



SAVONIA

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

SUODATINLAITTEISTON KÄYTTÖÖNOTTO

TEKIJÄ: Kalle Karhumaa

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Sähkötekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä Kalle Karhumaa			
Työn nimi Suodatinlaitteiston käyttöönotto			
Päiväys	13.5.2013	Sivumäärä/Liitteet	52 + 4
Ohjaaja lehtori Jari Ijäs			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani VR Track Oy, projekti-insinööri Vesa-Matti Koskinen			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli syventyä sähköradan suodatinlaitteiston käyttöönottoon. Suodatinlaitteiston käyttöönotto suoritettiin Oulunkylän sähköradan syöttöasemalla Helsingissä. Syöttöasemalle asennettiin uusi suodatinlaitteisto ja tehtiin siihen käyttöönotto. Opinnäytetyössä käydään läpi kaikki suodatinlaitteiston käyttöönottoon liittyvät asiat.</p> <p>Työ aloitettiin tutustumalla Oulunkylän sähköradan syöttöasemaan. Työmaalla tutustuttiin projektin aikatauluun ja suodatinlaitteiston komponentteihin. Suunnitelman valmistuttua sähköradan suodatinlaitteisto asennettiin ja lopuksi tehtiin käyttöönotto. Käyttöönotto sisälsi käyttöönottokoestuksia ja erilaisia mittauksia, kuten releiden koestus, katkaisijoiden koestus, kelojen viritys ja suodatinlaitteiston komponenttien mittaukset. Teoriassa tutustuttiin sähkövetokaluston aiheuttamiin yliaaltoihin ja sähköradan yliaaltojen vaimennukseen suodatinlaitteiston avulla. Pääsääntöisesti työssä perehdyttiin sähköradan suodatinlaitteiston suojaukseen ja käyttöönottokoestuksiin Oulunkylän syöttöasemalla. Käyttöönotossa käytettiin Omicron 256-6 releen koestusmittaria, Megger Sverker 780 releen testausyksikköä, Megger Egil katkaisija analysaattoria, Programma 600A virransyöttöyksikköä ja Fluke 289 mittaria.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena saatiin sähköradan suodatinlaitteiston käyttöönotto suoritettua projektin aikataulun mukaisesti.</p>			
Avainsanat Suodatin, rele, käyttöönotto			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Electrical Engineering			
Author(s) Kalle Karhumaa			
Title of Thesis Commissioning of a Filter System			
Date	13 May 2013	Pages/Appendices	52 + 4
Supervisor Mr Jari Ijäs, Lecturer			
Client Organisation /Partner Mr Vesa-Matti Koskinen, Project Engineer, VR Track Oy			
<p>Abstract</p> <p>The aim of this thesis was to focus on the commissioning of a filter system in electric railways. The commissioning of the filter system was conducted at the feeder station of Oulunkylä electric railway which is located in Helsinki. A new filter system was installed and commissioned to the feeder station. This thesis included all the things related to the commissioning of the filter system.</p> <p>The project started by getting acquainted with the Oulunkylä electric railway feeder station. At the working site the project schedule and the components of the filter system were gotten familiar with. After completing the plan the filter was installed and the commissioning took place. The commissioning included measurements such as relay tests, testing of the circuit breakers, excitation of the coils, and measuring the filter system components. The theory of the simple principle of harmonic disorders caused by electric trains and the filtration of those harmonics using a filter system was also studied. However, the thesis mainly focused on the protection of the filter system and the commissioning at the Oulunkylä feeder station. Omicron 256-6 relay testing meter, Megger Sverker 780 relay testing unit, Megger Egil circuit breaker analyzer, Programma 600A power supply unit and Fluke 289 meter were used at the commissioning.</p> <p>As a result of the thesis, an electric railway's filter system was successfully commissioned.</p>			
Keywords Filter, relay, commissioning			

ESIPUHE

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutustua sähköradan suodatinlaitteiston käyttöönottoon. Työssä tehtyä käyttöönottoa voidaan käyttää apuna tulevaisuuden sähköradan suodatinlaitteistojen käyttöönotoissa.

Opinnäytetyön ohjaajana toimi Savonia-ammattikorkeakoulun lehtori Jari Ijäs, jota kiitän opinnäytetyön ohjauksesta. Haluan esittää kiitokseni VR Track Oy:n työnohjaajana sekä asiantuntijana toimivalle projekti-insinöörille Vesa-Matti Koskiselle. Lisäksi haluan kiittää diplomi-insinööri Erkki Tiippanaa, asentaja Risto Ahosta sekä muita VR Trackin työntekijöitä, jotka auttoivat ja neuvoivat opinnäytetyöhön liittyvissä asioissa.

