

Tommi Forsell

YLIAALTOJEN MUODOSTUMINEN JA NIISTÄ AIHEUTUVAT HAITAT

Opinnäytetyö
Sähkötekniikan koulutusohjelma


Toukokuu 2016




MAMK

University of Applied Sciences

KUVAILULEHTI

	Opinnäytetyön päivämäärä 9.5.2016
Tekijä(t) Tommi Forsell	Koulutusohjelma ja suuntautuminen Sähkövoimatekniikka
Nimeke Yliaaltojen muodostuminen ja niiden aiheuttamat haitat	
Tiivistelmä <p>Opinäytetyön tarkoituksena oli selvittää ja korjata kauppakeskuksessa olevan virtakiskojärjestelmän meluhaitta. Työ alkoi jakelujärjestelmän ominaisuuksien selvittämisestä sekä laaja-alaisista mittauksista jakelukiskon kulutuspisteissä sekä pääkeskuksella jakelukiskon syöttöpisteessä.</p> <p>Mittaustulosten tulkinnan jälkeen otin yhteyttä jakelukiskon valmistajaan, joka ilmoitti melun olevan samaa luokkaa heidän laboratoriossa saamien tulosten kanssa. Valmistajalta sain ohjeita meluhaitan poistamiseen. Melun syyksi ilmeni suuri määrä kolmatta yliaaltoa kiskon alkupäässä. Tämän jälkeen perehdyin kolmannen yliaallon muodostumiseen ja sitä tuottaviin komponentteihin ja laitteisiin. Koska yliaaltojen lähteitä ei ollut mahdollista poistaa tai vaihtaa toisiin, jäi jäljelle kaksi vaihtoehtoa: joko suodattaa yliaallot ennen kuin ne päätyvät jakelukiskoon tai muuttaa mekaanisesti jakelukiskon rakenne. Selvitetyssä suodattimien tarve sekä hinnat päädyimme tilaajan kanssa ratkaisuun, jossa muutimme jakelukiskon rakenteen siten, että kiskon meluisan alkupään kuormaa vähennetään jakamalla kisko kahdeksi noin yhtä suureksi osaksi.</p> <p>Korjaustyön toteutimme kahdessa osassa. Ensin vedimme uuden kaapelin kiskon alkupäästä kiskon puoleen väliin. Valmistelimme syötön haaroitukseen käytettävän katujakokaapin sekä päätimme uudet kaapelit siihen. Varsinaisen muutoksen jouduimme tekemään yöllä, koska kauppakeskus on avoinna joka päivä. Vaikkei itse yliaaltoja aiheuttaville komponenteille ei tehty muutoksia eikä tarkoitukseen soveltuvia suodattimia valittukaan mukaan korjaustyöhön, lopputulos saavutti tavoitteen meluntuoton lakattua. Lisäksi työn suunnitteluvaihe perehdytti minut hyvin sähköverkon häiriöihin, yliaaltoihin sekä energia-analysointia käytettiin ja mittausten analysointiin.</p>	
Asiasanat (avainsanat) Harmoniset yliaallot, kolmas yliaalto, viides yliaalto, aktiivisuodatin, loistehon kompensointi	
Sivumäärä 39	Kieli Suomi
Huomautus (huomautukset liitteistä)	
Ohjaavan opettajan nimi Arto Kohvakka	Opinnäytetyön toimeksiantaja Kauppakeskus Veturi, Ruokakesko OY Kouvolan jäähalli, Kouvolan kaupunki.

DESCRIPTION

 <p style="font-size: 24pt; font-weight: bold; margin: 0;">MAMK</p> <p style="margin: 0;">University of Applied Sciences</p>	<p>Date of the bachelor's thesis</p> <p>9.5.2016</p>
<p>Author(s)</p> <p>Tommi Forsell</p>	<p>Degree programme and option</p> <p>Electrical Engineering</p>
<p>Name of the bachelor's thesis</p> <p>Composition of harmonics and disadvantages resulting from harmonics.</p>	
<p>Abstract</p> <p>Goal of my thesis was to investigate and fix the mall busbar system noise problem. Work began settling the distribution system characteristics, as well as wide range measurements of the distribution of the rail consumption points as well as the main hub of the distribution of the rail supply point.</p> <p>After the interpretation of measurement results, I contacted the busbar manufacturer which announced noise in the same category with the results obtained by them in the laboratory. I received instructions from the manufacturer to noise reduction. Origins of noise revealed to be a large number of third harmonic of the rail front end. After this, I became familiar with the third harmonic formation and producing components and devices. Since the harmonic sources were not possible to remove or replace the other, there remained two alternatives. Filter the harmonics before they end up in to bushbar or change mechanically busbar structure. In order to determine the need for filters, as well as the prices, we ended up with the client solution where we moved to the busbar structure in such a way that the rail noisy upstream load be reduced by dividing rail in two approximately equal parts.</p> <p>We carried out the repair work in two parts. First, we pulled the new cable to the rail front end of the rail halfway. We prepared of the street distribution cabinet to be used to pass the branching, and we decided the new cables to it. Actual change we had to do at night since the center is open every day. Even if no changes were made harmonics causing components not suitable for the purpose filters selected all of the repair work, the end result achieved target rate of return after the expiration of noise. In addition, work-planning phase initiated me into the electric grid disturbances, harmonics, and energy analyzer for the measurement and analysis.</p>	
<p>Subject headings, (keywords)</p> <p>Harmonics, a third harmonic, fifth harmonic, active filter, reactive power compensation</p>	
<p>Pages</p> <p>39</p>	<p>Language</p> <p>Finnish</p>
<p>Remarks, notes on appendices</p>	
<p>Tutor</p> <p>Arto Kohvakka</p>	<p>Bachelor's thesis assigned by</p> <p>Kauppakeskus Veturi, Ruokakesko OY Kouvolan jäähalli, Kouvolan kaupunki.</p>

Sisällys

1	JOHDANTO.....	1
2	Tavoite.....	2
2.1	Suoritettut mittaukset	2
2.2	Mittaustulosten arviointi	7
3	MENETELMÄT	7
3.1	Kolmas yliaalto	7
3.1.1	Kolmannen yliaallon syntyminen.....	7
3.1.2	Melu	8
3.2	Vaihtoehtojen vertailu	9
3.2.1	Kompensointiparisto	9
3.2.2	Estokelaparisto	9
3.2.3	Yliaaltosuodatin, passiivinen	10
3.2.4	Aktiivisuodatin.....	11
3.2.5	Yliaaltoja tuottavat laitteet	11
3.2.6	Mekaaniset muutokset jakelukiskossa	12
4	TOTEUTUS	12
4.1	Esivalmistelut	12
4.2	Alkuperäiset syöttökaapelit.....	12
4.3	Uusi syöttökaapeli	14
4.4	Muutokset jakelukiskoon	15
4.5	Lopputulokset.....	17
5	KOMPENSOINTI VERKOSSA, JOSSA PALJON YLIAALTOJA	17
5.1	Mittaukset.....	17
5.2	Verkkoanalysointilaitteen asennus.....	22
5.3	Verkkoanalysointilaitteen mittaustulokset	25
5.4	Tekojään laitteisto	30
5.5	Kompensoinnin toiminta	32

5.6 Resonanssi.....	35
6 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	38
LÄHTEET.....	39

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön alkuosa keskittyy kauppakeskuksen sähköjakelujärjestelmässä olleeseen ongelmaan, joka aiheutti meluhaittaa. Myymälöiden henkilökunta ja asiakkaat häiriintyivät matalasta hurinasta, jonka jakelukisko aiheutti.

Kauppakeskus Veturi, joka sijaitsee Kouvolassa, on Kaakkois-Suomen suurin ostoskeskus (kuva 1). Kauppakeskuksen pinta-ala on 48000 neliometriä. Kauppakeskuksen rakennutti Ruokakesko. Työmaa aloitettiin vuoden 2010 lopulla ja Veturi avattiin 15.9.2012.



KUVA 1. Ilmakuva kauppakeskuksesta

Työn tarkoitus on selvittää jakelukisko JAK 2.1:n aiheuttamat meluhaitat ja löytää siihen korjauskeino. Virtakiskon kaksi ensimmäistä viiden metrin osaa vaihdettiin pian avajaisten jälkeen, mutta se ei poistanut meluongelmaa. Kyseinen jakelukisko jakaa sähköä kymmenelle liiketilalle. Kiskon nimellisvirta on 400A, ja sitä syötetään pääkeskukselta kahdella AMCMK 4x240+90Cu-kaapelilla. Meluhaitta oli suurin kiskon alkupäässä, heti liitoskohdan jälkeen. Kiskon kuormitus putoaa pienemmäksi jo-

kaisen myymälän syöttörasian jälkeen, kun osa kuormasta päätyy myymälän keskukseen. Kiskon hurina pienenee samalla, kun kisko kuorma vähenee.

2 TAVOITE

Työn tavoite on saada jakelukiskosta aiheutuva melu pienemmäksi tai poistettua kokonaan. Ensimmäinen tehtävä on suorittaa jakelukiskon alueella energia-analysointimittaukset. Melun alkuperän arveltiin johtuvan verkossa olevista häiriöistä ja tämän selvitin mittauksin.

2.1 Suoritetut mittaukset

Pääkeskuksessa kiskon sähkölähdössä on energiamittari, jolla kiskon kulutus ja vaihevirratt mitataan. Tämän lisäksi mitattiin Metrel MI-2792-energia-analysointilaitteella syötön arvot sekä pääkeskukselta että myymälöiden ryhmäkeskuksilta. Kiskon lähdöstä mitattiin virrat kultakin vaiheelta sekä nollajohtimesta. Myös kiskon THD-arvot mitattiin. Samat mittaukset tehtiin liiketilojen ryhmäkeskuksilla. Kymmenestä keskuksista mitattiin kuusi, mittaamatta jätettiin tyhjä liiketila sekä Change, Alkon aluetoimisto ja Aptual-niminen ohjelmatoimisto, koska ne ovat kulutukseltaan pienet muihin tiloihin nähden eikä niiden vaikutus kiskon kulutukseen ole kuin marginaalinen. Kiskosta sähkönsä saavat seuraavat liikkeet alkaen kiskon alusta: Alkon aluetoimisto, Aptual, Zatza, Change, Lehto, Cubus, H&M, Seppälä, KappAhl ja tyhjä liiketila. Tehollisesti ja pinta-alallisesti suurin liike on H&M 47kW kuormalla.



