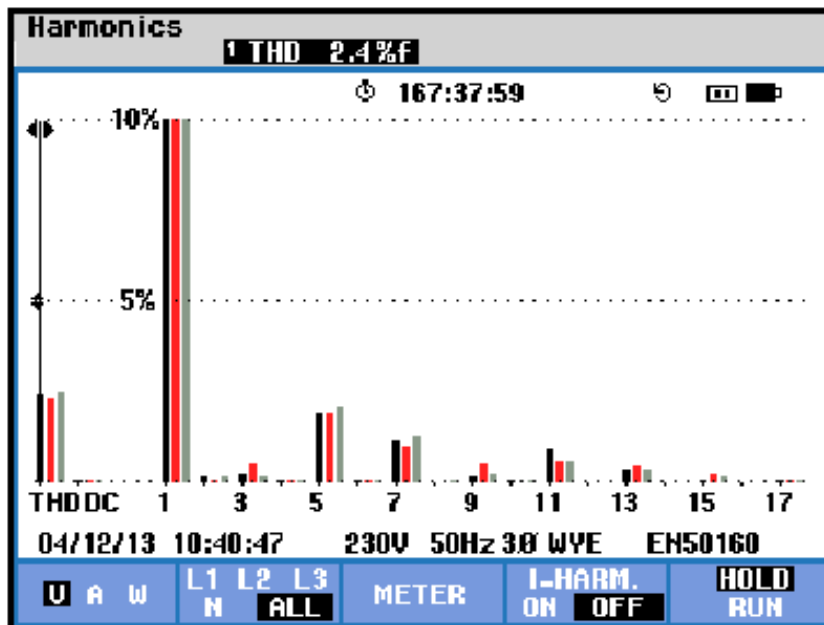
DC-komponentti lisää muuntajan häviötehoja n. 10 %, suosituksena DC-komponentin maksimille on 2 %. (Torkkeli 2011, 43.)

8.4.2 Tulosten arviointi

Monitor- ja tiedonkeruumittaukset osoittivat sähkönlaadun olevan hyvällä tasolla mitattujen parametrien perusteella. Kuitenkin monitor-mittauksessa L1-vaiheessa esiintyneen erittäin korkean jännitteen THD:n takia pääkeskukselle päädyttiin tekemään vielä pelkästään yliaaltoihin keskittynyt mittaus, joka löytyy työssä käytetyn mittarin alkuvalikosta.

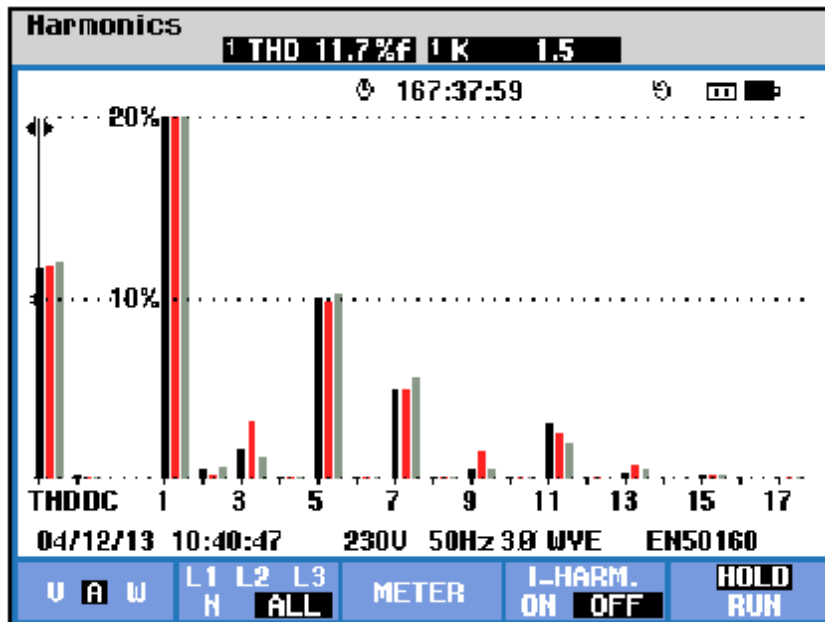
8.4.2.1 Pääkeskuksen yliaaltomittaukset

Lisämittauksella mitattiin yliaaltoja yhden viikon ajan. Pääkeskuksille tehdyissä mittauksissa laatustandardiin tuloksia vertailevassa mittauksessa jännitteen korkea THD oli korkea ilmeisesti jonkin häiriön takia, toisen mittauksen mukaan kyseinen arvo oli hyvällä tasolla. Jotta voitaisiin olla varmoja, piti mittaus tehdä uudestaan. Toinen syy lisämittaukselle oli selvittää virran yliaallot. Jännitteen yliaaltospektri kuvassa 12:



KUVA 12. Jännitteen yliaaltospektri. Kuva Mikko Karvonen 2013

Jännitteen yliaaltojen mittaus spektrimuodossa osoittaa saman tuloksen, kuin tiedonkeruumittauskin eli sähkönlaatu on korkeatasoista jännitteen yliaaltojen perusteella. Seuraavassa kuvassa virran yliaaltospektri on esitetty kuvassa:



KUVA 13. Virran yliaaltospektri. Kuva Mikko Karvonen 2013

Virran THD on mittausten mukaan hieman alle 12 %, mikä aiheutuu miltei kokonaan viidennestä ja seitsemännestä yliaaltovirrasta. Nämä yliaaltovirrat johtuvat ilmeisesti tehtaan taajuusmuuttajakäytöistä. Kaikkiaan virran yliaaltopitoisuus on melko hyvä, eikä se todennäköisesti aiheuta ongelmia mittauskohteessa. Yliaallot eivät aiheuta suoranaisia toimenpiteitä, mutta tilanne on kuitenkin pyrittävä pitämään vähintään nykyisellä tasolla. Esimerkiksi keskuksen asennettava yleismittari, johon sisältyy myös yliaaltojen mittaus olisi hyvä tapa sähkönlaadun tarkkailuun pääkeskustasolla. K-arvon perusteella yliaalloilla ei ole suurta vaikutusta muuntajan kuormitettavuuteen, joka nähdään kuvion 2 avulla.

Kohteessa on yhteensä 4 loistehon kompensointiin tarkoitettua kondensaattoria, joissa osassa on imupiirit yliaaltoja varten. Kompensointilaitteisto oli käytössä mittausten aikana.

8.5 Nousukeskuksien mittaus

Pääkeskuksien mittaamisen jälkeen siirryttiin pienempiin kokonaisuuksiin, joissa mitattiin NK1:stä ja NK3:sta. Nämä keskuksat valittiin, koska ne pitävät sisällään paljon erityyppisiä kuormia, kuten taajuusmuuttajakäyttöä sekä toimistojen valaistusta ja tietokoneita. Nousukeskuksille tehdyt mittaukset olivat kestoiltaan lyhyempiä noin 8 tuntia ja pienemmällä näytteenottovälillä tehtyjä aikataulullisista syistä.

8.5.1 Nousukeskuksien mittaustulokset

Jännite kummassakin nousukeskuksessa esiteltyinä taulukossa 21:

TAULUKKO 21. Jännitteet nousukeskus 1 ja nousukeskus 3

NK1	Pienin(V)	Keskiarvo(V)	Suurin(V)
L1	220,97	230,02	235,12
L2	220,53	228,85	233,65
L3	221,93	230,44	235,62
N	0,02	0,02	0,03
NK3	Pienin(V)	Keskiarvo(V)	Suurin(V)
L1	217,67	229,52	235,7
L2	220,97	231,15	236,60
L3	220,34	232,12	237,71
N	0,18	0,30	0,68

Myös nousukeskuksien osalta jännitteet pysyvät työssä vertailukohtena käytettyä sähkönlaatustandardia. Standardissa mitataan 10 minuutin keskiarvoa, nousukeskuksille tehdyissä mittauksissa näytteenottoväli oli 10 sekuntia. Taulukon 21 arvojen perusteella jännitetasot ovat erittäin hyvällä tasolla. Nousukeskuksilla mitatut taajuudet taulukoituna:

TAULUKKO 22. Taajuus nousukeskus 1 ja nousukeskus 3

NK1	Pienin	Keskiarvo	Suurin
Taajuus (Hz)	49,925	50,018	50,0
NK3	Pienin	Keskiarvo	Suurin
Taajuus (Hz)	49,90	49,99	50,11

Jännitteen ja virran THD taulukossa 23 ilmaistuna:

TAULUKKO 23. Jännitteen ja virran THD nousukeskus 1 ja nousukeskus 3

NK1	Jännitteen pienin (%)	Virran pienin(%)	Jännitteen keskiarvo	Virran keskiarvo(%)	Jännitteen suurin	Virran suurin(%)
L1	1,17	3,08	2,22	7,27	3,41	12,1
L2	1,23	4,22	2,30	9,78	3,74	16,47
L3	1,47	4,6	2,52	10,22	3,68	15,77
N	26	83,71	25,76	211,36	61,02	327,67
NK3	Jännitteen pienin(%)	Virran pienin(%)	Jännitteen keskiarvo(%)	Virran keskiarvo(%)	Jännitteen suurin(%)	Virran suurin(%)
L1	1,03	3,33	2,16	11,56	3,63	27,57
L2	1,06	4,9	2,13	14,52	3,73	30,28
L3	1,13	4,1	2,38	15,38	3,8	29,12
N	24,11	130,78	71,40	327,13	140	327,67

Tehokertoimien mitatut arvot on esiteltyinä taulukossa 24:

TAULUKKO 24. Tehokerroin sekä loistehon huomioon ottava tehokerroin nousukeskus 1 ja nousukeskus 3

NK1	Pienin	Keskiarvo	Suurin
PF	0,77	0,90	0,96
Cosfii	0,78	0,92	0,97
NK3	Pienin	Keskiarvo	Suurin
PF	0,36	1	0,98
Cosfii	0,72	1	1

Mittausjakson aikana tehokerroin PF laski hetkellisesti 0,36:een, samanaikaisesti vaiheen yksi vastaava tehokerroin oli 0,08. Tehokertoimen pudotus nousukeskus 3:lla kesti yhden sekunnin, jonka jälkeen se meni takaisin 0,99:ään.

8.5.2 Nousukeskuksien mittaustulokset

Tuloksissa ei ilmennyt suuria yllätyksiä verrattuna pääkeskuksen tehokertoimiin ja yliaaltoihin. Nousukeskus ykkösen ja kolmosen mittausta oli mielenkiintoista, sillä jälkimmäinen on huomattavasti nykyaikaisempi. NK3 on varustettu omalla kompensoinnilla sekä mittausyksiköllä. NK1 taas mitään tietoja ei saa ilman erillistä mittausta, eikä siinä myöskään ole omaa kompensointiyksikköä. Kompensoinnin puuttuminen näkyy pienempänä tehokertoimena verrattuna NK3:een.

Yliaallot ovat jännitteen puolesta erinomaisella tasolla, yliaaltovirrat ovat kuitenkin pahimmillaan 30 % joka on melko korkea lukema. Mikäli yliaallot haluttaisiin poistaa mahdollisimman tehokkaasti, olisi parhain ratkaisu tässä tapauksessa aktiivisuodatin, joka reagoi nopeasti vaihtelevaan kuormitukseen.

9 VERKON MALLINTAMINEN

Sähkönlaatumittausten lisäksi työn tehtävänä oli mallintaa tutkittava verkko nousujohtokaavion pohjalta Digsilent Power Factory - ohjelman avulla. Ennen mallintamista olemassa olevan nousujohtokaavion tietojen paikkansa pitävyys tarkistettiin ja tehtiin siihen tarvittavat muutokset. Verkkotietojen lisäksi mallia varten kerättiin listaus tehtaan oikosulkumoottoreista, kuormitustiedot saatiin sähkökunnossapidon tekemien mittausten avulla sekä sähkönlaatumittauksista. Mallintamisen tarkoitus oli tarkkailla verkon kuormitusta, jännitteen alenemia ja laskea oikosulkuvirtoja. Kuormitusten tarkkailua tehtiin, koska verkon kuormitus on joitakin kertoja ylittänyt vanhan 1000 kVA:n tehdasverkkoa syöttävän muuntajan kapasiteetin. Oikosulkuvirrat laskettiin uudella ja vanhalla muuntajalla.

9.1 Simulointiohjelma

Tutkittavan verkon pienjänniteverkko mallinnettiin Saksalaisen sähköverkkoyhtiön Power Factory - simulointiohjelman avulla. Ohjelmaa voidaan käyttää etenkin sähkönjakeluverkkoyhtiön sähkönsiirron, tuotannon ja suojauksen simulointiin. Tämän lisäksi ohjelma soveltuu myös teollisuusverkkoyhtiön sekä tuulivoimaverkkoyhtiön simulointiin.