Kuopiossa 13.5.2013

Kalle Karhumaa

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	8
2	VR TRACK OY.....	9
3	SÄHKÖRATA	10
4	YLIAALLOT	14
5	YLIAALTOSUODATTIMET	18
5.1	Suodatinlaitteisto sähköradan syöttöasemalla	20
5.2	Oulunkylän suodatin.....	21
5.2.1	Kondensaattoriyksikön rakenne.....	23
5.2.2	Kondensaattoripariston suojaus	23
5.2.3	Suodatinlaitteiston katkaisija	23
6	RELESUOJAUS.....	26
6.1	Yleistä relesuojauksen rakenneosista.....	26
6.2	ABB REX 521 –johdonsuojarele suodattimen suojauksessa	26
6.3	Suojarele SPAJ 160 C suodattimen kondensaattoripariston suojauksessa	27
6.4	Virtamuuntajat suodattimen suojauksessa	28
7	SUODATINLAITTEISTON KÄYTTÖÖNOTTO	30
7.1	Omakäyttökeseuksen tarkastus.....	30
7.2	Tasasähkökeskuksen tarkastus	30
7.3	Suojareleiden koestus	31
7.3.1	ABB REX 521 -johdonsuojareleen koestus.....	33
7.3.2	Kondensaattoripariston suojarele SPAJ 160 C koestus	36
7.4	Komponenttien mittaukset ja koestus.....	40
7.4.1	Kondensaattorien ja kondensaattoriparistojen mittaukset	40
7.4.2	Kelojen mittaukset	41
7.4.3	Vastusten mittaukset.....	42
7.4.4	Virtamuuntajien mittaukset	42
7.4.5	Katkaisijoiden mittaukset ja koestus	43
7.5	Kiinniohjauksen estoreleen koestus	44
7.6	Suodattimen viritys	45
7.7	Hälytyskeskuksen tarkastus	47

8	SUODATTIMEN TOIMINTA TYHJÄKÄYNNILLÄ	49
9	YHTEENVETO.....	50

LÄHDELUETTELO

LIITTEET

LIITE 1 SALLITUT HARMONISET YLIAALTOVIRRRAT 25 KV RATAJOHDOSSA

Lyhenteet ja määritelmät

Ajojohdin = Ajolangan ja kannattimen tai vain ajolangan muodostama johdin.

Erotusjakso = Rakenne, jossa ajojohdin on vierekkäisten syöttöalueiden rajalla eristetty pituussuunnassa kahdesta peräkkäisestä kohdasta, joiden väliin jää maadoitettu osa.

Imumuuntaja = Muuntaja, jonka ensiökäämi on sarjassa ajojohtimen kanssa ja toisiokäämi paluujohtimen kanssa ja jonka tarkoitus on pakottaa paluuvirta kulkemaan paluujohtimessa.

Katkaisija = Kytkinlaite, jolla katkaistaan, suljetaan ja johdetaan kuormitusvirran lisäksi oikosulkuvirta.

Paluujohtin = Paluuvirtajohdin, joka liitetään paluukiskoon jokaisen imumuuntajavälin keskivaiheilla.

Paluukisko = Paluuvirtatien osana toimiva metallisesti yhtenäinen metallikisko.

Ratajohto = Ajojohtimen ja mahdollisen paluujohtimen tai vastajohtimen sekä kannatusrakenteiden ja varusteiden muodostama johto.

Syöttöasema = Kytkinlaitos, josta syötetään sähköä radalle.

Välilytkinasema = Kahden vierekkäisen syöttöaseman välille rakennettu kytkinasema. (Trafi 2006.)

1 JOHDANTO

Suomessa tehdään jatkuvasti sähköaseman päivitys- ja muutostöitä. Valtion omistaman rataverkon kehittämisestä ja hoidosta vastaa Liikennevirasto, joka Liikenne- ja viestintäministeriön alaisena virastona kilpailuttaa hankkeensa kaikilla radanpidon osa-alueilla. Liikennevirasto haluaa pienentää sähköradalta tulevia yliaaltoja ja sen mukana kasvavia loistehokustannuksia. Syöttöasemien suodattimilla voidaan pienentää sähköradan yliaaltoja ja loistehokustannuksia.