KUVA 2. Mittauskytkentä pääkeskuksella

TAULUKKO 1. Jakelukisko JAK 2.1

Suure	Yksikkö	L1	L2	L3	N
U	V	236,5	238	238,7	0,5
I	A	254,01	211,89	188,46	106,26
THD U	%	3,1781	3,001	2,947	225,23
THD I	%	15,495	14,909	15,26	148,72
P	kW	58,567	49,307	43,602	Yht 151,48

TAULUKKO 2. Ryhmäkeskus 2.23 Zatta

Suure	Yksikkö	L1	L2	L3	N
U	V	231,6	235,8	236,9	2,6
I	A	20,268	20,643	14,358	8,298
THD U	%	3,7759	3,5277	3,3506	198,87
THD I	%	8,7397	8,312	7,9332	2,3406
P	kW	4,611	4,8093	3,3782	Yht 12,799

TAULUKKO 3. Ryhmäkeskus 2.26 Lehto

Suure	Yksikkö	L1	L2	L3	N
U	V	231,3	236,8	236,9	3,1
I	A	50,73	34,47	34,68	20,004
THD U	%	4,1262	3,6927	3,6965	204,22
THD I	%	19,405	11,769	10,511	109,14
P	kW	11,317	7,9818	7,7751	Yht 27,074

TAULUKKO 4. Ryhmäkeskus 2.27 Cubus

Suure	Yksikkö	L1	L2	L3	N
U	V	230,8	237,2	236,5	3,4
I	A	23,685	12,915	16,851	11,964
THD U	%	4,5405	4,0877	3,5598	189,13
THD I	%	12,777	21,331	12,919	79,629
P	kW	5,3459	2,9276	3,8426	Yht 12,116

TAULUKKO 5. Ryhmäkeskus 2.28 H&M

Suure	Yksikkö	L1	L2	L3	N
U	V	229,7	237,1	236,7	4,4
I	A	77,64	63,96	68,07	38,97
THD U	%	5,0563	5,1623	4,3457	203,4
THD I	%	18,679	19,159	21,218	312,09
P	kW	17,052	14,458	15,13	Yht 46,64

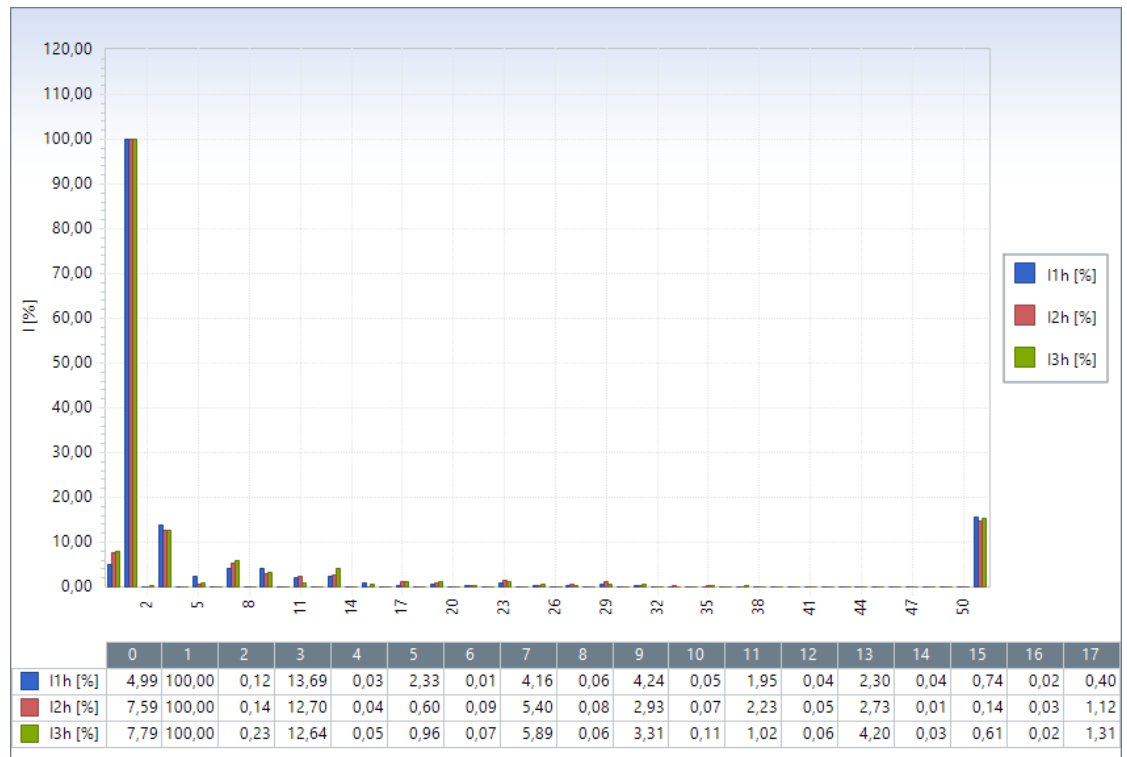
TAULUKKO 6. Ryhmäkeskus 2.32 Seppälä

Suure	Yksikkö	L1	L2	L3	N
U	V	230	237,5	237,2	4,3
I	A	31,977	26,112	26,22	7,332
THD U	%	5,382	5,0269	4,3569	210,5
THD I	%	9,55	10,092	8,1011	60,249
P	kW	7,253	6,0361	6,1121	Yht 19,401

TAULUKKO 7. Ryhmäkeskus 2.1 Kappahl

Suure	Yksikkö	L1	L2	L3	N
U	V	230,6	237,6	237,5	4,5
I	A	35,028	36,33	29,148	18,72
THD U	%	5,6061	5,1727	4,3503	231,85
THD I	%	18,46	20,484	21,062	265,23
P	kW	7,6819	8,1747	6,5681	Yht 22,425

Taulukkoihin on merkitty virrat ja jännitteet kullekin vaiheelle, nollajohtimen virta ja nollajohtimen jännite suojamaata vasten, harmonisten yliaaltojen aiheuttama jännite- ja virtasärö prosentteina sekä tehot vaihetta kohti että vaihetehtojen summa. Energia-analysointori antaa näiden suureiden lisäksi kymmeniä muitakin mittaustuloksia, mutta jätin ne pois työhön kuulumattomina. Palkkidiagrammi (kaavio 1) osoittaa JAK 2.1 -kiskon harmonisten yliaaltojen jakauman. Siitä näkee, että kolmatta yliaaltoa on prosentuaalisesti eniten.



KAAVIO 1. Jakelukisko JAK 2.1, harmonisten yliaaltojen jakauma

2.2 Mittaustulosten arviointi

Meluhaitan vähentämiseksi tai poistamiseksi on olemassa muutamia vaihtoehtoja:

- yliaaltoja tuottavien laitteiden (pääasiassa valaisimien) vaihto
- yliaaltojen suodatus
- kiskon vaihto nimellisvirraltaan suurempaan
- kiskon syöttöpisteen muutos keskelle kiskoa
- kiskon jakaminen kahteen osaan.

3 MENETELMÄT

Tuloksista huomataan, että nollavirta yleisesti on suuri suhteessa vaihevirtoihin nähden, vaikka kuorma olisi melko tasainen vaiheiden välillä. Samalla jännite-ero nolla- ja suojajohtimen välillä on useita voltteja. Tämä voidaan selittää kolmannen yliaallon tuomalla virrannousulla nolla-johtimessa.

3.1 Kolmas yliaalto

Kaikki vaihtovirralla tarkoitetut sähkölaitteet on suunniteltu ja mitoitettu käytettäväksi jännitteelle, jonka sinikäyrä on puhdas ja tasainen. Nykypäivän verkoissa tällainen käyrä on kuitenkin erittäin epätavallinen. Yliaallot aiheuttavat siniaaltoon vääristymiä, mikä taas aiheuttaa rasituksia ja häiriöitä verkkoon kytketyille laitteille.

3.1.1 Kolmannen yliaallon syntyminen

Mm. purkauslamppujen, tietokoneiden ja muiden elektronisten laitteiden lisääntyminen jokapäiväisessä käytössä aiheuttaa sekä sähköverkolle että laitteistoille ylimääräisiä ongelmia. Näiden kolmatta yliaaltoa tuottavien ns. epälineaaristen laitteiden käyttö lisääntyy jatkuvasti, joten myös ongelmat sähköverkoissa lisääntyvät koko ajan. Epälineaarinen kuormitus generoi sijaiskytkennässä 150 Hz:n yliaaltovirran

verkkoon. Kolmas yliaalto voi aiheuttaa nollajohtimeen jopa suuremman virran kuin mikä vaihejohtimissa kulkee. Symmetrisissä kuormituksissa, jolloin kaikki kolme vaihetta ovat tasaisesti kuormitetut, ei nollajohtimessa kulje virtaa. Jos verkossa on kolmansia yliaaltoja, ne esiintyvät kuitenkin myös nollajohtimessa. Kolmas yliaalto on kolmivaihejärjestelmän kaikissa vaiheissa samanvaiheisena, ja näin ollen niiden aiheuttama virta summautuu nollajohtimeen. Niinpä nollajohtimessa kulkeekin kolme kertaa suurempi 150 Hz virta kuin vaihejohtimissa. Kaikki purkauslamput, kuten esim. loisteputket, elohopeahöyrylamput, suurpainenatriumlamput, monimetallilamput, halogeenilamput ja PL-lamput aiheuttavat yliaaltoja. Purkauslamppuvalaisimien yhteydessä voivat vaihejohtimissa kulkevat yliaallot kohota jopa 30 %:iin vaihevirrasta, mikä merkitsee sitä, että kuormitus nollajohtimessa on $3 \times 30\%$ eli 0,9 kertaa vaihevirta. Tietokoneet ovat tehojen mitoituksen kannalta erittäin vaikeita. Tietokoneen ottama virta on hyvin epälineaarinen ja virtalähteen ottama käynnistysvirta on jopa 20-kertainen nimellisvirtaan nähden. Lisäksi tietokone asettaa suuret laatuvaatimukset käyttämälleen sähkölle. Tietokoneen sisäiset piirit toimivat tasasähköllä, jonka ne saavat oman virtalähteensä hakkuriteholähteestä. Tasasähkö muodostetaan yhdestä vaiheesta tasasuuntaamalla. Tasasuuntauksen vuoksi tietokoneen ottama virran aaltomuoto poikkeaa paljon sinimuotoisesta. Tämän kaltainen epälineaarinen virta sisältää vain vähän perusaaltoa, mutta erittäin paljon harmonisia komponentteja.