Simuloinnin oli tarkoitus selvittää sähköverkon tila normaalikuormituksen aikana, tarkkailla kompensoinnin vaikutusta ja tarkkailla verkon oikosulkukestoisuutta. Lisäksi työssä arvioitiin yliaaltojen leviämistä verkossa. Simulointiohjelman tärkeimpiä ominaisuuksia ovat tehonjaon ja oikosulkuvirtojen laskenta, suojauksen tarkastelu ja simulointi sekä yliaaltoanalyysi. Yksi mielenkiinnon kohteista oli selvittää sähköverkon tilanne lähitulevaisuudessa rakennettavan laajennuksen jälkeen, tämä jäi kuitenkin toteuttamatta puuttuvien verkkotietojen takia.

Ohjelmassa on suurehko valikoima erilaisia komponentteja, kuten muuntajia, kaapeleita ja moottoreita. Verkon rakentaminen tapahtuu graafisen käyttöliittymän avulla, asettelemalla käyttäjän valitsevat komponentit piirtoalustalle, jotka muokataan vastaamaan sitä verkkoa, jota halutaan simuloida. Simulointiohjelmaan on mahdollista luoda omia malleja Matlabin avulla tai ilman.

9.2 Simulointi

Koska työssä käytetty simulointiohjelma oli täysin tuntematon entuudestaan, piti simuloinnin suoritus aloittaa tutustumalla ohjelman englanninkieliseen käyttöohjekirjaan. Tutustumisen jälkeen ohjelman opettelu alkoi ohjelmaan sisältyvillä harjoituksilla, joissa neuvotaan käyttäjäystävällisellä tavalla ohjelman käyttöä perusteista vaativimpiin ominaisuuksiin asti. Alkuun ohjelma tuntui vaikealta käyttää, mutta hetken opettelun jälkeen se alkoi sujua jo varsin hyvin.

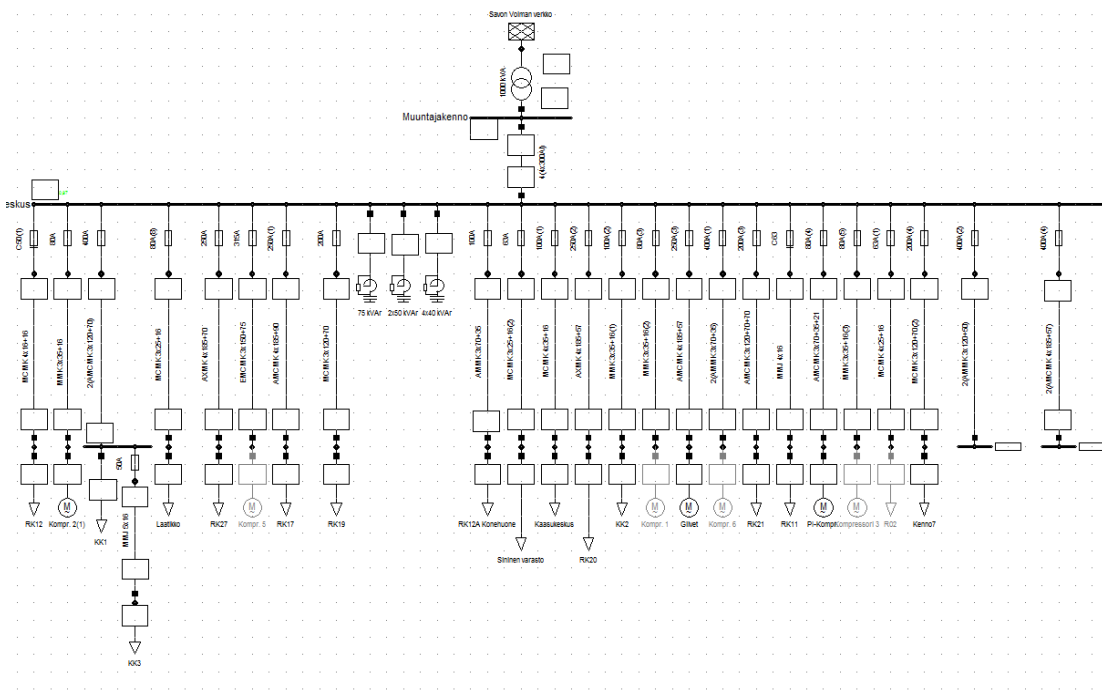
Mallintaminen alkoi keräämällä olemassa olevia tietoja, jotka koostuivat nousujohtokaavioista, mittausraporteista ja laiteluetteloista. Tiedon keruuta piti tehdä paljon kenttätyönä etenkin moottoritietojen keräämisen yhteydessä. Päivitettyjen tietojen avulla simulointia varten tehtiin nousujohtokaavio CADS Plannerilla, josta tietojen poiminta olisi helppoa varsinaista verkkomallia varten. Kaapelipituudet mitattiin sähkökeskusten sijoittelukuvasta, näin ollen mallin pituudet ovat vain suuntaa-antavia. Kaapeleiden resistanssit ja reaktanssit otettiin kirjasta *D1-2009 Käsikirja rakennusten sähköasennuksista* sivulta 93 löytyvästä taulukosta.

Kun simulointiohjelmaan oli rakennettu nousujohtokaaviota vastaava verkko, piti ohjelman tietokantaan luoda kaapelit, uusi ja lähitulevaisuudessa kytkettävä uusi muuntaja. Komponentin lisäys ohjelman tietokantaan tapahtuu helposti graafisen käyttöliittymän avulla:

KUVA 14. Muuntajan lisäys tietokantaan

Ihan kaikkia tietoja ei muuntajien (uusi ja vanha) löytynyt, puuttuvia tietoja voitiin kuitenkin päivittää tietoihin lähteenä käytetyn Lauri Hietalahden kirjasta *Muuntajat ja sähkökoneet* löytyvien taulukoiden avulla.

Verkon rakentamisen jälkeen mallin toimivuus kokeiltiin tehonjaon laskennalla. Mikäli jostakin komponentista puuttuu malli tai laskentaan tarvittavat tiedot ohjelma ilmoittaa siitä, eikä laskeminen onnistu ennen kuin asia korjataan verkkomalliin.

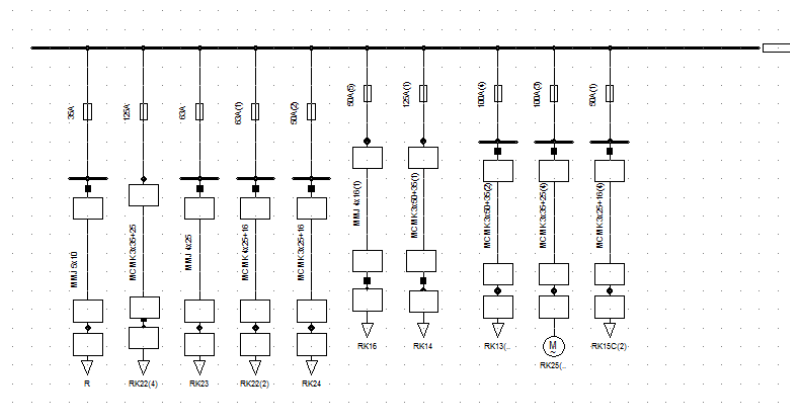


KUVA 15. Simuloitava verkko Power Factory – ohjelmassa. Kuva Mikko Karvonen 2013.

Kuvassa 15 näkyvät valkoiset neliöt ovat laskentatuloksien ilmoittamista varten. Tehdystä laskennasta riippuen käyttäjä voi valita niihin halutut tulokset näkyviin. Esimerkiksi oikosulkuvirtojen laskennassa käyttäjä voi tarkastella kunkin pisteen oikosulkuvirtoja sekä -tehoja. Verkon tilan tarkkailuun voidaan myös käyttää väritystä, joka näyttää määriteltyjen värien mukaan esimerkiksi kuormitukset eri verkon osissa. Laskentatulokset verkon eri pisteistä voidaan luonnollisesti saada myös ohjelman antama valmiina raporttina.

Oikealla reunalla näkyvät kaksi lähtöä kuvaavat nousukeskus ykköstä ja kolmosta, jotka jouduttiin mallintamaan omalle välilehdelle verkon rakennusikkunan tilanpuutteen takia. Omalle sivulle mallinnettu pienempi kokonaisuus näkyy

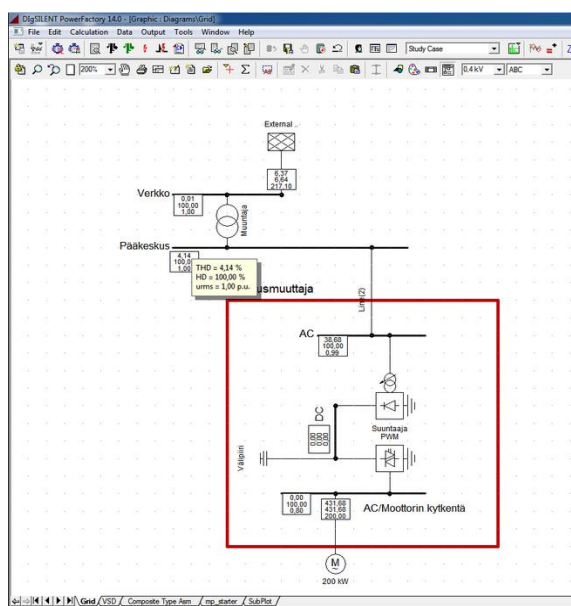
laskuissa pääkeskusolla, kuten yllä olevassa kuvassa tai sitä voi tarkistella tarkemmin sille omistetulla sivulla:



KUVA 16. Nousukeskus 1 verkkomallissa

9.2.1 Taajuusmuuttajamalli

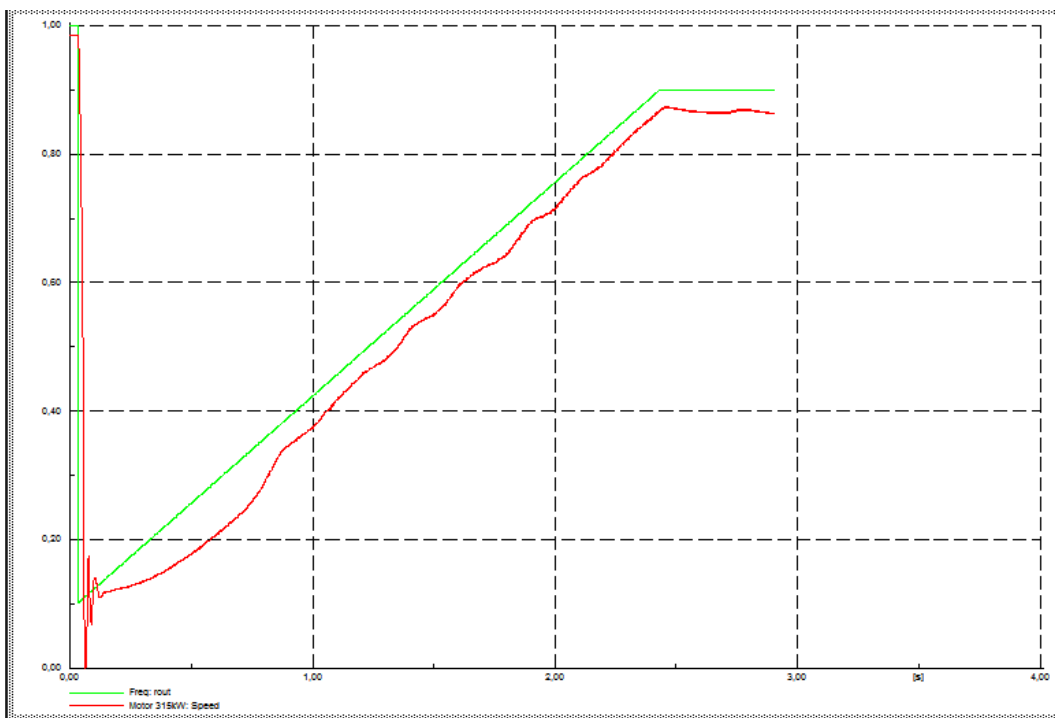
Koska mallinnettavassa verkossa on tyypillisen teollisuusverkon tapaan useita taajuusmuuttajakäyttöjä prosessiin ja esimerkiksi ilmastointiin liittyen, ongelmallista oli mallintaa taajuusmuuttajakäyttöjä sillä ohjelmassa ei ole valmista taajuusmuuttajakomponenttia. Taajuusmuuttajaa voidaan kuitenkin kuvata ohjelmasta löytyvien komponenttien avulla, johon voi käyttää mallina valmistajan sivuilta löytyvää esimerkkiä taajuusmuuttajan mallintamiseen. Taajuusmuuttajan malli kuvassa 17:



KUVA 17. Taajuusmuuttajamalli

Kuvan 17 taajuusmuuttaja koostuu diodeilla toimivasta tasasuuntaajasta, välipiiristä ja PWM -vaihtosuuntauksesta. Taajuusmuuttajakytkennän tietojen muuttaminen oikeaa vastaavaksi on kuitenkin melko hankalaa. Yksi työssä hyväksi havaittu keino oli käyttää apuna ABB Drivesize – ohjelmaa, jonka avulla voidaan tietyille moottorille sopivasta taajuusmuuttajasta saada malliin oikeaa taajuusmuuttajakäyttöä vastaavat tiedot.