Monimutkaiset suodatinlaitteistot sisältävät monipuolisia suojauksia, joiden avulla saadaan suojaus toimimaan riittävän nopeasti ja näin ollen välttämään suodattimen laiterikoilta. Tämän vuoksi suojauksen toimintavarmuuden on oltava erittäin korkea. Toimintavarmuutta pyritään edistämään suodattimen valmistusvaiheen lopputestauksella ja käyttöönotto-koetuksilla.

Työn ensimmäisenä tavoitteena on tarkastella sähköratoja ja sähkövetokaluston aiheuttamia yliaaltoja. Toisena tavoitteena on selittää, millaisia suodattimia sähköradan yliaaltojen vaimentamiseen on rakennettu. Kolmanneksi esitellään suodattimen suojauksessa käytettäviä relesuojauksia. Lopuksi perehdytään varsinaiseen käyttöönottoon, joka sisältää runsaasti erilaisia käyttöönotto-koetuksia ja mittauksia.

Työ toteutettiin pääosin Oulunkylän sähköasemalla, mutta työ sisälsi myös vierailuja Hyvinkään konepajalla ja VR Trackin eri suunnitteluyksiköissä.

2 VR TRACK OY

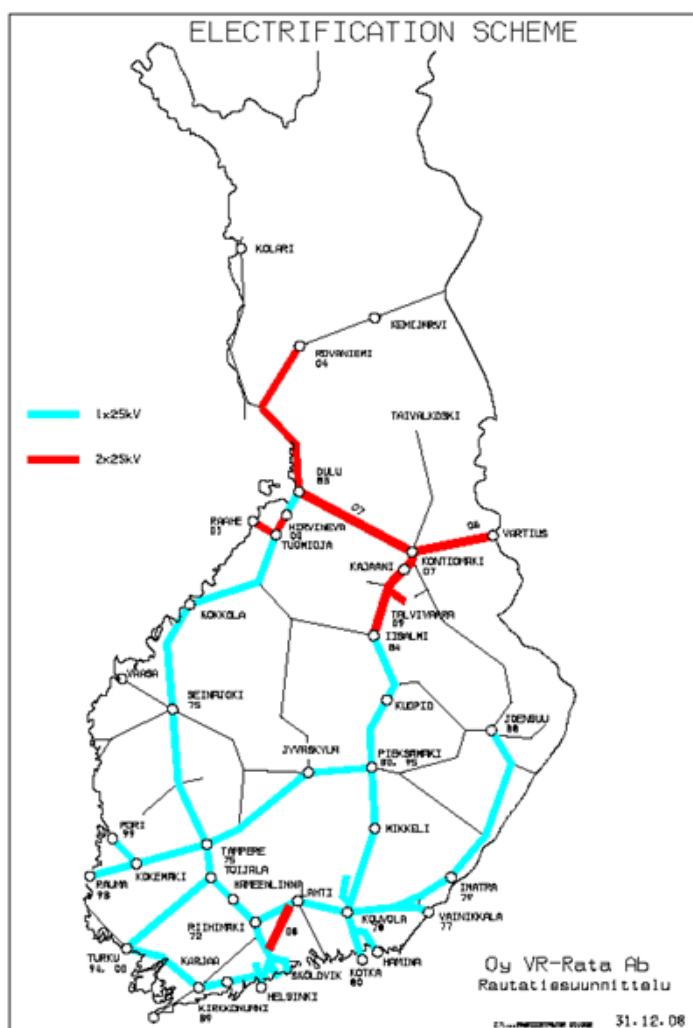
VR Track Oy kuuluu VR-konserniin, jonka emoyhtiö on VR-Yhtymä Oy. VR-Yhtymä Oy hoitaa matkustajaliikenteen ja logistiikan kuljetuspalveluja. VR-konserniin kuuluu yli 30 yhtiötä, jotka työllistävät yhteensä noin 12 500 ihmistä. Maamme suurin radanrakentaja sisältää rautatietekniikan koko alueen suunnittelusta toteutukseen. Yritys on nykyään entistä enemmän mukana myös ratojen ulkopuolisissa insinöörirakentamisen hankkeissa. Asiakastoiminnan lähtökohtana on turvallisuus ja vastuullisuus, yhdessä menestyminen, tavoitteellisuus sekä uudistuminen. (VR Track Oy.)