3.1.2 Melu

Mittauksissa huomattiin, että kiskossa on paljon harmonista säröä. Särö on suurimmalta osalta kolmannessa yliaallossa (150 Hz) ja tuottaa yhdessä verkon taajuuden kanssa 200Hz:n hurinan kiskon ympäristöön. Mitattu arvo 15 cm päästä oli 58 desibeliä. Meluhaitta oli suurin Lehdon vaatekaupassa, jossa asiakastila ulottuu kiskon alle. Muissa myymälöissä kisko kulkee varastojen ja taukotilojen yllä, eikä asiakkaille aiheutunut haittaa. Mittauksista todettiin, että kisko ei ole tehollisesti ylikuormitettu, mutta myymälöiden epälineaariset kuormat aiheuttavat kiskoon harmonisia yliaaltoja ja sitä kautta kiskoon hurinaa. Myymälöiden kuormat koostuu pääasiassa valaistuksesta. Kaupakeskuksen suunnittelussa on lähdetty siitä että energiatehottomia valaisimia ei käy-

tetä. Halogeeni- ja hehkulamppuvalaisimia ei kohteessa ole, vaan kaikki valaistus on loisteputki- tai monimetallivalaisimia sekä joissain kohteissa led-valaisimia. Vanhan mallisia kuristimia ei valaisimissa ole, vaan liitälaitteet ovat elektronisia. Myös elektroninen liitälaitte tuottaa kolmannen yliaallon harmonista säröä. Tiedusteltaessa kiskon valmistajalta melusta heidän laboratoriossa saamansa arvot vastasivat kaupakeskuksessa mitattuja. Kiskon melu ei siis ole vika vaan ominaisuus kyseisellä kuormalla. Myöskään kiskon vahingoittumisen vaaraa ei valmistajan mukaan ole.

3.2 Vaihtoehtojen vertailu

On olemassa erilaisia laitteita, joilla yliaaltoja voidaan suodattaa. Niiden ominaisuudet, toiminta ja kyky suodattaa yliaaltoja vaihtelee.

3.2.1 Kompensointiparisto

Jos yliaaltoja tuottavan kuorman osuus kokonaistehosta on alle 20 %, voidaan käyttää normaalia kondensaattoriparistoa. Jos yliaaltojen osuus kasvaa, voi se aiheuttaa ongelmia kompensointipariston toiminnalle. Yliaalto-ongelmat voivat ilmetä kompensointikondensaattorien rinnakkaisresonansseina. Kondensaattorin reaktanssi pienenee taajuuden kasvaessa, jolloin suuritaajuiset yliaallot vahvistuvat suhteessa eniten. Yliaallot aiheuttavat lämpöhäviöitä ja vaikeuttavat perustaajuudella tapahtuvaa loistehon kompensointia. Ylikuumeneminen lyhentää laitteiston elinikää. (Korpinen 2008)

3.2.2 Estokelaparisto

Estokelaparistossa kukin porraskoostuu kontaktorista, kondensaattorista sekä kuristimesta. Kondensaattorin ja kuristimen viritystaajuus valitaan siten, että se on matalampi kuin alin verkossa esiintyvä yliaalto. Kyseisen portaan alapuolella porraskoostumus on kapasitiivinen, jolloin se tuottaa kompensoititehoa. Viritystaajuuden yläpuolella porraskoostumus on induktiivinen, jolloin se ei voi resonoida tyypillisillä yliaaltotaajuuksilla. Yleisimmät

viritystaajuuDET ovat 141 Hz ja 189 Hz. Kuitenkaan estokelaparistot eivät vaimenna yliaaltoja merkittävästi. Estokelaparisto sopii hyvin kohteeseen, jossa on vähän yliaaltolähteitä mutta paljon loistehoa. (Korpinen 2008.)

3.2.3 Yliaaltosuodatin, passiivinen

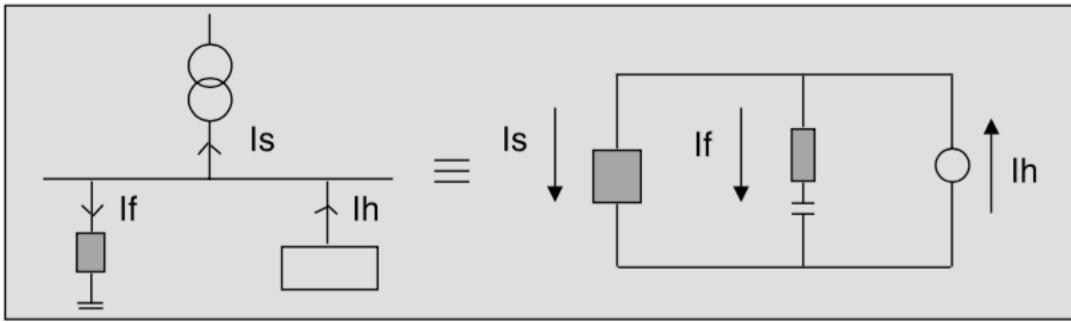
Passiivisuodatus on menetelmä, jolla yliaaltoja voidaan vähentää laitoksessa silloin, kun yliaaltosärö on lisääntynyt vähitellen. Suodatusta voidaan myös käyttää uuden laitoksen kokonaisratkaisuna. Passiivisia suodattimia kutsutaan myös imupiireiksi. Imupiirit ovat sarjaresonanssiipiirejä, jotka muodostavat tietyn taajuiselle yliaaltovirralle pieni-impedanssisen sulkeutumistien. Yksinkertaisin suodatin on yhdelle taajuudelle viritetty imupiiri. Suodattimen resonanssitaajuus pyritään mitoittamaan mahdollisimman lähelle poistettavan yliaallon taajuutta. Kondensaattorin kapasitanssin määrää yleensä tarvittava perustaajuinen kompensointiteho.

Kaksoisviritetyllä suodattimella voidaan poistaa kaksi eri yliaaltoa yhtä aikaa. Vielä kolmannen kertaluvun suodattimet ovat järkeviä toteuttaa. Mikäli suodatettavia yliaaltoja on vielä enemmän, kannattaa valita laajakaistainen suodatin. Laajakaistaisia suodattimia on useita eri tyyppisiä. Periaatteeltaan ne ovat ylipäästösuo-dattimia.

Jos suodatettavia yliaaltoja on paljon, on taloudellisinta virittää suodatin kullekin pienelle taajuudelle erikseen ja suuritaajuuksisille yliaalloille oma laajakaistainen suodatin.

Yhdelle taajuudelle viritetyn passiivisuotimen periaate näkyy kuvassa 3. Tätä suodinta tulisi käyttää pienimmässä yliaaltokomponentissa, jos järjestelmässä generoituu huomattavasti yliaaltoja. Myymälöiden ja kauppakeskusten kuormitusjärjestelmissä pienin yliaaltokomponentti olisi todennäköisesti 3. yliaalto. Viritetyn taajuuden yläpuolella yliaallot vaimenevat, kun taas alapuolella ne saattavat vahvistua.

Tällainen suodin koostuu kuristimesta, joka on kytketty rinnan kondensaattorin kanssa. Passiivisuotimen paras sijainti on lähellä yliaaltoja synnyttäviä kuormia. (ABB 2001.)



KUVA 3. Yhdelle taajuudelle viritetty passiivisuodin

3.2.4 Aktiivisuodatin

Aktiivisuodatin on puolijohdekomponenteilla toteutettu säädettävä yliaaltovirtalähde. Se syöttää verkkoon yliaaltoja, jotka ovat vastakkaisessa vaiheessa verkon yliaaltoihin nähden siten, että yliaallot kumoavat toisensa. Aktiivisuodattimessa on monia etuja perinteisiin LC-suodattimiin verrattuna. Se suodattaa tehokkaasti taajuudeltaan ja suuruudeltaan muuttavat yliaallot, yksi suodatin kykenee suodattamaan useita yliaaltoja ja sillä on nopea vasteaika ja pieni tilantarve. Suodatin kytketään yleensä kuorman rinnalle. Suurin este aktiivisuodattimien yleistymiselle on korkea hinta ja suuret häviöt. (ABB 2001.)

Yliaaltojen suodatus kiskon lähdössä ei auta kuin pääkeskusta eikä pääkeskuksen muissa jakeluissa ole ongelmia yliaalloista. Suodatus pitää tässä tapauksessa tehdä kullakin ryhmäkeskuksella ja suodattimet ovat kalliita. 30A - 80A suodattimien hinnat ovat 13000-20000 euron luokkaa.

3.2.5 Yliaaltoja tuottavat laitteet

Valaisimia on jakelukiskon alueella noin 3000 kpl, joten valaisimien vaihto ei ollut järkevä vaihtoehto. Toinen suuri yliaaltojen lähde ovat tietokoneet. Myymälöiden kassajärjestelmät perustuvat pääasiassa tietokonepohjaisiin järjestelmiin eikä niiden vaihtamista edes harkittu.

3.2.6 Mekaaniset muutokset jakelukiskossa

Kiskokoon kasvatus seuraavaan kokoon (400A->630A) olisi ollut kallista ja aikaa vievää. Kiskoa on noin 150 metriä, eikä sen vaihto suurempaan olisi taannut meluhaittan poistumista. Mikäli kiskon syöttörasian olisi rakentanut keskelle kiskoa, kiskon ottama virta olisi jakaantunut kahteen suuntaan. Keskisyöttörasia vie metrin kiskon mitasta, joten syöttörasian lisäksi yksi metrin lyhyempi kisko olisi tarvittu muutostyöhön. Kiskon jako kahteen osaan osoittautui kustannustehokkaimmaksi sekä työajallisesti järkevimmäksi.

4 TOTEUTUS

Kauppakeskus on auki joka päivä, ja se aiheutti työlle aikataulullisen ongelman. Päädymme aikatauluun, jossa työ aloitetaan lauantaina sulkemisajan jälkeen klo18:00. Kauppakeskus aukeaa sunnuntaisin klo 12, joten työaikaa saatiin lähes 18 tuntia.