Power Factoryn ja ABB Drivesize – ohjelman avulla saadaan suuntaa näyttävä arvio etenkin yliaaltoja aiheuttavista vaikutuksista. Taajuusmuuttajan toimintojen tarkempi tutkiminen on myöskin mahdollista, josta esimerkkinä seuraava kuva:



KUVA 18. Kuvassa Taajuusmuuttajan taajuusohje ja moottorin nopeus samassa kuvaajassa

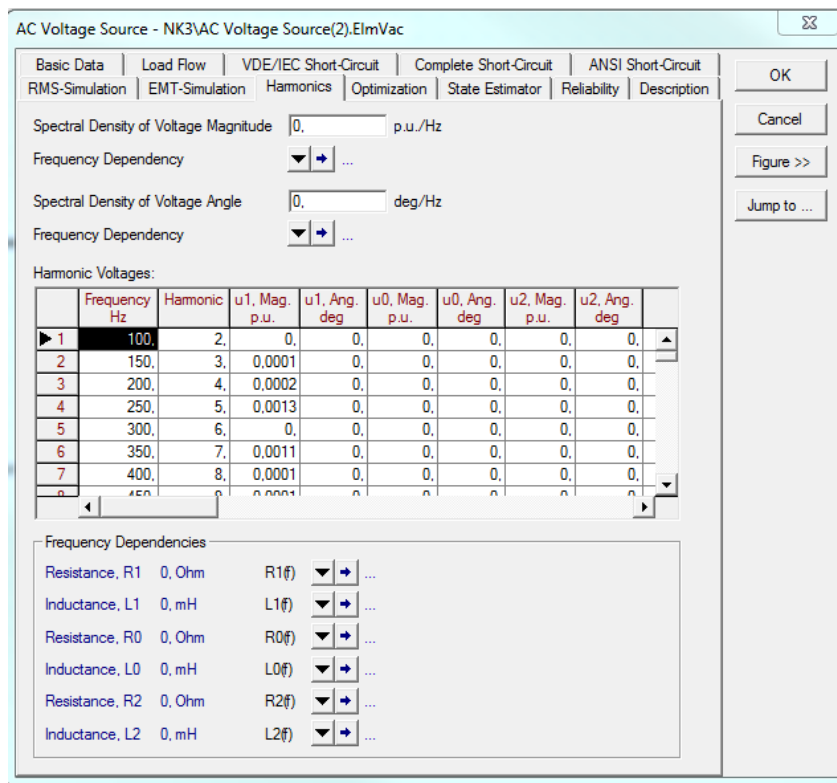
Kuvan 18 mukaisten taajuusmuuttajien tarkempien toimintojen tarkkailu edellyttää ohjelman tietokantaan tehtäviä malleja komponenttien toiminnasta keskenään.

9.3 Arvio taajuusmuuttajien aiheuttamista yliaalloista

Työssä ei taajuusmuuttajan mallia kuitenkaan käytetty, sillä käytössä oleva opiskelijakäyttöön tarkoitettu lisenssi salli yhdessä projektissa vain 50 solmupistettä, joka ei olisi riittänyt läheskään kaikkien taajuusmuuttajien mallintamiseen

opinnäytetyössä tarkkailtavassa pienjänniteverkossa. Tämän takia taajuusmuuttajien aiheuttamia yliaaltoja kuvattiin jännitelähteenä, johon käyttäjä voi itse syöttää yliaaltoja. Tarkoituksena oli arvioida ilmastonin ja prosessikeskuksien taajuusmuuttajien aiheuttamia jännitteen yliaaltoja sekä niiden leviämistä verkossa.

Koska työn teon aikana oltiin jo aikasemmin tutustuttu taajuusmuuttajamallin tutkimisen yhteydessä ABB Drivesize - ohjelmaan, oli luonnollista käyttää sen antamia laskentatietoja myös yliaaltolähteiden yliaaltojen syöttämiseen. Yliaallot voi syöttää ohjelmaan myös virtojen muodossa, tätä vaihtoehtoa ei kuitenkaan tässä työssä käytetty. Yliaaltojen syöttäminen jännitelähteeseen esiteltynä kuvassa 19:



KUVA 19. Yliaaltojen syöttö jännitelähteeseen

9.3.1 Simuloinnin tulokset

Ensimmäisessä tilanteessa tarkasteltiin pelkästään nousukeskuksien taajuusmuuttajakäyttöjen aiheuttamia yliaaltoja pääkeskuksella. Ohjelman laskema THD nousi NK1:llä 0,62 %:iin ja NK3 vastaava arvo oli 0,46 %, pääkeskuksella lukema taas oli 0,5 %. Toisessa simuloitavassa tilanteessa otettiin huomioon kaikki

yliaaltolähteiksi mallinnetut taajuusmuuttajat, jossa THD ilman kompensointia nousu 1,6 %:iin. Kompensoinnin kanssa lukema oli 0,5 %.

9.4 Tehonjaon laskenta

Tehonjaon laskennassa käytettiin apuna tehtaan kunnossapidon tekemiä jännitteen ja virran mittauksia, joista pystyttiin laskemaan riittävällä tarkkuudella pätö- ja loistehot kullekin keskukselle sähkönlaatumittausten yhteydessä saadun tehokertoimen avulla. Joissakin kuormituksissa verkkomallin tietoihin syötettiin laitteen nimellistehon mukainen teho, joka muutettiin vastaamaan normaalia käyttötilannetta. Käytetyssä mallinnohjelmissa on kaksi laskutapaa tehonjaon laskennalle, joko Newton - Raphson virtayhtälöt tai Newton - Raphson klassiset tehohtälöt. Tavallisen tehonjaon lisäksi ohjelmasta löytyy myös optimaalisen tehonjaon laskenta, jota ei kuitenkaan ohjelmassa käytetty. Tehonjaon laskenta mahdollistaa kuormitusten ja jännitteiden tarkkailun.

9.4.1 Tulokset

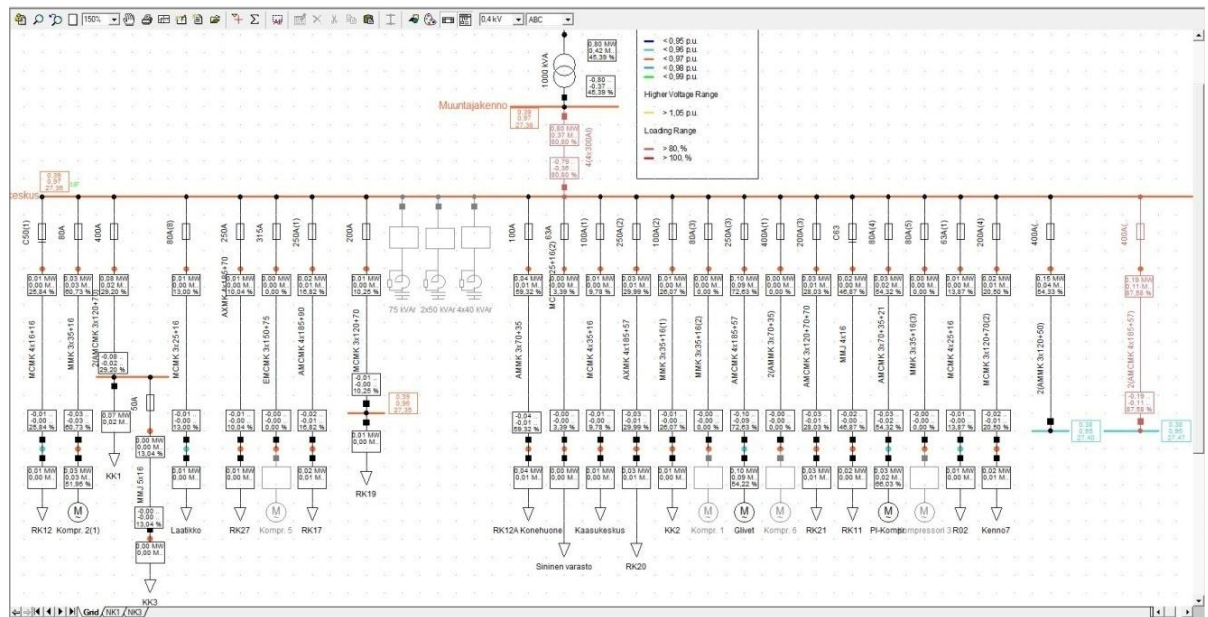
Tehonjaon avulla pystyttiin tarkistelemaan keskuksien kuormituksia laskettujen tehojen aikaisilla kuormituksilla. Normaalityötilanteen lisäksi ohjelman avulla yksittäisiä lähtöjä, sekä nousukeskuksia pystyttiin kuormittamaan kasvattamalla moottorikuormituksia. Yhdessä simuloinnissa nousukeskukset korvattiin tarkan mallin sijaan ainoastaan tiedonkeruumittauksista saaduilla tehotiedoilla. Tulosten perusteella voidaan sanoa, että tavanomaisessa tilanteessa keskusten kuormitus on melko vähäistä noin 20 -30 % luokkaa. Nousukeskuksilla mittausten aikaisilla tehojen keskiarvoilla NK1 on 34 % kuormassa ja NK3 80 % kuormituksella.

Kokeellisten kuormitustietojen perusteella, joissa pääkeskuksen isoimmille moottorilähdöille laitettiin niiden nimellistehojen mukainen maksimiteho. Tämän kokeen perusteella kaikki moottorilähdöt kestävät hyvin maksimikuormituksen.

9.4.2 Kompensoinnin vaikutus jännitteenaleniin

Kuormitustarkasteluiden lisäksi tehonjaolla voitiin tutkia kompensoinnin vaikutusta jännitteen aleniin. Kompensoinnin ollessa päällä kompensointikondensaattorit tuottivat maksimimäärän loistehoa, jota vertailtiin tilanteeseen jossa kaikki

kompensointi oli poissa käytöstä. Tässä kokeessa pääkeskustasolla suurin jännitteen alenema oli 4 %, nousukeskuksilla taas jännite tippui miltei jokaisessa pisteessä 5 %. Jännitteen aleneman tarkastelu onnistuu simulointiohjelmassa esimerkiksi myös kuvaajan avulla, tässä työssä päädyttiin kuitenkin käyttämään hyväksi jännitetasoja kuvaavaa väritystä. Pääkeskuksen jännitteenalenemat kuvassa 20:



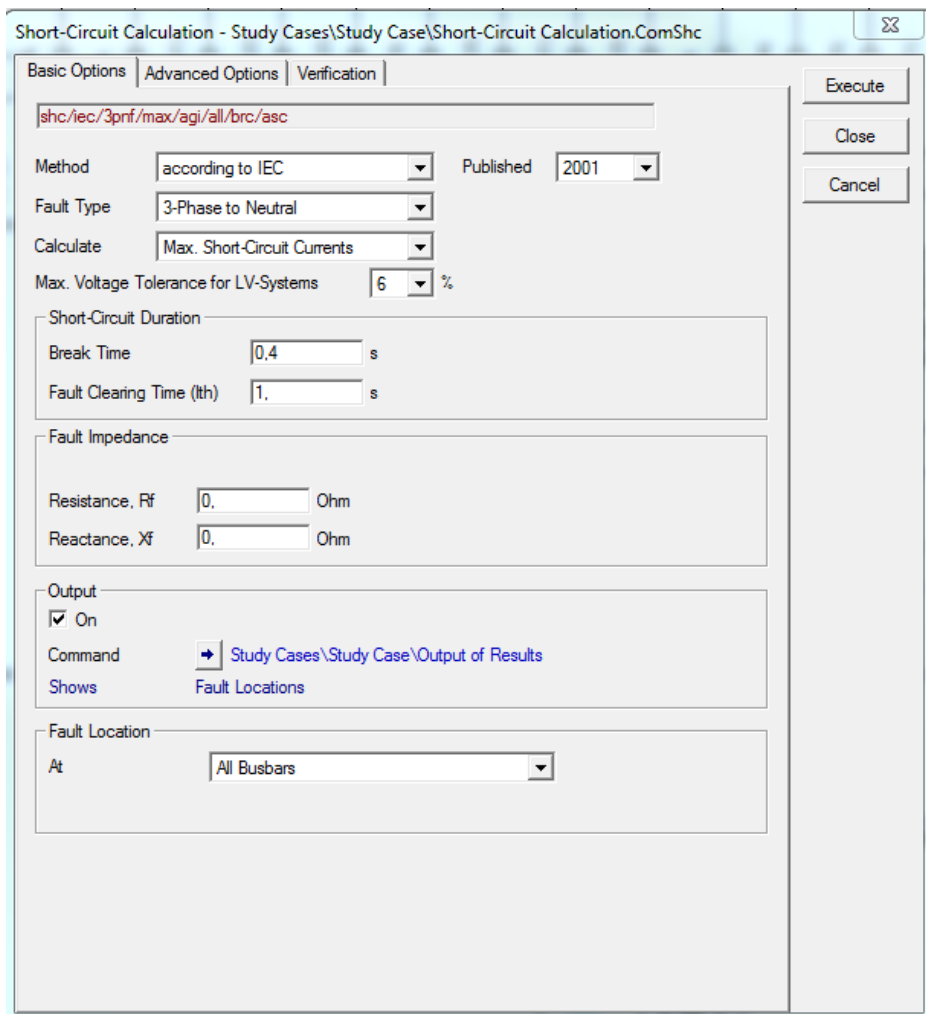
KUVA 20. Oranssi kuvaa 3% ja vaalean vihreä 4 % jännitteen alenemaa. Kuva Mikko Karvonen 2013

Kompensoinnin ollessa täydellä teholla ei jännitteenalenemia esiinny kuvan mukaisilla kuormituksilla.

9.5 Oikosulkuvirtojen laskenta

Oikosulkuvirtojen laskennan tarve simulointiohjelmalla oli selvittää suurimmat oikosulkuvirrat, joissa epätahtikoneiden vaikutus otettaisiin huomioon. Pohjatietoina laskennassa käytettiin paikallisen verkkoyhtiön Savon Voiman antamia tietoja 3-vaiheiselle oikosulkuvirralle tehdasverkkoa syöttävän muuntajan pienjännitepuolelta katsottuna. Tämän lisäksi tehdasverkon moottoreista tehtiin listaus, jonka avulla verkkomallilla voitaisiin simuloida keskuskohtaisesti moottoreiden vaikutus oikosulkuvirtaan. Uudella ja vanhalla muuntajalla oikosulkuvirrat olivat 36 923 ampeeria, yksivaiheinen oikosulkuvirta vanhalla muuntajalla 8 722 A ja uudella 7 744

A. Ohjelmassa voidaan käyttää VDE- tai ANSI-standardia sekä complete-valintaa oikosulkuvirtojen laskemiseen. Laskentavalikko kuvassa 21 esitettynä:



KUVA 21. Oikosulkuvirtojen laskentavalikko

9.5.1 Laskutulokset

2- ja 3-vaiheisten oikosulkuvirtojen laskentaa tehtiin useassa eri tilanteessa, kuten vain suurimmat konehuoneella sijaitsevat moottorit huomioon ottaen verkon ollessa normaalikuormituksessa ja kaikki moottorit huomioituna niiden kuormituksia vaihdellen. Liitteessä 1 ja 2 laskentatulokset 2- ja 3-vaiheisista maksimioikosulkuvirroista IEC-standardin mukaan verkon normaalissa käyttötilanteessa. Simuloinnin tuloksien perusteella oikosulkumoottoreilla on suuri vaikutus alkuoikosulkuvirtaan. Yksivaiheiset oikosulkuvirrat laskettiin taulukkolaskentaohjelmaa käyttäen.

10 YHTEENVETO

Työssä tutkittiin Valio Oy Suonenjoen Hillotehtaan pienjänniteverkkoa sähkölaatumittausten ja simuloinnin avulla. Lisäksi työssä käytiin läpi tehtaan sähköverkko ja samalla päivitettiin nousujohtokaavion tietoja. Työssä tehtyjen sähkölaatumittausten perusteella sähkölaatu on hyvä etenkin yliaaltojännitteiden suhteen, eikä edellytä välittömiä toimenpiteitä. Tehdyissä mittauksissa eniten yliaaltovirtoja esiintyy nousukeskus kolmosella, jossa yliaaltovirtojen pitoisuus on noin 30 %.

Simuloinnin avulla verkkoa voitiin tarkastella tehonjaon, yliaaltoanalyysin ja oikosulkulaskennan avulla. Mallinnuksella saatiin olemassa olevien ja työn aikana hankittujen tietojen avulla riittävään tarkkuuteen. Ongelmina mallinnuksessa olivat keskuksien realistiset kuormitustiedot sekä käytetty ohjelmaversio, joka salli ainoastaan 50 solmupistettä projektia kohden. Käytetystä versiosta huolimatta verkko saatiin mallinnettua melkein pienempääkin keskusta myöten. Ohjelman opettelu ja simuloinnin aikana oli mieluisaa huomata, miten paljon jo pelkästään perusominaisuuksilla saadaan tehtyä. Simuloimalla tutkittavasta verkosta saadaan halutut tulokset nopeasti, jolloin jää enemmän aikaa olennaiselle. Etenkin oikosulkuvirtojen laskenta on järkevää tehdä ohjelmallisesti suuremmilla verkoilla.

Myös mallinnuksen perusteella työssä tutkittu pienjänniteverkko on hyvässä kunnossa. Kun tehdasverkon kaikki muutokset saadaan valmiiksi, saadaan vanhalle tehdasverkolle ja uudelle pakkasvarastolle omat muuntajat. Tämän muutoksen myötä ei syöttömuuntajan riittävyttä vanhalle tehdasverkolle enää tarvitse miettiä. Oikosulkuvirrat ovat laskelmien ja Savon Voimalta saatujen lähtötietojen mukaan korkeat, siispä suojaus toimii verkon niissä kohdissa, jossa laskentaa tehtiin.

11 LÄHDELUETTELO JA TUOTETUT MATERIAALIT

ABB 2012. Yliaaltosuodatin pienjänniteverkkoon Laadukkaampaa sähköä, tehokkaampaa energian käyttöä [verkkodokumentti]. [Viitattu 05.03.2013] Saatavissa:

[http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/370bf14314cd9c8ec1257ac3003b691e/\\$file/HF%20FI%20Esite%2006092012_1TFC902037N1801.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/370bf14314cd9c8ec1257ac3003b691e/$file/HF%20FI%20Esite%2006092012_1TFC902037N1801.pdf)

ABB 2011. Pienjänniteverkon aktiivisuodattimet PQFI-PQFM-PQFK-PQFS Parantaa sähkön laatua, tehokkuutta ja luotettavuutta [verkkodokumentti]. [Viitattu 05.03.2013] Saatavissa:

[http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/ba106ed9c27cb977c12578b50019b5fc/\\$file/Pienjanniteverkon%20aktiivisuodattimet%20PQFI%20-%20PQFM%20-%20PQFK%20-%20PQFS%20low%20res.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/ba106ed9c27cb977c12578b50019b5fc/$file/Pienjanniteverkon%20aktiivisuodattimet%20PQFI%20-%20PQFM%20-%20PQFK%20-%20PQFS%20low%20res.pdf)

ABB 2001. Tekninen opas nro 6: Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas [verkkodokumentti]. [Viitattu 14.03.2013] Saatavissa:

[http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/\\$file/Tekninen_opas_nro_6.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/$file/Tekninen_opas_nro_6.pdf)

ABB 2000a. Teknisiä tietoja ja taulukoita luku 4: Sähkön laatu [verkkodokumentti]. [Viitattu 20.03.2013] Saatavissa:

<http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/>

ABB 2000b. Teknisiä tietoja ja taulukoita, luku 7: Oikosulkusuojaus ja sulakkeet [verkkodokumentti]. [Viitattu 05.04.2013] Saatavissa:

<http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/>

ABB 2000c. Teknisiä tietoja ja taulukoita, luku: 9 Loistehon kompensointi ja yliaallot [verkkodokumentti]. [Viitattu 12.04.2013] Saatavissa:

<http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/>

ABB 1999. Kolmannen yliaallon opas [verkkodokumentti]. [Viitattu 25.02.2013] Saatavissa:

[http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/2857AF09DDA38FF8C1256C5500269598/\\$File/THFOP-FI.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/2857AF09DDA38FF8C1256C5500269598/$File/THFOP-FI.pdf)

ABB 1996. Kolmas yliaalto – uusi kasvava sähköverkon ongelma ja sen ratkaisu: THF-suodatin [verkkodokumentti]. [Viitattu 21.02.2013] Saatavissa:

[http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/662C86451B71D70DC1256C5500269561/\\$File/THF11FI96_04.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/662C86451B71D70DC1256C5500269561/$File/THF11FI96_04.pdf)

ALANEN Raili & Hannu Hätönen 2006. Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta State of art-selvitys, sijainti: Espoo [verkkodokumentti]. [Viitattu 05.02.2013] Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2006/W52.pdf>

FLUKE 2013a. Sähkönlaadun sovelluskeskus [verkkodokumentti]. [Viitattu 24.03.2013] Saatavissa:

<http://www.fluke.com/fluke/fifi/sovellukset/s%C3%A4hk%C3%B6nlaatu/default.htm>

FLUKE 2013b. i2000 joustava AC-lenkkivirtapihti [verkkodokumentti]. [Viitattu 20.01.2013] Saatavissa:

<http://www.fluke.com/fluke/fifi/Lisavarusteet/Virtapihdit/i2000-flex.htm?PID=56287>

FLUKE 2006. 434/435 Kolmivaiheinen sähkönlaatuanalysointilaitteisto, suomenkielinen ohje [verkkodokumentti]. [Viitattu 15.01.2013] Saatavissa:

http://www.yeint.fi/files/products/434_435_K_ytt_ohje.pdf

HARSIA Pirkko 2003. Sähköverkon kompensointi [verkkodokumentti]. [Viitattu 06.03.2013] Saatavissa:

<http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/opintojaksot/030503/1134045922435/1134046524532/1134046634756/1134046693839.html>

HIETALAHTI Lauri 2011. Muuntajat ja sähkökoneet 1. painos Tammertekniikka 2011 (30-31). Kustantaja: Tammertekniikka, sijainti: Tampere.

HUOTARI Kari, PARTANEN Jarmo 1998. Opetusmoniste 3: Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen, sijainti: Lappeenrannan Teknillinen Korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto. [Viitattu 20.03.2013] Saatavissa:

https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCsQFjAA&url=https%3A%2F%2Fnoppa.lut.fi%2Fnoppa%2Fopintojakso%2Fbl20a0500%2Fluennot%2Fteollisuusverkkojen_oikosulkuvirrat.pdf&ei=O9mTUd_vFYby4QTfvICwDA&usg=AFQjCNGEKljWW5zNnZGiimLRWiS-ywojaQ&bvm=bv.46471029,d.bGE&cad=rja

KORPINEN Leena 2008a. Muuntajat ja sähkölaitteet [verkkodokumentti]. [Viitattu 05.03.2013] Saatavissa: http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/9muuntajat_ja_sahkolaitteet.pdf

KORPINEN Leena 2008b. Yliaalto-opus [verkkodokumentti]. [Viitattu 10.01.2013] Saatavissa: <http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/ylialto-opus.pdf>

KUKKONEN Miika 2007. Symmetristen komponenttien mallinnus, sijainti: Helsinki Stadia-ammattikorkeakoulu, tekniikan ja liikenteen toimiala. [Viitattu 24.03.2013] Saatavissa: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/4304/stadia-1176299397-9.pdf?sequence=1>

MÄKINEN Markku J.J., Kallio Raimo 2004. Teollisuuden sähköasennukset (19) julkaisija: OTAVA 2004.