VR Trackin sähkö- ja turvateknisiin palveluihin kuuluu ohjaus- ja turvalaitteiden suunnittelu ja rakentaminen, kulunvalvontalaitteiden asennukset, sähkörakentaminen, ylläpito- ja kunnostustyöt, vahvavirtalaitteiden asennustyöt, kytkinlaitos- ja muuntamotyöt sekä koestukset, kaapelointityöt ja kaapelikartoitukset. (VR Track Oy.)

3 SÄHKÖRATA

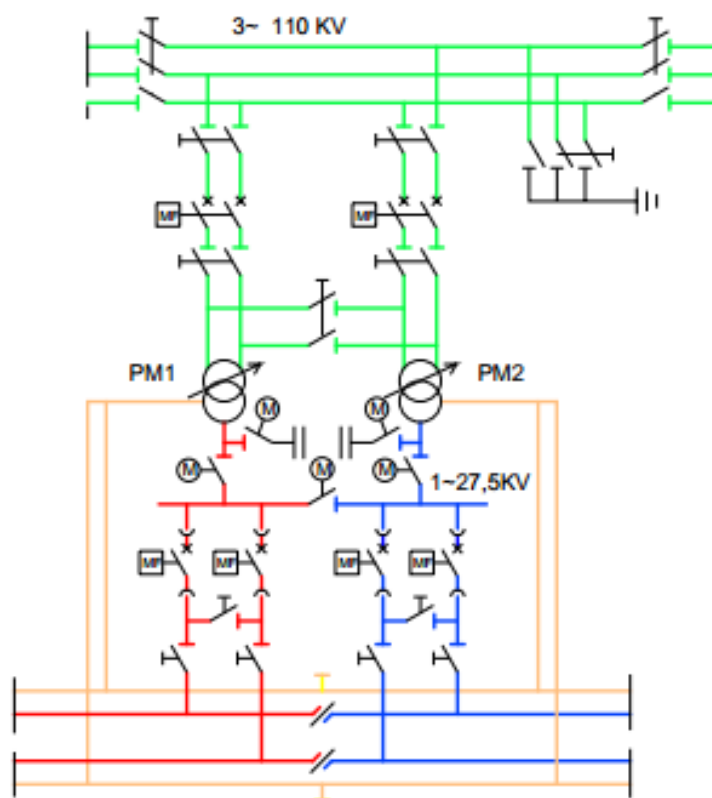
Suomen rataverkko on rautatien rataosuuksien muodostama väyläverkko, jota hallinnoi Suomen väylävirasto, Liikennevirasto. VR Group on tällä hetkellä Suomen rataverkon pääasiallinen liikenneoperaattori. Tammikuussa 2013 Liikenneviraston hallinnoiman rataverkon pituus oli 5 944 km, josta 3 073 km on sähköistetty. Vuonna 1982 rataverkon pituus oli 6 041 km, mutta siitä suljettiin vuoden 1996 mennessä 381 km. Rataverkko on vieläkin vähäisen liikenteen takia yksiraiteista, tärkeimpiä poikkeuksina pääkaupunkiseudun lähiliikenteen radat, pääradan osuus Helsinki-Riihimäki-Tampere, Riihimäki-Kouvola-Luumäki ja Lahden oikorata. (Suomen rataverkko.)

Suomessa liikenneviraston hallitsemalla sähköradalla on käytössä 1 x 25 tai 2 x 25 kV sähköjärjestelmä (kuva 1). Sähköratarakenne koostuu syöttö- ja välilytkinasemista, ratajohdon johtimista ja niiden kannatusrakenteista (pylväät, portaalit, orret), imumuuntajista, radanvarsisäästömuuntajista, erottimista ja eristimistä. Rakenteeseen kuuluvat lisäksi sähköradan läheisyydessä sijaitsevien metallirakenteiden suojamaadoitusjohtimet, sähköistettyjen raiteiden kiskot sekä erilaiset suojamaadoitusjohtimet, joiden tarkoituksena on maadoittaa sähköradan läheisyydessä olevat metallirakenteet. (Trafi 2006.)