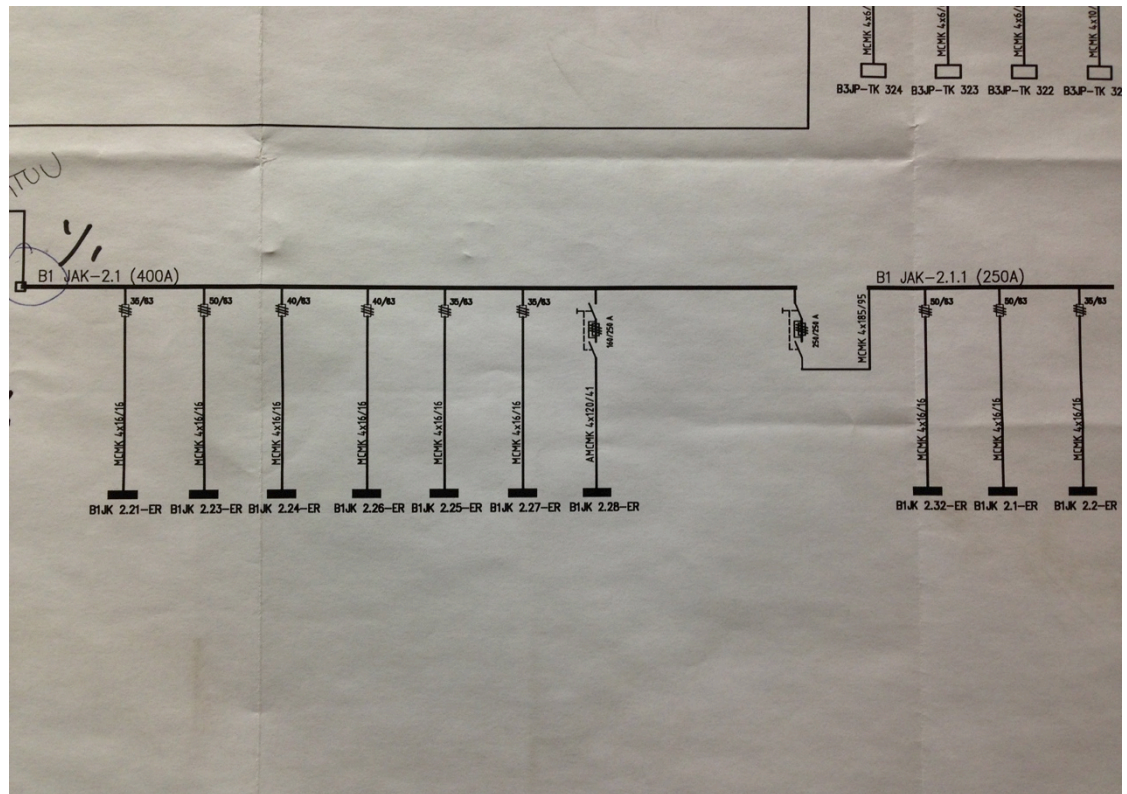
4.1 Esivalmistelut

Kiskon jakelun alueella on ohjelmistotoimisto, jonka serverit ja modeemit eivät saa jäädä ilman sähköä. Niille vedettiin väliaikainen syöttö kiinteistön varavoimalla varmennetusta keskuksesta. Serverit on varustettu UPS-laitteistolla, ja sen kapasiteetti kestää vain tunnin sähkökatkon. Sähkönjakelun katkos oli oman arviomme mukaan n. 10 tuntia. Lisäksi ilmoitimme etukäteen sähkökatkosta kaikille toimijoille, joilta sähköt työn ajaksi katkeaa. Suurta haittaa ei käyttäjille tullut, koska tilat ovat toimistoja ja myymälöitä, joissa ei öisin ole sähkönkulutusta, pois lukien ohjelmistotoimisto.

4.2 Alkuperäiset syöttökaapelit

Kiskon syöttökaapelit (AMCMK 2x4x240+90Cu) katkaistiin n. kymmenen metrin päästä virtakiskon syöttörasialta. Nämä kymmenen metrin kaapelin päät käännettiin

630 ampeerin nimellisvirran katujakokaappiin, joka sijoitettiin huoltokäytävälle kiskon alkupään läheisyyteen. Katkaistut syöttökaapelit jatkettiin yltämään katujakokaapille. Syöttökaapelit katkaistiin ja jatkettiin Zatzan tiloissa. Työ tehtiin kaapelihyllyllä henkilönostinta apuna käyttäen. Katujakokaappiin asennettiin kiskoliittimet, joihin edellä mainitut kaapelit kytkettiin.



KUVA 4. JAK 2.1:n jakelujärjestelmän pääkaavio (alkuperäinen)



KUVA 5. Virtakiskon alkuperäinen syöttörasia

4.3 Uusi syöttökaapeli

Katujakokaappiin asennettiin kahvavarokelähtö, johon kiskon loppuosan syöttökaapeli kytkettiin. Mittauksien perusteella päädyttiin 200A sulakekokoon ja AMCMK 4x240+72Cu-kaapeliin kiskon loppuosan syötöksi.



KUVA 6. Uusi katujakokaappi huoltotasolla

4.4 Muutokset jakelukiskoon

Kisko katkaistiin noin puolesta välistä. Kiskon alkupäähän jäi kuusi liiketilaa, loppuosaan neljä. Kuitenkin sähkön kulutuksen suhteen loppuosa on suurempi. Fyysisesti kiskon jakaminen tasaisesti kahteen yhtä suureen sähköteholliseen osaan oli mahdollonta, koska suurin sähkönkulutus on H&M:n vaatekauppa. Se sijaitsee kuorman suhteen tarkasteltuna juuri kiskon puolivälissä. Työn tarkoituksen kannalta oli parempi, että suurempi kulutus jäi kiskon loppuosaan, koska siellä kisko ei tule ollenkaan asiakkaiden nähtäville, vaan on alas lasketun katon yläpuolella tai varastotiloissa. Kiskosta poistettiin yksi viiden metrin osa ja katkaisukohtaan asennettiin loppupääte. Katkaisukohtaan toiseen päähän asennettiin uusi syöttörasia, johon uusi syöttökaapeli kytkettiin. Työ suoritettiin Cubuksen takatiloissa, ja Cubuksen ryhmäkeskuksen syöttörasia siirrettiin muutaman metrin verran sivuun alkuperäisestä paikasta lähemmäs kiskon lähtöä ollen kiskon alkuosan viimeinen kulutuspiste.



KUVA 7. Poistettu kiskon osa ja uusi loppupäätte Cubuksen takatilassa



KUVA 8. Uusi syöttörasia

4.5 Lopputulos

Työ saatiin suoritettua aikataulussa ja haluttu lopputulos saavutettiin. Kiskon alkupään kuormitus putosi alle puoleen ja meluhaitta katosi kokonaan. Loppupään osalle jäi pieni hurina, joka kuuluu aivan kiskon läheisyydessä eikä häiritse myymälöiden henkilökuntaa eikä asiakkaita.

5 KOMPENSOINTI VERKOSSA, JOSSA PALJON YLIAALTOJA

Tarkastelussa oleva Nokian kompensointiparisto sijaitsee Kouvolan jäähallissa ja on nimellisarvoiltaan seuraava:

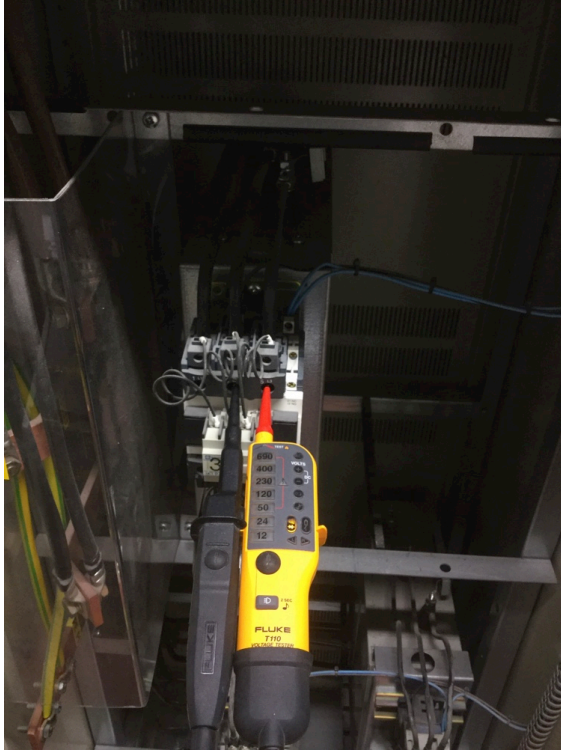
100 kVAr, 400V, 50Hz, 145A. Portaat 25+25+50 kVAr.

Portaiden nimellisarvot ovat silloin:

- 25 kVAr, 36A ja 250,7 μ F (mitattuna kahden vaiheen välistä)
- 50 kVAr, 72A ja 501,4 μ F (mitattuna kahden vaiheen välistä)

5.1 Mittaukset

Mittasin kondensaattorien kunnon (kapasitanssin) Fluke 43-mittarilla. Sitä ennen tarkistin jännitesterillä että kondensaattorit ovat jännitteettömät.



KUVA 9. Jännitteen mittaus kondensaattorilta



KUVA 10. Kapasitanssin mittaus

TAULUKKO 8. Kapasitanssien arvot

	L1-L2	L1-L3	L2-L3	Nimellinen
C1	246,4 μF	246,5 μF	246,5 μF	250,7 μF
C2	246,5 μF	246,5 μF	246,5 μF	250,7 μF
C3	494,0 μF	492,3 μF	493,0 μF	501,4 μF

Mittauksista voidaan todeta, että kondensaattorit ovat hyväkuntoiset, kapasitanssi ei ole merkittävästi pudonnut nimellisarvoihin nähden.

Seuraavaksi mittasin kaikkien portaiden ottamat virrat pihtiampeerimittarilla.



KUVA 11. Virran mittaus kondensaattorilta

TAULUKKO 9. Kompensoinnin ottama virta, kun pääkeskuksen virta on 400A

	L1	L2	L3
C1	38,5A	38,4A	38,5A
C2	38,4A	37,9A	38,0A
C3	76,0A	76,1A	76,2A

Tässä vaiheessa havaitsin, että pääkeskuksen ottaman virran noustessa nousee myös kondensaattorien ottama virta. Edellisen mittauksen suoritin vaihevirran ollessa noin 400 ampeeria. Seuraavan mittauksen tein, kun vaihevirta oli noin 600 ampeeria.