NYSSÖNEN Janne 2010. Tietokonesimuloinnin käyttö teollisuusverkon analysointiin, sijainti: Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu [verkkodokumentti]. [Viitattu 10.03.2013] Saatavissa: <http://publications.theseus.fi/xmlui/handle/10024/1476/browse?value=Nyys%C3%B6nen%2C+Janne&type=author>

PULKKINEN Jani 2012. Teollisuusvalaistuksen kompensointi ja yliaaltosuodatus, sijainti: Helsinki Metropolia-ammattikorkeakoulu [verkkodokumentti]. [Viitattu 25.04.2013] Saatavissa: http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/40659/Pulkkinen_Jani.pdf?sequence=1

RAUHALA Harri 2011. Laskentatyökalu Voimalaitosympäristöön, sijainti: Vaasa, Vaasan Ammattikorkeakoulu, Tekniikka ja liikenne [opinnäytetyö]. [Viitattu 22.03.2013] Saatavissa:

http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/29366/Rauhala_Harri.pdf?sequence=1

ROUVALI Juhani 2011. Sähkönjakelutekniikka 2 muistiinpanot Symmetriset komponentit, sijainti: Kuopio Savonia ammattikorkeakoulu.

SALMINEN Petri 2009. Teollisuussähköverkon mallintaminen ja vikavirtatarkastelut [diplomityö]. [Viitattu 21.03.2013] Saatavissa:

http://webhotel2.tut.fi/units/set/opetus/pdf%20julkiset%20dyot/Salminen_Petri_julk.pdf

SAVON VOIMA 2013. Sähkön hinnat 1.4.2013 alkaen [verkkodokumentti]. [Viitattu 05.03.2013] Saatavissa:

http://www.savonvoima.fi/SiteCollectionDocuments/yksityisasiakkaat/SV_kokonaishinnasto_netti_01042013.pdf

STEK.FI 2009. Loisteho, mitä se on? [verkkodokumentti]. [Viitattu 04.03.2013] Saatavissa:

http://www.stek.fi/oikopolut/sahkoa_monessa_muodossa/fi_FI/loisteho_mita_se_on/

SÄHKÖALA.FI 2006. Ratkaisuja sähkönlaadun ongelmiin [verkkodokumentti]. [Viitattu 10.01.2013] Saatavissa:

http://www.sahkoala.fi/ajankohtaista/artikkeleita/sahkotekniikka/fi_FI/sahkon_laatu/

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO 2012. SMG-2100: SÄHKÖTEKNIikka Vaihtosähkön teho [verkkodokumentti]. [Viitattu 04.03.2013] Saatavissa:

<http://www.tut.fi/smg/tp/kurssit/SMG-2100/2012/periodi2/luento11.pdf>

TIAINEN Esa 2010. Johdon mitoitus ja suojaus, kustantaja: Sähköinfo oy, Kirjapaino: Painokurki oy helsinki (65).

TORKKELI Lasse 2011. Sähkön laatu teollisuusverkossa, sijainti: Helsinki Metropolia-ammattikorkeakoulu [opinnäytetyö]. [Viitattu 18.04.2013] Saatavissa:

https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/32492/Torkkeli_Lasse.pdf?sequence=1

UUSIMÄKI Jari 2004. Loistehon kompensointi pienjänniteverkossa ($U_n < 1000 \text{ V}$). Julkaisija: Sähkötieto ry, Espoo: Sähköinfo Oy

VALIO Oy 2013. Yritys [verkkodokumentti]. [Viitattu 22.04.2013] Saatavissa:

<http://www.valio.fi/yritys/>

VIITALA Jaakko 2006a. Sähkön laatu. Käsitteet ja vaatimukset ST 52.50. Julkaisija: Sähkötieto ry, Espoo: Sähköinfo Oy.

VIITALA Jaakko 2006b. Sähkönlaatu. Harmoniset yliaallot ST 52.51.03. Julkaisija: Sähkötieto ry, Espoo: Sähköinfo Oy.

LIITTEET

Liite 3-Vaiheiset maksimioikosulkuvirrat uudella muuntajalla 2001-vuoden IEC-standardin mukaan, jossa vain isoimmat moottorit huomioituna:

										DIGSILENT PowerFactory 14.0.510		Project: Date: 4/16/2013	
Fault Locations Short-Circuit Calculation according to IEC										3-Phase Short-Circuit / Max. Short-Circuit Currents			
Asynchronous Motors Always Considered					Grid Identification Automatic					Short-Circuit Duration Break Time		0,40 s	
Decaying Aperiodic Component (idc) Using Method					Conductor Temperature User Defined					Fault Clearing Time (Ith)		1,00 s	
					No					c-voltage Factor User Defined		No	
Grid: Grid										System stage: Grid		Annex: / 1	
	rtd. V [kV]	voltage [kV]	deg [deg]	c- Factor	Sk" [MVA]	[kA]	Ik" [deg]	ip [kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]	
KK1(1)	0,40	0,00	0,00	1,05	14,19	20,48	-68,66	40,57	18,90	13,09	15,49	18,65	
RK27(1)	0,40	0,00	0,00	1,05	6,97	10,06	-42,32	15,19	10,08	6,98	7,61	9,12	
Komp. 5	0,40	0,00	0,00	1,05	13,52	19,51	-66,86	37,56	18,17	12,59	14,76	17,75	
RK17(1)	0,40	0,00	0,00	1,05	4,08	5,89	-33,35	8,61	5,89	4,08	4,46	5,34	
RK19(1)	0,40	0,00	0,00	1,05	5,90	8,52	-39,83	12,71	8,56	5,93	6,45	7,72	
RK12A	0,40	0,00	0,00	1,05	11,61	16,76	-52,32	27,27	16,42	11,37	12,68	15,21	
Sininen vara	0,40	0,00	0,00	1,05	1,49	2,14	-10,68	3,09	2,14	1,49	1,62	1,94	
Kaasukeskus(	0,40	0,00	0,00	1,05	4,32	6,24	-22,36	9,01	6,24	4,32	4,72	5,65
Komp.1	0,40	0,00	0,00	1,05	6,02	8,69	-26,13	12,58	8,90	6,17	6,57	7,87	
Glivet(1)	0,40	0,00	0,00	1,05	9,65	13,93	-51,70	22,38	11,99	8,31	9,71	12,33	
Komp. 6	0,40	0,00	0,00	1,05	13,32	19,23	-61,12	34,37	18,28	12,66	14,55	17,48	
RK11(1)	0,40	0,00	0,00	1,05	4,94	7,13	-21,45	10,30	7,24	5,02	5,40	6,46	
RK21(1)	0,40	0,00	0,00	1,05	5,70	8,23	-39,21	12,24	8,27	5,73	6,23	7,46	
PI-Komp	0,40	0,00	0,00	1,05	2,81	4,06	-21,33	5,86	3,62	2,51	2,79	3,57	
Komp. 3	0,40	0,00	0,00	1,05	6,02	8,69	-26,13	12,58	8,90	6,17	6,57	7,87	
Grid: Grid										System Stage: Grid		Annex: / 2	
	rtd. V [kV]	voltage [kV]	deg [deg]	c- Factor	Sk" [MVA]	[kA]	Ik" [deg]	ip [kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]	
R02(1)	0,40	0,00	0,00	1,05	1,06	1,53	-9,19	2,21	1,53	1,06	1,16	1,39	
Kenno7(1)	0,40	0,00	0,00	1,05	14,19	20,48	-68,66	40,57	18,90	13,09	15,49	18,65	
Komp.2	0,40	0,00	0,00	1,05	6,40	9,24	-28,49	13,42	8,92	6,18	6,72	8,28	
RK20(1)	0,40	0,00	0,00	1,05	4,84	6,99	-35,68	10,28	7,00	4,85	5,29	6,34	
KK2(1)	0,40	0,00	0,00	1,05	6,02	8,69	-26,13	12,58	8,90	6,17	6,57	7,87	
Laatikkovara	0,40	0,00	0,00	1,05	1,28	1,85	-9,96	2,67	1,85	1,28	1,40	1,68	
KK3(1)	0,40	0,00	0,00	1,05	4,79	6,92	-21,48	9,99	6,98	4,83	5,24	6,27	
Pääkeskus	0,40	0,00	0,00	1,05	15,08	21,76	-72,59	46,04	19,72	13,66	16,47	19,86	
RK12(1)	0,40	0,00	0,00	1,05	0,93	1,35	-6,95	1,94	1,35	0,93	1,02	1,22	
Muuntajakenn	0,40	0,00	0,00	1,05	15,21	21,95	-73,55	47,43	20,03	13,88	16,75	20,10	

										DigSILENT PowerFactory 14.0.510		Project: Date: 4/16/2013			
Fault Locations Short-Circuit Calculation according to IEC										3-Phase Short-Circuit / Max. Short-Circuit Currents					
Asynchronous Motors Always Considered					Grid Identification Automatic					Short-Circuit Duration Break Time		0,40 s			
Decaying Aperiodic Component (idc) Using Method B					Conductor Temperature User Defined					No		Fault Clearing Time (Ith) c-Voltage Factor User Defined		1,00 s No	
Grid: NK1										System Stage: NK1		Annex: / 3			
	rtd. V [kV]	voltage [kV]	c- Factor	sk" [MVA]	[kA]	Ik" [deg]	Ip [kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]				
R(1)	0,40	0,00	0,00	1,05	8,18	11,80	-41,39	17,75	11,67	8,09	8,77	10,65			
NK1	0,40	0,00	0,00	1,05	8,18	11,80	-41,39	17,75	11,67	8,09	8,77	10,65			
RK23(1)	0,40	0,00	0,00	1,05	8,18	11,80	-41,39	17,75	11,67	8,09	8,77	10,65			
RK21(1)	0,40	0,00	0,00	1,05	8,18	11,80	-41,39	17,75	11,67	8,09	8,77	10,65			
RK24(1)	0,40	0,00	0,00	1,05	8,18	11,80	-41,39	17,75	11,67	8,09	8,77	10,65			
RK16(1)	0,40	0,00	0,00	1,05	3,63	5,23	-19,39	7,55	5,21	3,61	3,89	4,72			
RK14(1)	0,40	0,00	0,00	1,05	4,35	6,28	-25,98	9,09	6,24	4,33	4,67	5,66			
RK15(2)	0,40	0,00	0,00	1,05	8,18	11,80	-41,39	17,75	11,67	8,09	8,77	10,65			
RK25(4)	0,40	0,00	0,00	1,05	8,18	11,80	-41,39	17,75	11,67	8,09	8,77	10,65			
RK13(2)	0,40	0,00	0,00	1,05	8,18	11,80	-41,39	17,75	11,67	8,09	8,77	10,65			
RK22(1)	0,40	0,00	0,00	1,05	3,09	4,46	-19,49	6,43	4,44	3,08	3,31	4,02			

										DigSILENT PowerFactory 14.0.510		Project: Date: 4/16/2013			
Fault Locations Short-Circuit Calculation according to IEC										3-Phase Short-Circuit / Max. Short-Circuit Currents					
Asynchronous Motors Always Considered					Grid Identification Automatic					Short-Circuit Duration Break Time		0,40 s			
Decaying Aperiodic Component (idc) Using Method B					Conductor Temperature User Defined					No		Fault Clearing Time (Ith) c-Voltage Factor User Defined		1,00 s No	
Grid: NK3										System Stage: NK3		Annex: / 4			
	rtd. V [kV]	voltage [kV]	c- Factor	sk" [MVA]	[kA]	Ik" [deg]	Ip [kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]				
NK3	0,40	0,00	0,00	1,05	10,92	15,76	-53,87	25,61	14,35	9,94	11,22	14,05			
RK41(1)	0,40	0,00	0,00	1,05	10,92	15,76	-53,87	25,61	14,35	9,94	11,22	14,05			
VJK10(1)	0,40	0,00	0,00	1,05	10,92	15,76	-53,87	25,61	14,35	9,94	11,22	14,05			
RK31(1)	0,40	0,00	0,00	1,05	10,92	15,76	-53,87	25,61	14,35	9,94	11,22	14,05			
KJK1(1)	0,40	0,00	0,00	1,05	10,92	15,76	-53,87	25,61	14,35	9,94	11,22	14,05			
Atlas-compo	0,40	0,00	0,00	1,05	10,92	15,76	-53,87	25,61	14,35	9,94	11,22	14,05			
RK29(1)	0,40	0,00	0,00	1,05	10,92	15,76	-53,87	25,61	14,35	9,94	11,22	14,05			
Pesukone(2)	0,40	0,00	0,00	1,05	10,92	15,76	-53,87	25,61	14,35	9,94	11,22	14,05			
Pesukone(3)	0,40	0,00	0,00	1,05	10,92	15,76	-53,87	25,61	14,35	9,94	11,22	14,05			
RK43(4)	0,40	0,00	0,00	1,05	10,92	15,76	-53,87	25,61	14,35	9,94	11,22	14,05			
LK1	0,40	0,00	0,00	1,05	6,99	10,09	-32,43	14,71	9,92	6,88	7,18	8,98			
RK42	0,40	0,00	0,00	1,05	10,29	14,85	-51,55	23,66	13,60	9,42	10,53	13,21			