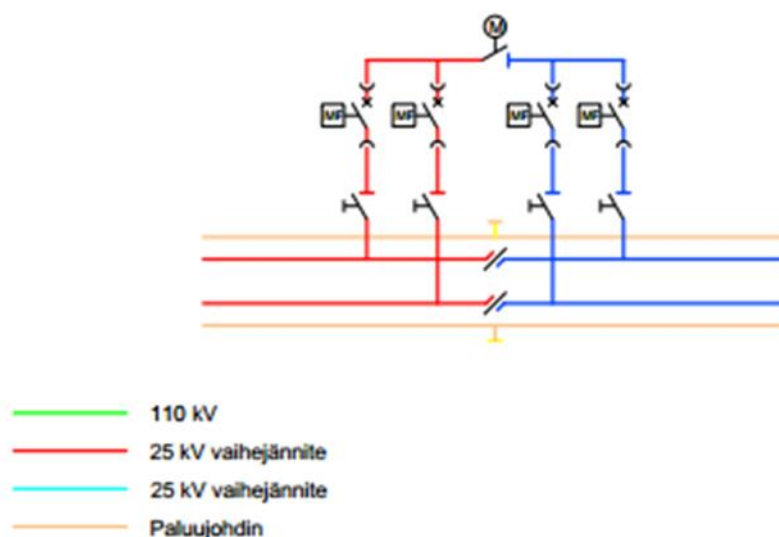
KUVA 1. Suomen sähköistysjärjestelmä (Tiippana 2012.)

Suomessa sähkörata käsittää radan rakenteiden lisäksi vetokaluston käyttämän sähköenergian siirtoon ja muuttamiseen, vaaratekijöiden poistamiseen ja toiminnan turvaamiseen tarvittavat rakenteet ja alitteet. 110 kV:n kantaverkosta otetaan sähköenergia syöttöasemien kautta sähköradalle. Kanta-verkkoa hallinnoi Suomessa Fingrid. Syöttöasemilta syötetään yksivaiheinen 25 kV jännite ajojohtimeen 50 Hz taajuudella. 2 x 25 järjestelmässä sen sijaan syötetään edellisen lisäksi -25 kV yksivaiheinen jännite vastajohtimeen 50 Hz taajuudella. Ajojohtimeen on asennettu erotusjakso, jolla pidetään syöttöalueet erillään. Nämä erotusjaksot on yleensä asennettu syöttöasemavälin keskelle ja asemien kohdalle. Kuviossa 1 on esitettyä järjestelmän 1 x 25 kV syöttöasema. Kuviossa 2 on esitettyä järjestelmän 2 x 25 kV syöttöasema. (Liikennevirasto 2005.)



KUVIO 1. Järjestelmän 1 x 25 kV syöttöasema (Trafi 2006.)

Syöttöasemista ja välilytkinasemista voidaan käyttää nimikettä kytkinasema. Sähköratajärjestelmä saa sähköenergian syöttöasemien kautta, jota kutsutaan myös nimellä muuntoasema. Syöttöasemat on sijoitettu noin 30 - 50 km välein radan varressa järjestelmässä 1 x 25 kV. Järjestelmässä 2 x 25 kV välimatka on lähes puolet pitempi, noin 90 km. Välilytkinasema on mahdollista sijoittaa pitkissä etäisyyksissä (kuvio 4). Välilytkinaseman tarkoituksena on parantaa sähköradan sähköistä suojausta ja radan käyttöominaisuuksia. Välilytkinasema ei ole ainoa ratkaisu, sillä se voidaan korvata kauko-ohjattavilla erottimilla. (Liikennevirasto 2005.)



KUVIO 4. Järjestelmän 1 x 25 kV välilytkinasema (Trafi 2006.)

Käyttökeskuksesta ohjataan sähkölaitteistojen toimintaa. Syöttö- ja välilytkinasemilla voidaan sähkölaitteistoa ohjata ohjaustaululta sekä erottimen toimintaa liikennepaikan paikallisohjaustaululta tai käsinohjauksen avulla käsikammella. (Liikennevirasto 2005.)