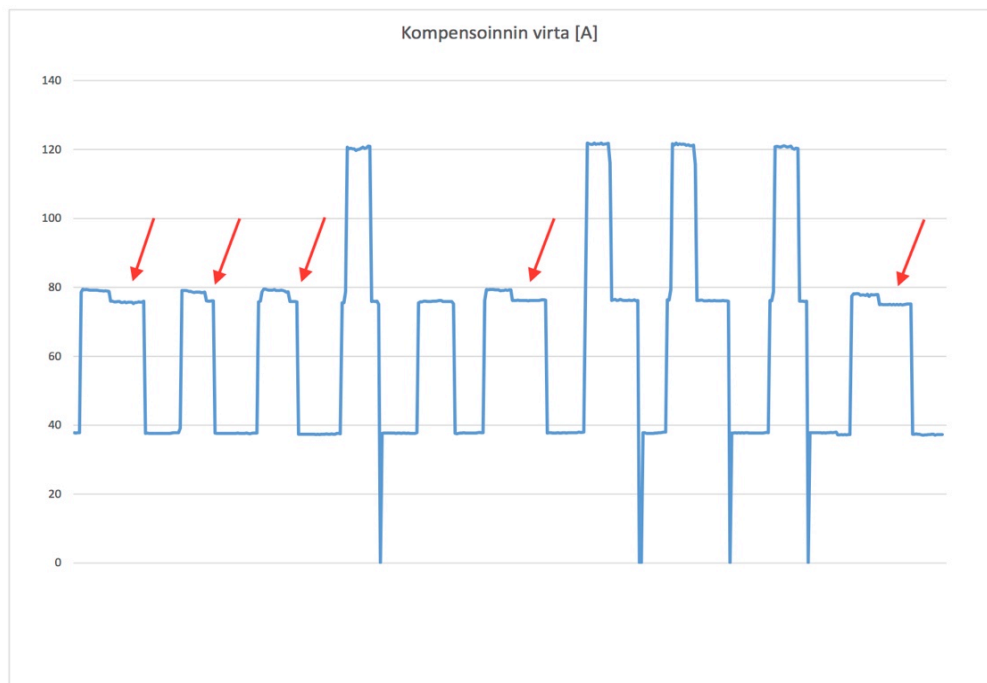
TAULUKKO 10. Kompensoinnin ottama virta, kun pääkeskuksen virta on 600A

	L1	L2	L3
C1	40,2A	40,2A	40,3A
C2	40,1A	39,6A	39,9A
C3	80,1A	80,3A	80,4A

Seuraavaksi asetin pihtivirtamittarit kompensointipariston lähtöön kaikille vaiheille. Pihdit ovat mallia Fluke CNXi3000, ja niissä on mahdollisuus datan loggaukselle. Jätin loggauksen päälle vuorokauden ajaksi. Tällä mittauksella saadaan virrasta kuvaa- ja ajan suhteessa. Mittari luo Excel-yhteensopivan CSV-tiedoston, josta löytyy virran arvot (min, max, average) ja ajanhetki kullekin tiedolle.



KUVA 12. Kompensoinnin lähdön virtamittaus

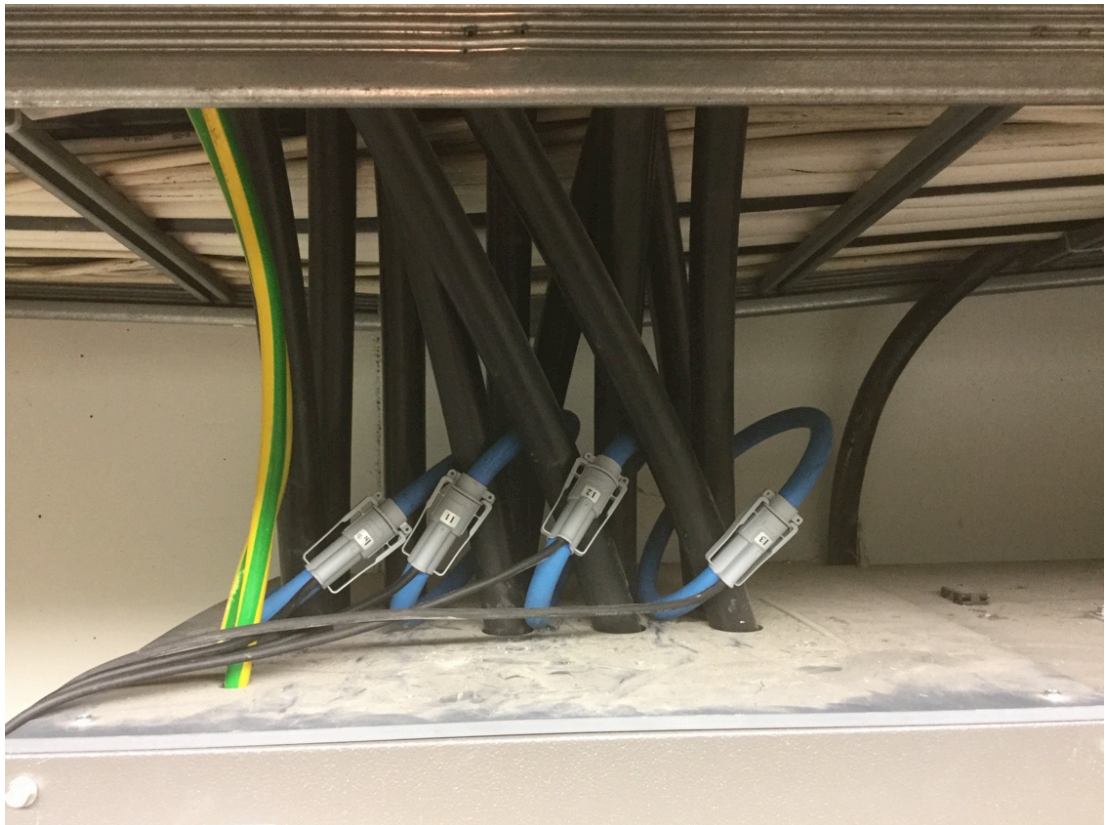


KUVA 13. Kompensoinnin ottama virta

Purin loggereiden mittaama datan ja tein Excelillä siitä kuvaajan. Käytin ykkösvaiheen tuloksia suurimman virran takia. Kuvaajasta huomataan erikoinen virran muutos, jonka olen merkinnyt punaisilla nuolilla. Virta putoaa noin viisi ampeeria, vaikka kompensoinnin pitäisi pysyä vakiotehoisenä. Näin tapahtuu ajoittain, enintään kerran tunnissa.

5.2 Verkkoanalysaattorin asennus

Seuraavaksi asensin verkkoanalysaattorin keskuksen syöttöön. Käytössäni on Metrelin malli MI-2892. Keskusta syöttävä muuntaja sijaitsee pääkeskustilan viereisessä tilassa ja syöttö on toteutettu yksijohdinjärjestelmällä. Tämä mahdollisti helpon ja turvallisen asennuksen virtasilmukoille.



KUVA 14. Virtasilmukat keskuksen päällä

Virtasilmukoiden lisäksi mittari tarvitsee jännitetiedot, ne otin hauenleuoilla mittauskentästä. Mittariin kytketään kaikkiaan neljä virtasilmukkaa (kolme vaihetta ja nolla) ja jännitemittaus kullekin vaiheelle sekä nolla ja suojamaa.