										DIGSILENT PowerFactory 14.0.510		Project: Date: 4/16/2013		
Fault Locations Short-Circuit Calculation according to IEC										3-Phase Short-Circuit / Min. Short-Circuit Currents				
Asynchronous Motors Always Considered					Grid Identification Automatic					Short-Circuit Duration Break Time			0,40 s	
Decaying Aperiodic Component (idc) Using Method					Conductor Temperature User Defined					Fault Clearing Time (Ith)			1,00 s	
					No					c-Voltage Factor User Defined			No	
Grid: Grid										System Stage: Grid		Annex:		/ 1
	rtd. v [kV]	voltage [kV]	c- Factor	sk" [MVA]	[kA]	Ik" [deg]	ip [kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]			
KK1(1)	0,40	0,00	0,00	0,95	9,78	14,12	-75,28	29,27	14,12	9,78	14,12	14,21		
RK27(1)	0,40	0,00	0,00	0,95	5,25	7,58	-44,33	11,42	7,58	5,25	7,58	7,59		
Komp. 5	0,40	0,00	0,00	0,95	9,43	13,61	-73,19	27,26	13,61	9,43	13,61	13,69		
RK17(1)	0,40	0,00	0,00	0,95	3,10	4,47	-32,85	6,51	4,47	3,10	4,47	4,48		
RK19(1)	0,40	0,00	0,00	0,95	4,47	6,46	-40,85	9,59	6,46	4,47	6,46	6,47		
RK12A	0,40	0,00	0,00	0,95	8,36	12,07	-58,22	20,02	12,07	8,36	12,07	12,11		
Sininen vara	0,40	0,00	0,00	0,95	1,10	1,58	-10,37	2,28	1,58	1,10	1,58	1,58		
Kaasukeskus(	0,40	0,00	0,00	0,95	3,23	4,66	-23,51	6,73	4,66	3,23	4,66	4,67	
Komp.1	0,40	0,00	0,00	0,95	4,49	6,48	-28,76	9,39	6,48	4,49	6,48	6,49		
Glivet(1)	0,40	0,00	0,00	0,95	6,26	9,04	-50,10	14,05	9,04	6,26	9,04	9,06		
Komp. 6	0,40	0,00	0,00	0,95	9,36	13,50	-67,74	24,96	13,50	9,36	13,50	13,56		
RK11(1)	0,40	0,00	0,00	0,95	3,69	5,32	-23,47	7,68	5,32	3,69	5,32	5,33		
RK21(1)	0,40	0,00	0,00	0,95	4,32	6,24	-40,05	9,24	6,24	4,32	6,24	6,25		
PI-Komp	0,40	0,00	0,00	0,95	1,87	2,70	-16,89	3,89	2,70	1,87	2,70	2,70		
Komp. 3	0,40	0,00	0,00	0,95	4,49	6,48	-28,76	9,39	6,48	4,49	6,48	6,49		
Grid: Grid										System Stage: Grid		Annex:		/ 2
	rtd. v [kV]	voltage [kV]	c- Factor	sk" [MVA]	[kA]	Ik" [deg]	ip [kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]			
R02(1)	0,40	0,00	0,00	0,95	0,78	1,13	-8,66	1,63	1,13	0,78	1,13	1,13		
Kenno7(1)	0,40	0,00	0,00	0,95	9,78	14,12	-75,28	29,27	14,12	9,78	14,12	14,21		
Komp. 2	0,40	0,00	0,00	0,95	4,49	6,48	-28,76	9,39	6,48	4,49	6,48	6,49		
RK20(1)	0,40	0,00	0,00	0,95	3,67	5,30	-35,84	7,76	5,30	3,67	5,30	5,31		
KK2(1)	0,40	0,00	0,00	0,95	4,49	6,48	-28,76	9,39	6,48	4,49	6,48	6,49		
Laatikkovara	0,40	0,00	0,00	0,95	0,94	1,36	-9,54	1,97	1,36	0,94	1,36	1,37		
KK3(1)	0,40	0,00	0,00	0,95	3,58	5,16	-23,32	7,45	5,16	3,58	5,16	5,17		
Pääkeskus	0,40	0,00	0,00	0,95	10,21	14,74	-79,40	32,92	14,74	10,21	14,74	14,88		
RK12(1)	0,40	0,00	0,00	0,95	0,69	0,99	-6,68	1,43	0,99	0,69	0,99	0,99		
Muuntajakenn	0,40	0,00	0,00	0,95	10,40	15,01	-80,84	34,48	15,01	10,40	15,01	15,17		

										DIGSILENT PowerFactory 14.0.510		Project: Date: 4/16/2013	
Fault Locations Short-Circuit Calculation according to IEC										3-Phase Short-Circuit / Min. Short-Circuit Currents			
Asynchronous Motors Always Considered				Grid Identification Automatic				Short-Circuit Duration Break Time				0,40 s	
Decaying Aperiodic Component (idc) Using Method				Conductor Temperature User Defined				Fault Clearing Time (Ith)				1,00 s	
				No				c-voltage Factor user Defined				No	
Grid: NK1										System Stage: NK1		Annex: / 3	
	rtd. V [kV]	voltage [kV]	deg [deg]	c- Factor	Sk" [MVA]	[kA]	Ik" [deg]	ip [kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]	
R(1)	0,40	0,00	0,00	0,95	5,93	8,56	-44,08	12,88	8,56	5,93	8,56	8,58	
NK1	0,40	0,00	0,00	0,95	5,93	8,56	-44,08	12,88	8,56	5,93	8,56	8,58	
RK23(1)	0,40	0,00	0,00	0,95	5,93	8,56	-44,08	12,88	8,56	5,93	8,56	8,58	
RK21(1)	0,40	0,00	0,00	0,95	5,93	8,56	-44,08	12,88	8,56	5,93	8,56	8,58	
RK24(1)	0,40	0,00	0,00	0,95	5,93	8,56	-44,08	12,88	8,56	5,93	8,56	8,58	
RK16(1)	0,40	0,00	0,00	0,95	2,67	3,85	-20,14	5,55	3,85	2,67	3,85	3,85	
RK14(1)	0,40	0,00	0,00	0,95	3,21	4,64	-26,55	6,71	4,64	3,21	4,64	4,64	
RK15(2)	0,40	0,00	0,00	0,95	5,93	8,56	-44,08	12,88	8,56	5,93	8,56	8,58	
RK25(4)	0,40	0,00	0,00	0,95	5,93	8,56	-44,08	12,88	8,56	5,93	8,56	8,58	
RK13(2)	0,40	0,00	0,00	0,95	5,93	8,56	-44,08	12,88	8,56	5,93	8,56	8,58	
RK22(1)	0,40	0,00	0,00	0,95	2,28	3,29	-19,60	4,74	3,29	2,28	3,29	3,29	

										DIGSILENT PowerFactory 14.0.510		Project: Date: 4/16/2013	
Fault Locations Short-Circuit Calculation according to IEC										3-Phase Short-Circuit / Min. Short-Circuit Currents			
Asynchronous Motors Always Considered				Grid Identification Automatic				Short-Circuit Duration Break Time				0,40 s	
Decaying Aperiodic Component (idc) Using Method				Conductor Temperature User Defined				Fault Clearing Time (Ith)				1,00 s	
				No				c-voltage Factor user Defined				No	
Grid: NK3										System Stage: NK3		Annex: / 4	
	rtd. V [kV]	voltage [kV]	deg [deg]	c- Factor	Sk" [MVA]	[kA]	Ik" [deg]	ip [kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]	
NK3	0,40	0,00	0,00	0,95	7,24	10,45	-56,07	16,99	10,45	7,24	10,45	10,47	
RK41(1)	0,40	0,00	0,00	0,95	7,24	10,45	-56,07	16,99	10,45	7,24	10,45	10,47	
VJK10(1)	0,40	0,00	0,00	0,95	7,24	10,45	-56,07	16,99	10,45	7,24	10,45	10,47	
RK31(1)	0,40	0,00	0,00	0,95	7,24	10,45	-56,07	16,99	10,45	7,24	10,45	10,47	
KJK1(1)	0,40	0,00	0,00	0,95	7,24	10,45	-56,07	16,99	10,45	7,24	10,45	10,47	
Atlas-compo	0,40	0,00	0,00	0,95	7,24	10,45	-56,07	16,99	10,45	7,24	10,45	10,47	
RK29(1)	0,40	0,00	0,00	0,95	7,24	10,45	-56,07	16,99	10,45	7,24	10,45	10,47	
Pesukone(2)	0,40	0,00	0,00	0,95	7,24	10,45	-56,07	16,99	10,45	7,24	10,45	10,47	
Pesukone(3)	0,40	0,00	0,00	0,95	7,24	10,45	-56,07	16,99	10,45	7,24	10,45	10,47	
RK43(4)	0,40	0,00	0,00	0,95	7,24	10,45	-56,07	16,99	10,45	7,24	10,45	10,47	
LK1	0,40	0,00	0,00	0,95	4,86	7,02	-34,92	10,25	7,02	4,86	7,02	7,03	
RK42	0,40	0,00	0,00	0,95	6,84	9,88	-53,42	15,73	9,88	6,84	9,88	9,90	

Liite 2-vaiheiset maksimioikosulkuvirrat uudella muuntajalla vuoden 2001 IEC-standardin mukaan:

		DigSILENT PowerFactory 14.0.510		Project: Date: 4/16/2013								
Fault Locations												
Short-Circuit Calculation according to IEC												
2-Phase Short-Circuit / Max. Short-Circuit Currents												
Asynchronous Motors Always Considered		Grid Identification Automatic		Short-Circuit Duration Break Time								
		Conductor Temperature User Defined		Fault Clearing Time (Ith)								
		No		0,40 s 1,00 s								
				c-Voltage Factor User Defined								
				No								
Grid: Grid												
System Stage: Grid												
Annex: / 1												
	rtd. V [kV]	Phase	[kV]	voltage [p.u.]	[deg]	c- Factor	Sk" [MVA]	[kA]	Ik" [deg]	ip [kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]
KK1(1)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		4,10	17,73	-158,66	35,14	17,73	4,10
		C	0,12	0,52	180,00		4,10	17,73	21,34	35,14	17,73	4,10
RK27(1)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		2,01	8,71	-132,32	13,15	8,71	2,01
		C	0,12	0,52	180,00		2,01	8,71	47,68	13,15	8,71	2,01
Komp.5	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		3,90	16,89	-156,86	32,53	16,89	3,90
		C	0,12	0,52	180,00		3,90	16,89	23,14	32,53	16,89	3,90
RK17(1)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		1,18	5,10	-123,35	7,45	5,10	1,18
		C	0,12	0,52	180,00		1,18	5,10	56,65	7,45	5,10	1,18
RK19(1)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		1,70	7,38	-129,83	11,00	7,38	1,70
		C	0,12	0,52	180,00		1,70	7,38	50,17	11,00	7,38	1,70
RK12A	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		3,35	14,51	-142,32	23,62	14,51	3,35
		C	0,12	0,52	180,00		3,35	14,51	37,68	23,62	14,51	3,35
Sininen varasto	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		0,43	1,86	-100,68	2,68	1,86	0,43
		C	0,12	0,52	180,00		0,43	1,86	79,32	2,68	1,86	0,43
Grid: Grid												
System Stage: Grid												
Annex: / 2												
	rtd. V [kV]	Phase	[kV]	voltage [p.u.]	[deg]	c- Factor	Sk" [MVA]	[kA]	Ik" [deg]	ip [kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]
Kaasukeskus(1)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		1,25	5,40	-112,36	7,80	5,40	1,25
		C	0,12	0,52	180,00		1,25	5,40	67,64	7,80	5,40	1,25
Komp.1	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		1,74	7,53	-116,13	10,89	7,53	1,74
		C	0,12	0,52	180,00		1,74	7,53	63,87	10,89	7,53	1,74
Glivet(1)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		2,79	12,07	-141,70	19,39	12,07	2,79
		C	0,12	0,52	180,00		2,79	12,07	38,30	19,39	12,07	2,79
Komp.6	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		3,85	16,66	-151,12	29,77	16,66	3,85
		C	0,12	0,52	180,00		3,85	16,66	28,88	29,77	16,66	3,85
RK11(1)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		1,43	6,18	-111,45	8,92	6,18	1,43
		C	0,12	0,52	180,00		1,43	6,18	68,55	8,92	6,18	1,43
RK21(1)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		1,65	7,13	-129,21	10,60	7,13	1,65
		C	0,12	0,52	180,00		1,65	7,13	50,79	10,60	7,13	1,65
PI-Komp	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		0,81	3,52	-111,33	5,08	3,52	0,81
		C	0,12	0,52	180,00		0,81	3,52	68,67	5,08	3,52	0,81
Komp.3	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		1,74	7,53	-116,13	10,89	7,53	1,74
		C	0,12	0,52	180,00		1,74	7,53	63,87	10,89	7,53	1,74
R02(1)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		0,31	1,33	-99,19	1,92	1,33	0,31
		C	0,12	0,52	180,00		0,31	1,33	80,81	1,92	1,33	0,31
Kenno7(1)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		4,10	17,73	-158,66	35,14	17,73	4,10
		C	0,12	0,52	180,00		4,10	17,73	21,34	35,14	17,73	4,10
Komp.2	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		1,85	8,00	-118,49	11,62	8,00	1,85
		C	0,12	0,52	180,00		1,85	8,00	61,51	11,62	8,00	1,85

Grid: Grid	System Stage: Grid							Annex: / 3				
	rtd. V [kV]	Phase	[kV]	Voltage [p.u.]	[deg]	c-Factor	Sk'' [MVA]	[kA]	Ik'' [deg]	ip [kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]
RK20(1)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		1,40	6,05	-125,68	8,90	6,05	1,40
		C	0,12	0,52	180,00		1,40	6,05	54,32	8,90	6,05	1,40
KK2(1)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		1,74	7,53	-116,13	10,89	7,53	1,74
		C	0,12	0,52	180,00		1,74	7,53	63,87	10,89	7,53	1,74
Laatikkovarast	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		0,37	1,60	-99,96	2,31	1,60	0,37
		C	0,12	0,52	180,00		0,37	1,60	80,04	2,31	1,60	0,37
KK3(1)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		1,38	5,99	-111,48	8,65	5,99	1,38
		C	0,12	0,52	180,00		1,38	5,99	68,52	8,65	5,99	1,38
Pääkeskus	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		4,35	18,85	-162,59	39,87	18,85	4,35
		C	0,12	0,52	180,00		4,35	18,85	17,41	39,87	18,85	4,35
RK12(1)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		0,27	1,17	-96,95	1,68	1,17	0,27
		C	0,12	0,52	180,00		0,27	1,17	83,05	1,68	1,17	0,27
Muuntajakkenno	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		4,39	19,01	-163,55	41,07	19,01	4,39
		C	0,12	0,52	180,00		4,39	19,01	16,45	41,07	19,01	4,39

		DIGSILENT PowerFactory 14.0.510	Project: Date: 4/16/2013
--	--	---------------------------------	--------------------------

Fault Locations Short-Circuit Calculation according to IEC		2-Phase Short-Circuit / Max. Short-Circuit Currents	
Asynchronous Motors Always Considered	Grid Identification Automatic	Short-Circuit Duration Break Time	0,40 s
	Conductor Temperature User Defined	Fault Clearing Time (Ith)	1,00 s
	No	c-Voltage Factor User Defined	No

Grid: NK1	System Stage: NK1							Annex: / 4				
	rtd. V [kV]	Phase	[kV]	Voltage [p.u.]	[deg]	c-Factor	Sk'' [MVA]	[kA]	Ik'' [deg]	ip [kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]
R(1)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		2,36	10,22	-131,39	15,37	10,22	2,36
		C	0,12	0,52	180,00		2,36	10,22	48,61	15,37	10,22	2,36
NK1	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		2,36	10,22	-131,39	15,37	10,22	2,36
		C	0,12	0,52	180,00		2,36	10,22	48,61	15,37	10,22	2,36
RK23(1)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		2,36	10,22	-131,39	15,37	10,22	2,36
		C	0,12	0,52	180,00		2,36	10,22	48,61	15,37	10,22	2,36
RK21(1)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		2,36	10,22	-131,39	15,37	10,22	2,36
		C	0,12	0,52	180,00		2,36	10,22	48,61	15,37	10,22	2,36
RK24(1)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		2,36	10,22	-131,39	15,37	10,22	2,36
		C	0,12	0,52	180,00		2,36	10,22	48,61	15,37	10,22	2,36
RK16(1)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		1,05	4,53	-109,39	6,54	4,53	1,05
		C	0,12	0,52	180,00		1,05	4,53	70,61	6,54	4,53	1,05
RK14(1)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		1,26	5,44	-115,98	7,87	5,44	1,26
		C	0,12	0,52	180,00		1,26	5,44	64,02	7,87	5,44	1,26

Grid: NK1		System Stage: NK1							Annex: / 5			
	rtd. V [kV]	Phase	[kV]	voltage [p.u.]	[deg]	c-Factor	Sk'' [MVA]	[kA]	Ik'' [deg]	Ip [kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]
RK15 (2)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		2,36	10,22	-131,39	15,37	10,22	2,36
		C	0,12	0,52	180,00		2,36	10,22	48,61	15,37	10,22	2,36
RK25 (4)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		2,36	10,22	-131,39	15,37	10,22	2,36
		C	0,12	0,52	180,00		2,36	10,22	48,61	15,37	10,22	2,36
RK13 (2)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		2,36	10,22	-131,39	15,37	10,22	2,36
		C	0,12	0,52	180,00		2,36	10,22	48,61	15,37	10,22	2,36
RK22 (1)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		0,89	3,86	-109,49	5,57	3,86	0,89
		C	0,12	0,52	180,00		0,89	3,86	70,51	5,57	3,86	0,89

Digsilent PowerFactory 14.0.510	Project: Date: 4/16/2013
---------------------------------	--------------------------

Fault Locations		2-Phase Short-Circuit / Max. Short-Circuit Currents	
Asynchronous Motors Always Considered	Grid Identification Automatic	Short-Circuit Duration Break Time	0,40 s
	Conductor Temperature User Defined	Fault Clearing Time (Ith)	1,00 s
	No	c-Voltage Factor User Defined	No

Grid: NK3		System Stage: NK3							Annex: / 6			
	rtd. V [kV]	Phase	[kV]	voltage [p.u.]	[deg]	c-Factor	Sk'' [MVA]	[kA]	Ik'' [deg]	Ip [kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]
NK3	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		3,15	13,65	-143,87	22,18	13,65	3,15
		C	0,12	0,52	180,00		3,15	13,65	36,13	22,18	13,65	3,15
RK41 (1)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		3,15	13,65	-143,87	22,18	13,65	3,15
		C	0,12	0,52	180,00		3,15	13,65	36,13	22,18	13,65	3,15
VJK10 (1)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		3,15	13,65	-143,87	22,18	13,65	3,15
		C	0,12	0,52	180,00		3,15	13,65	36,13	22,18	13,65	3,15
RK31 (1)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		3,15	13,65	-143,87	22,18	13,65	3,15
		C	0,12	0,52	180,00		3,15	13,65	36,13	22,18	13,65	3,15
KJK1 (1)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		3,15	13,65	-143,87	22,18	13,65	3,15
		C	0,12	0,52	180,00		3,15	13,65	36,13	22,18	13,65	3,15
Atlas-compo ZT3	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		3,15	13,65	-143,87	22,18	13,65	3,15
		C	0,12	0,52	180,00		3,15	13,65	36,13	22,18	13,65	3,15
RK29 (1)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		3,15	13,65	-143,87	22,18	13,65	3,15
		C	0,12	0,52	180,00		3,15	13,65	36,13	22,18	13,65	3,15

Grid: NK3		System Stage: NK3							Annex: / 7			
	rtd. V [kV]	Phase	[kV]	voltage [p.u.]	[deg]	c-Factor	Sk'' [MVA]	[kA]	Ik'' [deg]	Ip [kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]
Pesukone(2)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		3,15	13,65	-143,87	22,18	13,65	3,15
		C	0,12	0,52	180,00		3,15	13,65	36,13	22,18	13,65	3,15
Pesukone(3)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		3,15	13,65	-143,87	22,18	13,65	3,15
		C	0,12	0,52	180,00		3,15	13,65	36,13	22,18	13,65	3,15
RK43 (4)	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		3,15	13,65	-143,87	22,18	13,65	3,15
		C	0,12	0,52	180,00		3,15	13,65	36,13	22,18	13,65	3,15
LK1	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		2,02	8,74	-122,43	12,74	8,74	2,02
		C	0,12	0,52	180,00		2,02	8,74	57,57	12,74	8,74	2,02
RK42	0,40	A	0,24	1,05	-0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,12	0,52	180,00		2,97	12,86	-141,55	20,49	12,86	2,97
		C	0,12	0,52	180,00		2,97	12,86	38,45	20,49	12,86	2,97

DigSILENT PowerFactory 14.0.510		Project: Date: 4/16/2013										
Fault Locations Short-Circuit Calculation according to IEC				2-Phase Short-Circuit / Min. Short-Circuit Currents								
Asynchronous Motors Always Considered		Grid Identification Automatic		Short-Circuit Duration Break Time		0,40 s						
		Conductor Temperature User Defined		Fault Clearing Time (Ith)		1,00 s						
		No		c-Voltage Factor User Defined		No						
Grid: Grid		System Stage: Grid		Annex:		/ 1						
	rtd. V [kV]	Phase	[kV]	Voltage [p.u.]	[deg]	c- Factor	Sk" [MVA]	[kA]	Ik" [deg]	Ip [kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]
KK1(1)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		2,82	12,23	-165,28	25,35	12,23	2,82
		C	0,11	0,47	180,00		2,82	12,23	14,72	25,35	12,23	2,82
RK27(1)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		1,52	6,56	-134,33	9,89	6,56	1,52
		C	0,11	0,47	180,00		1,52	6,56	45,67	9,89	6,56	1,52
Komp.5	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		2,72	11,79	-163,19	23,61	11,79	2,72
		C	0,11	0,47	180,00		2,72	11,79	16,81	23,61	11,79	2,72
RK17(1)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		0,89	3,87	-122,85	5,63	3,87	0,89
		C	0,11	0,47	180,00		0,89	3,87	57,15	5,63	3,87	0,89
RK19(1)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		1,29	5,59	-130,85	8,31	5,59	1,29
		C	0,11	0,47	180,00		1,29	5,59	49,15	8,31	5,59	1,29
RK12A	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		2,41	10,46	-148,22	17,34	10,46	2,41
		C	0,11	0,47	180,00		2,41	10,46	31,78	17,34	10,46	2,41
Sininen varasto	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		0,32	1,37	-100,37	1,98	1,37	0,32
		C	0,11	0,47	180,00		0,32	1,37	79,63	1,98	1,37	0,32

Grid: Grid		System Stage: Grid		Annex:		/ 2						
	rtd. V [kV]	Phase	[kV]	Voltage [p.u.]	[deg]	c- Factor	Sk" [MVA]	[kA]	Ik" [deg]	Ip [kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]
Kaasukeskus(1)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		0,93	4,04	-113,51	5,83	4,04	0,93
		C	0,11	0,47	180,00		0,93	4,04	66,49	5,83	4,04	0,93
Komp.1	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		1,30	5,61	-118,76	8,13	5,61	1,30
		C	0,11	0,47	180,00		1,30	5,61	61,24	8,13	5,61	1,30
Glivet(1)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		1,81	7,83	-140,10	12,17	7,83	1,81
		C	0,11	0,47	180,00		1,81	7,83	39,90	12,17	7,83	1,81
Komp.6	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		2,70	11,69	-157,74	21,62	11,69	2,70
		C	0,11	0,47	180,00		2,70	11,69	22,26	21,62	11,69	2,70
RK11(1)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		1,06	4,61	-113,47	6,65	4,61	1,06
		C	0,11	0,47	180,00		1,06	4,61	66,53	6,65	4,61	1,06
RK21(1)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		1,25	5,40	-130,05	8,00	5,40	1,25
		C	0,11	0,47	180,00		1,25	5,40	49,95	8,00	5,40	1,25
PI-Komp	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		0,54	2,33	-106,89	3,37	2,33	0,54
		C	0,11	0,47	180,00		0,54	2,33	73,11	3,37	2,33	0,54
Komp.3	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		1,30	5,61	-118,76	8,13	5,61	1,30
		C	0,11	0,47	180,00		1,30	5,61	61,24	8,13	5,61	1,30
R02(1)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		0,23	0,98	-95,66	1,41	0,98	0,23
		C	0,11	0,47	180,00		0,23	0,98	81,34	1,41	0,98	0,23
Kenno7(1)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		2,82	12,23	-165,28	25,35	12,23	2,82
		C	0,11	0,47	180,00		2,82	12,23	14,72	25,35	12,23	2,82
Komp.2	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		1,30	5,61	-118,76	8,13	5,61	1,30
		C	0,11	0,47	180,00		1,30	5,61	61,24	8,13	5,61	1,30