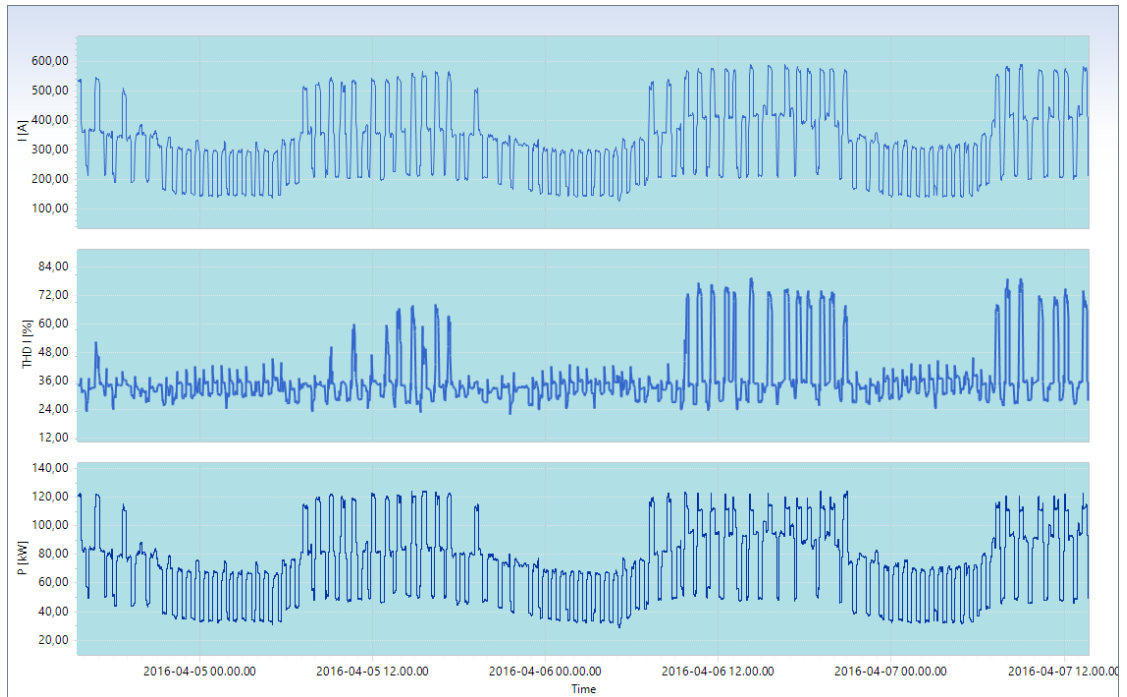


KUVA 15. Analysaattorin jännitemittaukset



KUVA 16. Analysaattori kytkettynä

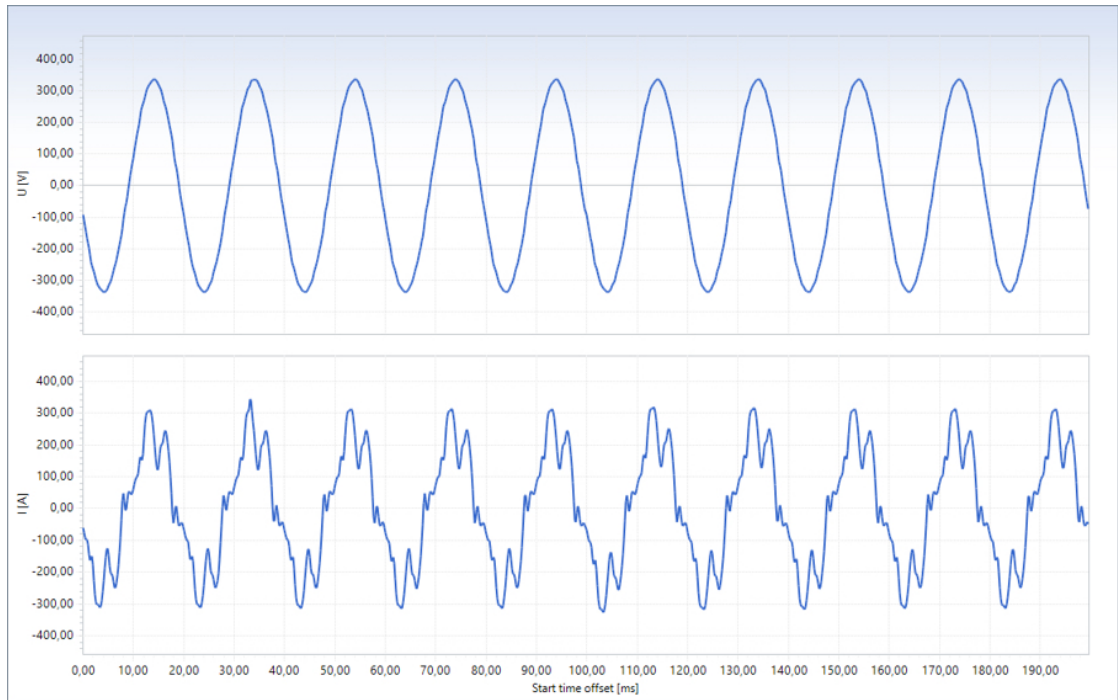
5.3 Verkkoanalysaattorin mittaustulokset



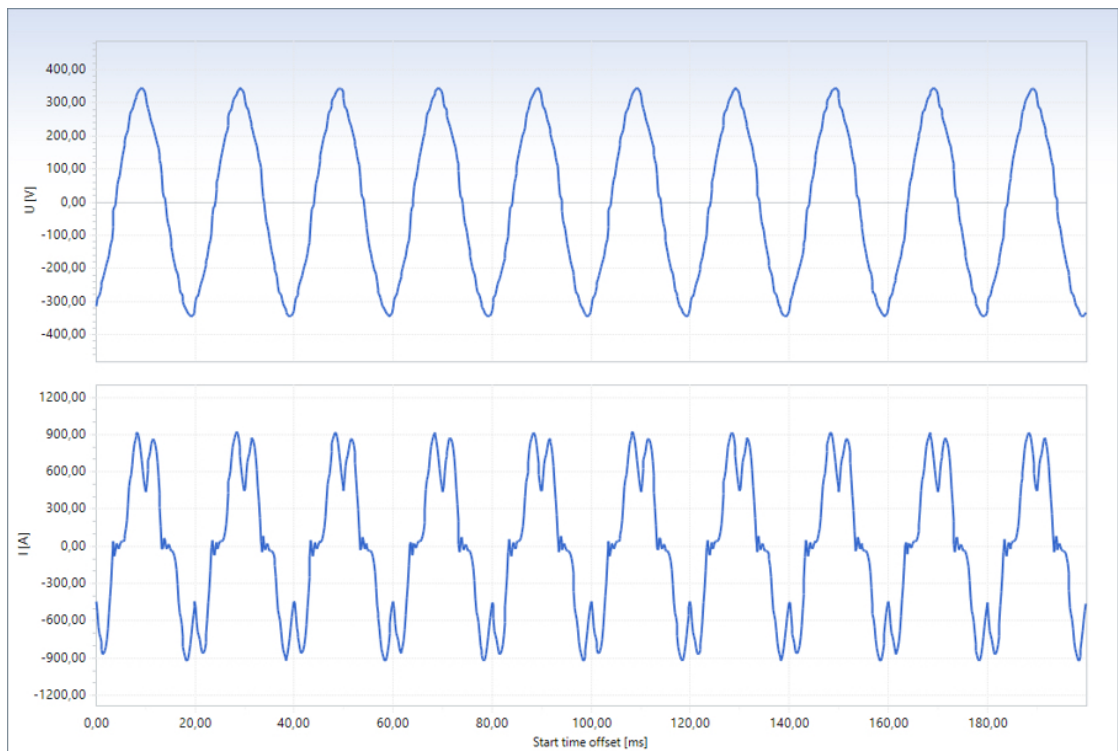
KUVA 17. Virran, virtasärön ja tehon kuvaajat

Yllä olevassa kuvassa on analysaattorin loggaus noin kolmen päivän ajalta. Kuvasta voidaan havaita, että kerran tunnissa, pois lukien yöt, virtasärö nousee suureksi samalla, kun jäähallin teho nousee. Kun vertasin ajanhetkiä kompensoinnin ottaman virran ja jäähallin tehon muutoksen suhteen, havaitsin että kuvan 13 virran putoaminen ajoittuu samaan hetkeen kun jäähallin kokonaisteho putoaa. Suurinta vaihtelua tehoon aiheuttaa tekojään kompressorit.

Seuraavissa kuvissa on kymmenen jakson (200ms) ajalta jännitteen sekä virran kuvaajat. Kuvassa 18 keskuksen ottama virta on noin 200A ja kuvassa 19 noin 600A.



KUVA 18. Pääkeskuksen virta 200A, pätöteho 130kW



KUVA 19. Pääkeskuksen virta 600A, pätöteho 380kW

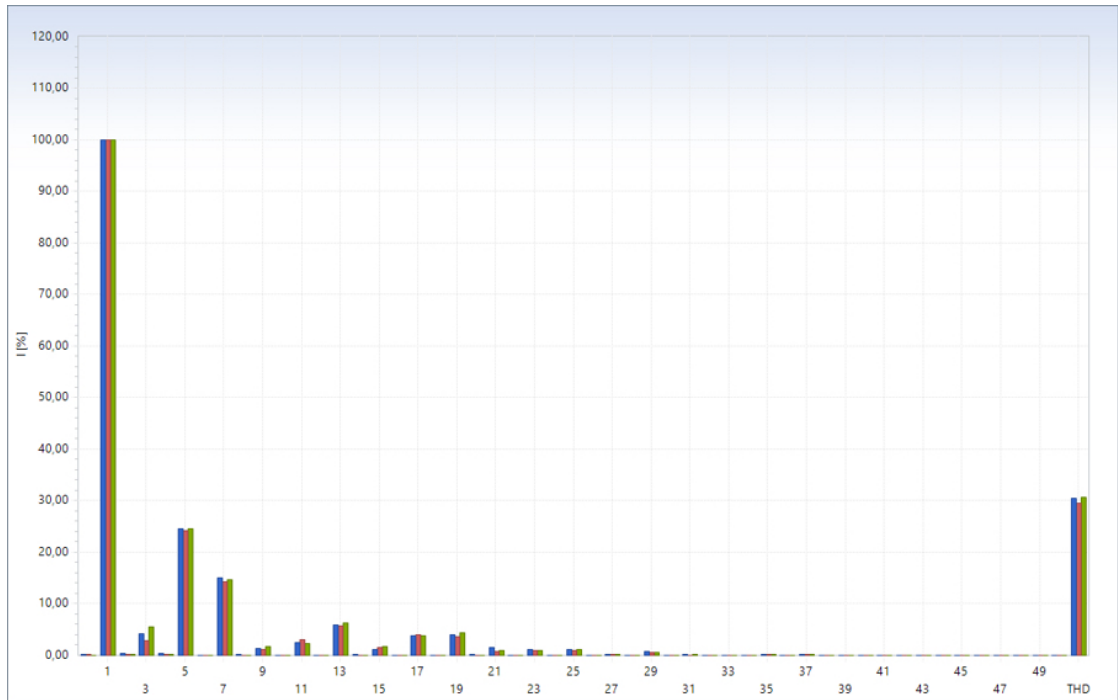
Havaitaan, että tehon noustessa alkaa myös jännitteen käyrämuoto menettää sinimuotoisuutensa. Seuraavaksi tarkastellaan trendikäyriä jännitesärön osalta.



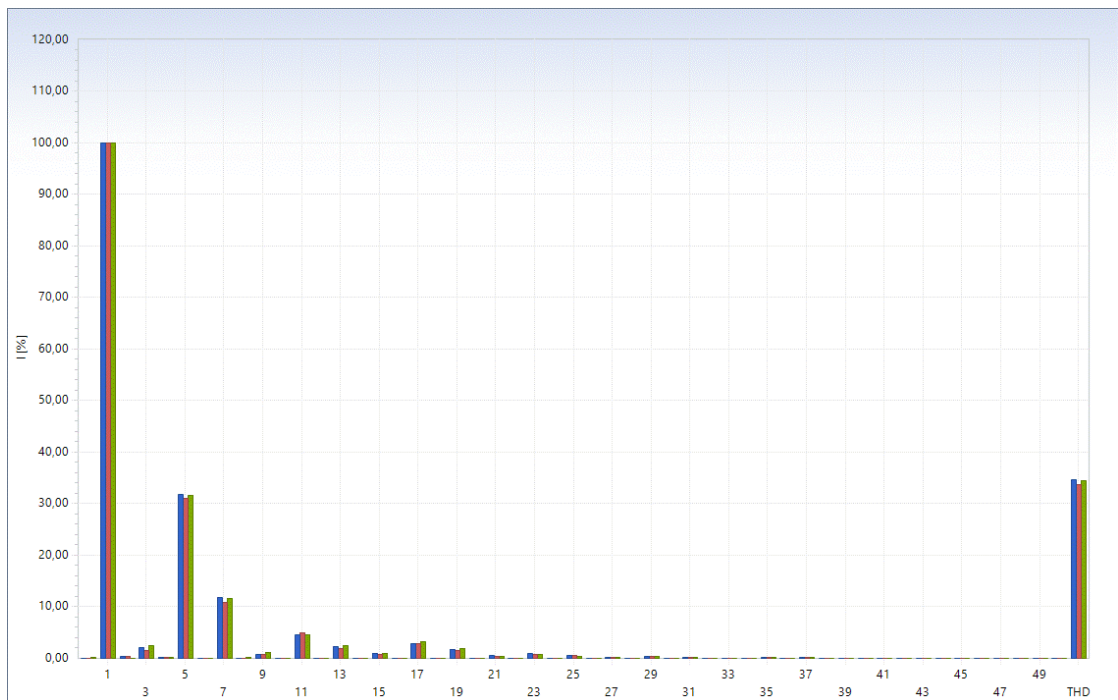
KUVA 20. Trendikäyrät jännitesärön ja tehon osalta

Havaitaan, että tehon noustessa yli 350 kW:n nousee jännitesärö yli viiden prosentin. Se näkyy hyvin myös jännitteen kuvaajassa.