Grid: Grid		System Stage: Grid							Annex: / 3			
	rtd. V [kV]	Phase	[kV]	voltage [p.u.]	[deg]	c-Factor	Sk'' [MVA]	[kA]	Ik'' [deg]	Ip [kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]
RK20(1)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		1,06	4,59	-125,84	6,72	4,59	1,06
		C	0,11	0,47	180,00		1,06	4,59	54,16	6,72	4,59	1,06
KK2(1)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		1,30	5,61	-118,76	8,13	5,61	1,30
		C	0,11	0,47	180,00		1,30	5,61	61,24	8,13	5,61	1,30
Laatikkovarast	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		0,27	1,18	-99,54	1,70	1,18	0,27
		C	0,11	0,47	180,00		0,27	1,18	80,46	1,70	1,18	0,27
KK3(1)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		1,03	4,47	-113,32	6,45	4,47	1,03
		C	0,11	0,47	180,00		1,03	4,47	66,68	6,45	4,47	1,03
Pääkeskus	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		2,95	12,77	-169,40	28,51	12,77	2,95
		C	0,11	0,47	180,00		2,95	12,77	10,60	28,51	12,77	2,95
RK12(1)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		0,20	0,86	-96,68	1,24	0,86	0,20
		C	0,11	0,47	180,00		0,20	0,86	83,32	1,24	0,86	0,20
Muuntajakkenno	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		3,00	13,00	-170,84	29,86	13,00	3,00
		C	0,11	0,47	180,00		3,00	13,00	9,16	29,86	13,00	3,00

	DIGSILENT PowerFactory 14.0.510	Project: /
		Date: 4/16/2013

Fault Locations		2-Phase Short-Circuit / Min. Short-Circuit Currents	
Short-Circuit Calculation according to IEC			
Asynchronous Motors Always Considered	Grid Identification Automatic	Short-Circuit Duration Break Time	0,40 s
	Conductor Temperature User Defined	Fault Clearing Time (Ith)	1,00 s
		c-Voltage Factor	No
		User Defined	No

Grid: NK1		System Stage: NK1							Annex: / 4			
	rtd. V [kV]	Phase	[kV]	voltage [p.u.]	[deg]	c-Factor	Sk'' [MVA]	[kA]	Ik'' [deg]	Ip [kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]
R(1)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		1,71	7,41	-134,08	11,16	7,41	1,71
		C	0,11	0,47	180,00		1,71	7,41	45,92	11,16	7,41	1,71
NK1	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		1,71	7,41	-134,08	11,16	7,41	1,71
		C	0,11	0,47	180,00		1,71	7,41	45,92	11,16	7,41	1,71
RK23(1)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		1,71	7,41	-134,08	11,16	7,41	1,71
		C	0,11	0,47	180,00		1,71	7,41	45,92	11,16	7,41	1,71
RK21(1)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		1,71	7,41	-134,08	11,16	7,41	1,71
		C	0,11	0,47	180,00		1,71	7,41	45,92	11,16	7,41	1,71
RK24(1)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		1,71	7,41	-134,08	11,16	7,41	1,71
		C	0,11	0,47	180,00		1,71	7,41	45,92	11,16	7,41	1,71
RK16(1)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		0,77	3,33	-110,14	4,81	3,33	0,77
		C	0,11	0,47	180,00		0,77	3,33	69,86	4,81	3,33	0,77
RK14(1)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		0,93	4,02	-116,55	5,81	4,02	0,93
		C	0,11	0,47	180,00		0,93	4,02	63,45	5,81	4,02	0,93

Grid: NK1												
System Stage: NK1										Annex: / 5		
	rtd. V [kV]	Phase	[kV]	Voltage [p.u.]	[deg]	C-Factor	Sk'' [MVA]	[kA]	Ik'' [deg]	ip [kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]
RK15(2)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		1,71	7,41	-134,08	11,16	7,41	1,71
		C	0,11	0,47	180,00		1,71	7,41	45,92	11,16	7,41	1,71
RK25(4)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		1,71	7,41	-134,08	11,16	7,41	1,71
		C	0,11	0,47	180,00		1,71	7,41	45,92	11,16	7,41	1,71
RK13(2)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		1,71	7,41	-134,08	11,16	7,41	1,71
		C	0,11	0,47	180,00		1,71	7,41	45,92	11,16	7,41	1,71
RK22(1)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		0,66	2,85	-109,60	4,11	2,85	0,66
		C	0,11	0,47	180,00		0,66	2,85	70,40	4,11	2,85	0,66

DigSILENT PowerFactory 14.0.510 Project: Date: 4/16/2013

Fault Locations Short-Circuit Calculation according to IEC											
2-Phase Short-Circuit / Min. Short-Circuit Currents											
Asynchronous Motors Always Considered			Grid Identification Automatic				Short-Circuit Duration Break Time				0,40 s
			Conductor Temperature User Defined				c-Voltage Factor User Defined				1,00 s
			No								No

Grid: NK3												
System Stage: NK3										Annex: / 6		
	rtd. V [kV]	Phase	[kV]	Voltage [p.u.]	[deg]	C-Factor	Sk'' [MVA]	[kA]	Ik'' [deg]	ip [kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]
NK3	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		2,09	9,05	-146,07	14,72	9,05	2,09
		C	0,11	0,47	180,00		2,09	9,05	33,93	14,72	9,05	2,09
RK41(1)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		2,09	9,05	-146,07	14,72	9,05	2,09
		C	0,11	0,47	180,00		2,09	9,05	33,93	14,72	9,05	2,09
VJK10(1)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		2,09	9,05	-146,07	14,72	9,05	2,09
		C	0,11	0,47	180,00		2,09	9,05	33,93	14,72	9,05	2,09
RK31(1)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		2,09	9,05	-146,07	14,72	9,05	2,09
		C	0,11	0,47	180,00		2,09	9,05	33,93	14,72	9,05	2,09
KJK1(1)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		2,09	9,05	-146,07	14,72	9,05	2,09
		C	0,11	0,47	180,00		2,09	9,05	33,93	14,72	9,05	2,09
Atlas-compo ZT3	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		2,09	9,05	-146,07	14,72	9,05	2,09
		C	0,11	0,47	180,00		2,09	9,05	33,93	14,72	9,05	2,09
RK29(1)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		2,09	9,05	-146,07	14,72	9,05	2,09
		C	0,11	0,47	180,00		2,09	9,05	33,93	14,72	9,05	2,09

Grid: NK3												
System Stage: NK3										Annex: / 7		
	rtd. V [kV]	Phase	[kV]	Voltage [p.u.]	[deg]	C-Factor	Sk'' [MVA]	[kA]	Ik'' [deg]	ip [kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]
Pesukone(2)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		2,09	9,05	-146,07	14,72	9,05	2,09
		C	0,11	0,47	180,00		2,09	9,05	33,93	14,72	9,05	2,09
Pesukone(3)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		2,09	9,05	-146,07	14,72	9,05	2,09
		C	0,11	0,47	180,00		2,09	9,05	33,93	14,72	9,05	2,09
RK43(4)	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		2,09	9,05	-146,07	14,72	9,05	2,09
		C	0,11	0,47	180,00		2,09	9,05	33,93	14,72	9,05	2,09
LK1	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		1,40	6,08	-124,92	8,88	6,08	1,40
		C	0,11	0,47	180,00		1,40	6,08	55,08	8,88	6,08	1,40
RK42	0,40	A	0,22	0,95	-0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		B	0,11	0,47	180,00		1,98	8,55	-143,42	13,62	8,55	1,98
		C	0,11	0,47	180,00		1,98	8,55	36,58	13,62	8,55	1,98

Liite 1-Vaiheiset oikosulkuvirrat

1-Vaiheiset oikosulkuvirrat		Vanha muuntaja	Uusi muuntaja
Keskus	Sulake	Oikosulkuvirta (A)	Oikosulkuvirta (A)
PK	Katkaisija	8461,31	7537,80
Kenno7 (PK)	200A	7640,63	6879,53
Z=		0,03	0,03
Jätevesisiilo	35A	735,64	727,89
Tulityökontti	C32	866,09	855,36
Lauhd. Taajuusmuuttaja	C63	2231,56	2161,71
Pistorasia kaalivar. Typpisäil.	C63	2599,01	2504,75
UV-Ster.	C50	2388,50	2308,65
RK12	C50	581,03	576,18
NK1	400A	3748,45	3555,47
Z=		0,06	0,06
RK30	50A	2524,98	2435,92
RK23	63A	1947,58	1894,17
RK25	63A	1257,06	1234,59
RK24	50A	1712,28	1670,86
RK16	50A	1903,64	1852,58
Z=		0,12	0,12
KK20	25A	1598,97	1562,79
RK16.1	25A	1069,75	1053,43
RK14	125A	2102,09	2040,00
Z=		0,10	0,11
Sulatusruuvikeskus	63A	608,46	603,15
Leiju	63A	505,78	502,11
Pesukone	63A	1556,32	1522,02
RK13	100A	3540,48	3367,83
RK26	100A	1520,67	1487,91
RK15	50A	1109,56	1092,02
Z=		0,17	0,17
UPS	50A	704,25	697,14
R	35A	856,41	845,92
RK22	125A	1607,52	1570,96
Z=		0,14	0,14
RK22OK1	50A	1543,38	1509,64

1-Vaiheiset oikosulkuvirrat	Suoja	Vanha muuntaja	Uusi muuntaja
RK22M3	25A	463,64	460,55
Kompr.2	80A	2884,13	2768,52
KK1	400A	6965,08	6326,99
Z=		0,03	0,03
KK3	50A	2486,91	2400,47
Laatikkovarasto	80A	625,53	619,92
RK27	250A	3339,88	3185,81
Kompr.5	315A	7047,87	6395,23
RK17	250A	1947,93	1894,49
RK19	200A	2782,62	2674,85
Z=		0,08	0,08
Atlas-copco	200A	2552,45	2461,48
RK19.2	200A	2848,58	2741,17
Z=		0,08	0,08
S-OK1	25A	1864,45	1815,44
RK19.4	80A	1332,21	1306,99
RK12A	100A	5763,04	5319,17
Sininen varasto	63A	720,91	713,46
Z=		0,30	0,31
RK-01	63A	576,30	571,53
Asunto	63A	525,15	521,19
Arkisto	63A	453,28	450,33
Kaasukeskus	100A	1691,82	1651,36
RK20	250A	1972,09	1917,34
Z=		0,11	0,11
Panospuolen RK	C25	1189,45	1169,31
KK2	100A	2884,13	2768,52
Kompr. 1	80A	2884,13	2768,52
Glivet	250A	3568,59	3393,25
Kompr. 6	400A	6856,25	6237,06
RK21	200A	2687,69	2587,01
Z=		0,08	0,08
VSS	C50	1257,78	1235,28
RK11	C63	2654,52	2556,26
RK18	C63	552,45	548,06
PI-Kompr.	80A	902,19	890,55

1-Vaiheiset oikosulkuvirrat	Suoja	Vanha muuntaja	Uusi muuntaja
NK3	400A	4317,57	4063,53
Z=		0,05	0,05
2x50 kVAr	125A	3797,77	3599,81
RK41	200A	1998,23	1942,04
VJK10	160A	3764,85	3570,23
RK31	100A	3615,04	3435,22
KJK1	100A	883,53	872,37
LK1	35A	2994,15	2869,73
Z=		0,07	0,08
RK40	25A	749,10	741,07
Kompressori	100A	969,46	956,04
PRK	35A	1182,24	1162,34
PRK	35A	796,59	787,51
RK29	63A	796,59	787,51
Pesukone	35A	879,92	868,85
Pesukone	35A	879,92	868,85
RK42	125A	4022,31	3800,94
Z=		0,05	0,06
TK5-OK1	80A	1542,37	1508,68
RK43	80A	2524,84	2435,79
Z=		0,09	0,09
Nestekaasuhöyrytin	63A	641,25	635,35
2x50 kVAr	250A	7153,58	6482,15
75 kVAr	400A	7153,58	6482,15
4x40 kVAr	400A	7153,58	6482,15
Witermo	50A	1976,35	1921,37
Kompr. 3	80A	2884,13	2768,52
R02	63A	521,96	518,04