Analysaattorista saadaan myös harmonisten yliaaltojen palkkidiagrammi, josta voidaan alkaa selvittämään yliaaltojen lähdettä.

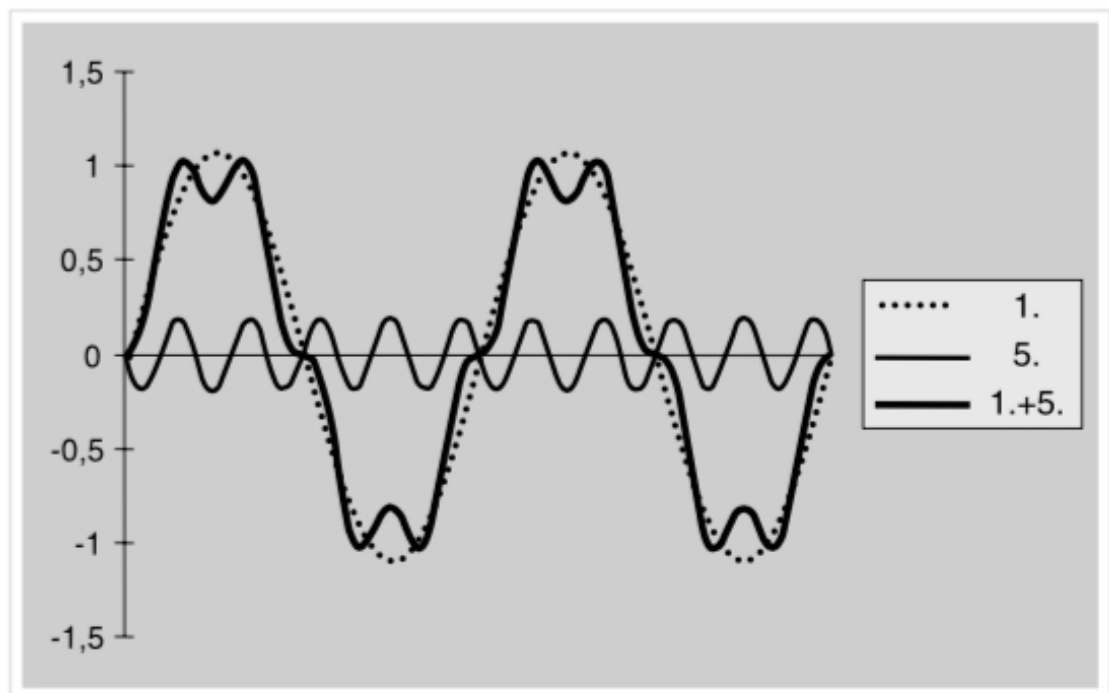


KUVA 21. Yliaaltojen jakauma, pätöteho 130kW



KUVA 22. Yliaaltojen jakauma, pätöteho 380kW

Diagrammit osoittavat, että suurin osuus yliaalloista on viidennen yliaallon tuottamaa. Tehon kasvaessa kuitenkin viidennen yliaallon osuus kasvaa ja kolmannen sekä seitsemännen yliaallon osuus pienenee. Tämä näkyy palkkidiagrammin lisäksi myös virran aaltomuodon kuvaajissa. 130kW teholla kuvassa 18 on särö monimuotoisempaa kun 380kW:n kuvassa 19. Tämä selittyy kolmannen ja seitsemännen yliaallon suhteellisella vähenemisellä viidenteen yliaaltoon nähden. Viides yliaalto siis vahvistuu tehon noustessa. Jäähallin yksivaiheiset kuormat eivät siis nouse samassa suhteessa kuin kolmivaiheiset. Kolmivaiheisia kuormia ovat tekojään ylläpitoon liittyvät moottorit sekä jäähallin ilmastoinnin moottorit. Ilmastoinnin moottorien tehot on kuitenkin huomattavasti pienemmät kuin tekojään laitteiston tehot. Voidaan siis päätellä, että viidensien yliaaltojen synty liittyy tekojään laitteistoon.

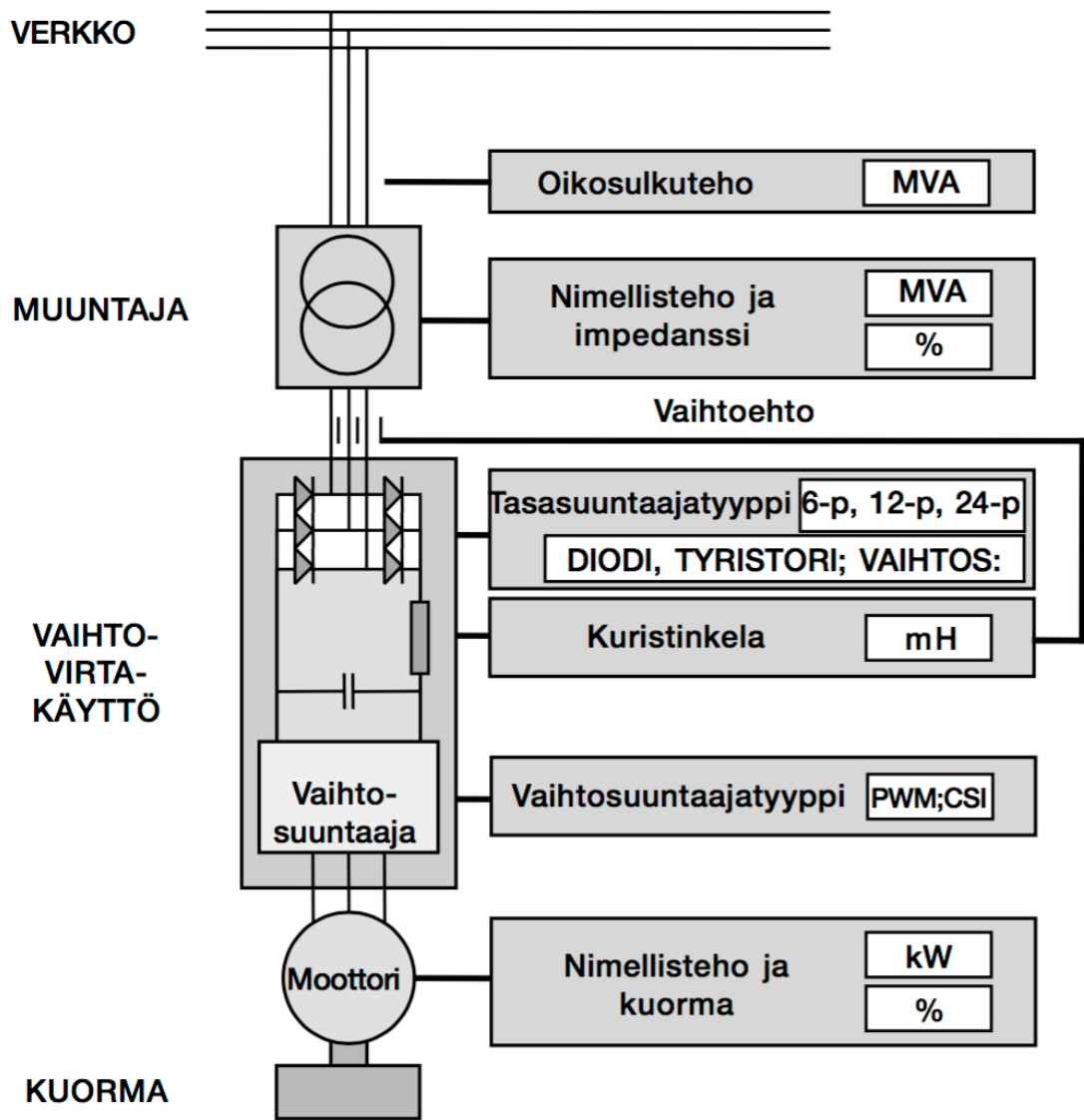


KUVA 23. Kokonaisvirta perustaajuuden ja 5. yliaallon summana (ABB 2001)

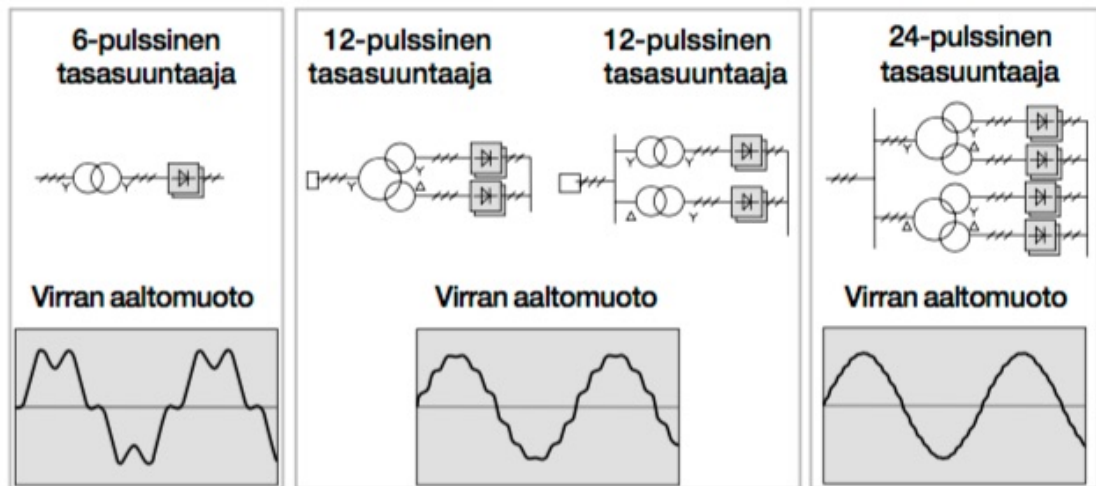
Kuva 23 kuvaa säröytynyttä virtaa, joka aiheutuu viidennen yliaallon esiintymisestä verkossa. Verratessa kuvaajaa jäähallin virran kuvaajaan voidaan havaita säröytymisessä yhdenmukaisuus. Jäähallin sähkötehosta valtaosan vie tekojään laitteisto. Valaistuksen osuus pieneni kaksi vuotta sitten tehdyn valaistussaneerauksen myötä 72kW:sta 25 kW:iin monimetallivalaisimien korvaamisella led-valaisimilla. Molemmat valaistustyypit ovat kolmannen yliaallon tuottajia, mutta kolmannen yliaallon osuus jäähallin yliaalloista ei ole merkitsevä. Viides yliaalto on ylivoimaisesti eniten esiintyvä yliaalto.

5.4 Tekojään laitteisto

Tekojään laitteistoon kuuluu kaksi kompressoria, jäädätysnesteen siirtoon liittyvät pumput, lauhdepiirin pumput ja lauhdepiirin tuulettimet. Yhdistävä tekijä on että kaikki moottorikäytöt ovat taajuusmuuttajakäyttöisiä. Taajuusmuuttajia tekojään laitteistoon kuuluu yhteensä 10 kpl.



KUVA 24. Yliaaltoihin vaikuttavat vaihtovirtakäytön ominaisuudet (ABB 2001)



KUVA 25. Tasasuuntaajien erot virtasärön suhteen (ABB 2001)

Tekojään laitteisto on valmistettu 2000-luvun alussa. Tämän ikäluokan taajuusmuuttajat ovat olleet tyypillisesti 6-pulssisella tasasuuntaajalla varustettuja. ABB:n teknisestä oppaassa olevasta kuvasta voidaan vertailla eri tyyppisten tasasuuntaajien aiheuttamaa virtasäröä keskenään. Tekojään kahta jäädytyskompressoria ohjaa kaksi kpl 130 kW:n taajuusmuuttajaa. Lisäksi jäähallissa on paljon ilmastointikoneita, jotka on saneerattu taajuusmuuttajakäyttöisiksi 10-15 vuotta sitten. Viidennen yliaallon määrä selittyy iäkkäillä taajuusmuuttajilla.

5.5 Kompensoinnin toiminta

Seuraavaksi tutkin kompensoinnin portaiden toimintaa. Kytkin eri portaita sekä yhdistelmiä päälle vakiotilanteessa ts. loistehon sekä pääkeskuksen virran ollessa vakio. Ensin mittasin kondensaattoripariston, jossa ei ollut estokeleja. Mittaukseen käytin Metrelin verkkoanalysaattoria. Kompensoinnin portaat ovat 25+25+50 kVAr.

TAULUKKO 11. Virta 600A ja loisteho 145kVAr

Portaat	Kompensointi	Loisteho	Laskettu arvo	Mitattu arvo	Muutos
1	25	145	120	133	12
1+2	50	145	95	165	-20
2+3	75	145	70	-143	288
1+2+3	100	145	45	-173	318

TAULUKKO 12. Virta 400A ja loisteho 100kVAr

Portaat	Kompensointi	Loisteho	Laskettu arvo	Mitattu arvo	Muutos
1	25	100	75	96	4
1+2	50	100	50	-98	198
1+2	50	100	50	-97	197
2+3	75	100	25	-104	204
1+2+3	100	100	0	-123	223

TAULUKKO 13. Virta 200A ja loisteho 40kVAr

Portaat	Kompensointi	Loisteho	Laskettu arvo	Mitattu arvo	Muutos
1	25	40	15	-39	79
1+2	50	40	-10	-51	91

Seuraavat mittaukset suoritin kun kompensointi oli uusittu. Kondensaattoriparisto korvattiin estokelaparistolla, jonka portaiden nimellistehot ovat 12,5+25+37,5+50 kVAr eli kokonaisteho 125 kVAr.

TAULUKKO 14. Virta 400A ja loisteho 100kVAr

Portaat	Kompensointi	Loisteho	Laskettu arvo	Mitattu arvo	Muutos
1	12,5	100	87,5	96	4
2	25	100	75	92	8
1+2	37,5	100	62,5	89	11
2+3	62,5	100	37,5	-90	190
1+2+3	75	100	25	-92	192
1+2+4	87,5	100	12,5	-98	198

TAULUKKO 15. Virta 170A ja loisteho 40 kVAr

Portaat	Kompensointi	Loisteho	Laskettu arvo	Mitattu arvo	Muutos
1	12,5	40	27,5	-36	76
2	25	40	15	-40	80
3	37,5	40	2,5	-48	88
4	50	40	-10	-55	95

Mittauksista huomataan ettei kompensointi toimi johdonmukaisesti. Välillä loisteho ei putoa tarpeeksi portaan nimellisarvoon nähden, välillä se kompensoi moninkertaisesti portaan nimellisarvon.

5.6 Resonanssi

Yliaalloilla on monia haitallisia vaikutuksia verkon komponentteihin. Yliaallot kasvattavat häviöitä voimansiirrossa ja verkon komponenteissa aiheuttaen ylimääräistä lämpenemistä ja nopeuttaen eristeiden vanhenemista. Jännitteen käyrämuodon vääristymät aiheuttavat virhetoimintoja. Lisäksi yliaallot häiritsevät puhe- ja radiotaajuudella tapahtuvaa viestiliikennettä. Kaikkein haitallisina yliaaltoihin liittyvä ilmiö on kuitenkin resonanssi. Resonanssi syntyy kun jonkin yliaallon taajuus on lähellä verkon resonanssitaajuutta. Tällöin yliaaltovirratt tai jännitteet usein moninkertaistuvat normaaliin tilanteeseen verrattuna. Resonanssi syntyy jonkin verkon osan kapasitanssien ja induktanssien välille. (Korpinen 2008)

Resonanssitaajuus lasketaan kaavalla:

$$f_r = \sqrt{\frac{S_k}{Q_c}} \cdot f_n \quad (1)$$

missä

f_r = rinnakkaisresonanssitaajuus [Hz]

f_n = verkon nimellistaajuus [Hz]

S_k = verkon oikosulkuteho [kVA]

Q_c = kompensointiteho [kVAr]

Oikosulkuteho voidaan laskea kaavalla:

$$S_k = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_k \quad (2)$$

missä:

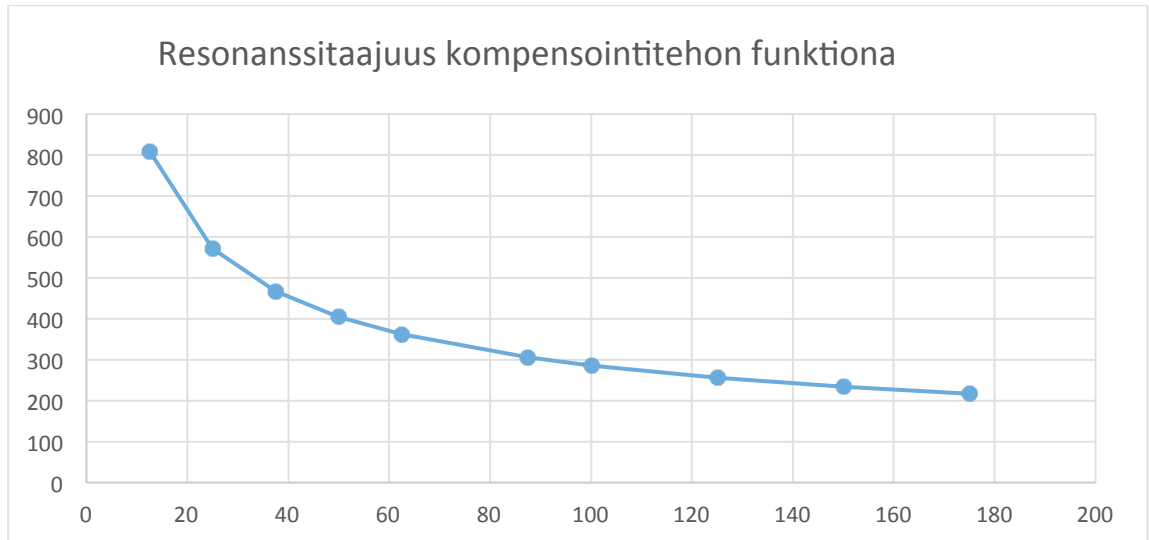
U = pääjännite [V]

I_k = oikosulkuvirta kompensoinnin kytkentäpisteessä [A]

Oikosulkuvirta kompensoinnin kytkentäpisteessä oli 4600A ja pääjännite 411V. Saaduilla arvoilla laskin resonanssitaajuudet eri kompensointiportaiden suhteen.

TAULUKKO 16. Kompensoinnin vaikutus resonanssitaajuuteen

Q/kVAr	Resonanssitaajuus /Hz
12,5	809
25	572
37,5	467
50	405
62,5	362
87,5	306
100	286
125	256
150	234
175	216



KUVA 26. Resonanssitaajuuden kuvaaja kompensointitehon suhteen

Kuvissa 21 ja 22 on esitetty harmonisien yliaaltojen jakauma. Niistä huomataan, että verkossa on runsaasti sekä viidettä (250Hz) että seitsemättä (350Hz) yliaaltoa. Voidaan todeta, että kompensoiminen saattaa verkon resonanssitilaan ainakin kahden yliaaltotaajuuden lähellä. Tämän johdosta ei kompensointi toimi halutulla tavalla. Tällaisessa tilanteessa on syytä harkita keinoja päästä eroon yliaalloista. Esimerkiksi poistaa verkosta yliaaltolähteet eli korvata vanhat taajuusmuuttajat nykyaikaisemmilla taajuusmuuttajilla, jotka eivät tuota yliaaltoja verkkoon. Toinen keino on lisätä taajuusmuuttajien yhteyteen yliaaltosuodattimet, jolloin yliaallot eivät pääsisi taajuusmuuttajalta takaisin verkkoon. Kolmas keino on asentaa aktiivisuodatin kumoamaan yliaallot. Näitä voi asentaa useamman eri yliaaltolähteiden kanssa rinnan tai yhdellä suuritehoisella aktiivisuotimella suodattaa koko sähköjakelu pääkeskuksella.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työ kokonaisuutena antoi hyvän perehdytyksen sähköverkon häiriöihin, niiden syntyyn, mittaamiseen, mittaustulosten analysointiin sekä häiriöiden poistamiseen. Vaikkei työssä päädytty ratkaisuun, jossa itse verkkohäiriöitä olisi suodatettu, työstä sai runsaasti tietoa ja taitoa ammatillisesti.

LÄHTEET

ABB 2001, Tekninen opas nro 6, Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas, WWW-dokumentti.

https://library.e.abb.com/public/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/Tekninen_opas_nro_6.pdf. Päivitetty 28. huhtikuuta 2015 klo 7.23.26. Luettu 10.5.2016

Korpinen, Leena. 2001, Yliaalto-opus. WWW-dokumentti.

<http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/ylialto-opus.pdf>. Päivitetty 16. kesäkuuta 2008 klo 13.12.50. Luettu 10.5.2016