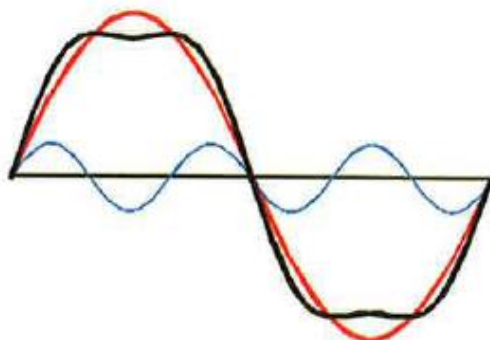
Sähkövirtansa 1 x 25 kV järjestelmä ottaa 110 kV kantaverkosta. Kantaverkon 110 kV jännite muutetaan 25 kV jännitteeksi muuntajan avulla. Syöttömuuntajan koko on joko 7,5 tai 12,5 MVA. Muuntajan ensiökäämityksiin syötetään 110 kV ja toisiokäämityksissä sähkövirta kulkee muuntajan suojausten ja erottimien läpi aina ajojohtimeen. Tästä sähkövirta kulkeutuu edelleen sähkövetokaluston virroittimeen ja siitä kaluston omiin virtapiireihin. Liikkuvan sähkövetokaluston pyöristä sähkövirta palaa ratakiskoa pitkin imumuuntajalle, joka pakottaa paluuvirran menemään paluujohtimeen. Paluujohtinta pitkin sähköenergia palaa takaisin syöttömuuntajan toisiokäämitykseen. (Suomen rautateiden sähköistysjärjestelmä.)

4 YLIAALLOT

Tehoelektroniikan käytön myötä sen sivutuotteeksi on saatu yliaallot. Kaikkia 50 Hz taajuuksia ylittäviä virtoja ja jännitteitä kutsutaan yliaalloiksi. Verkkotaajuuden monikertoja ovat yliaallot. Kolmas yliaalto on 150 Hz, viides yliaalto on 250 Hz ja niin edelleen. Yliaalloista yleisimpiä ovat kolmas, viides, seitsemäs ja yhdestoista yliaalto. Virran yliaallot ovat yleensä selvästi merkittävämpiä kuin jännitteen yliaallot. (Karonen 2010.)

Yliaaltojen aiheuttajia ovat muun muassa tasa- ja vaihtosuuntaajakäytöt, hakkuriteholähteet, tyristorisäätimet, puolijohdekytkimet, kodin ja irtaimistojen elektroniikka, hitsauslaitteet, purkauslamput, valokaariuunit sekä vikaantuneiden muuntajien ja moottorien magneettiipiirit. Myös UPS-laitteet aiheuttavat yliaaltoja, vaikka näitä tuotteita toisaalta käytetäänkin parantamaan sähkön laatua. Huoltamattomat UPS-laitteet kuivunein akuin ovat erityisen merkittävä häiriön aiheuttaja. Kuormituksista ja syöttävän verkon ominaisuuksista riippuen verkon yliaaltoja aiheuttavat loistehon kompensointiin käytetyt rinnakkaiskondensaattoriparistot, jotka saattavat muodostaa haitallisia resonanssiipiirejä verkon induktanssin kanssa. Resonanssiipiirien seurauksena yliaallot voivat vahvistua merkittävästi. (Sähköinfo Oy 2006, 30.)

Yliaalloilla on monenlaisia haittavaikutuksia verkon komponentteihin. Häviöiden kasvu sähköverkossa ja sähkökäyttäjien laitteissa sekä eri kuormitettavuuksien alentuminen ovat yleisimpiä haittavaikutuksia. Ylikuormittuminen vaurioittaa myös laitteita, kuten esimerkiksi kondensaattoreita. Yliaallot aiheuttavat myös virhenäyttämiä mittareihin sekä automaatiolaitteiden ja suojarleiden virhetoimintoja. Sähkökäyttäjien omien laitteiden synnyttämät yliaaltovirrat ja muut häiriöt ovat usein toimintahäiriöiden syynä. Edellä mainitut ilmiöt korostuvat yleensä resonanssitilanteissa, joissa jännite säröytyy huomattavasti. Yliaaltovirtojen synnyttämät magneettikentät aiheuttavat joskus myös monitorien ja televisioiden välkyntää. Erityisesti kolmas yliaalto (kuvio 5) saattaa esiintyä tällä tavoin, koska se summautuu vaihejohtimista nollajohtimeen ja leviää verkon nollauksen kautta mahdollisesti rakennusten runkorakenteisiin. Käytännössä ongelma aiheutuu pääosin perustaaajuksen virran ja kolmannen yliaaltovirran yhteisvaikutuksena. Suuremmat yliaaltotaajuudet aiheuttavat suurelta osin ääni- ja radiotaajuisia häiriöjännitteitä. Kun taas pienemmät ovat merkityksellisiä sähköverkon komponenttien ja sähkölaitteiden lämpenemisen kannalta. (Sähköinfo Oy 2006, 30.)



KUVIO 5. Kolmas yliaalto (Sähköinfo Oy 2006, 31.)

Resonanssit voivat syntyä, kun on jokin värähtelypiiri resonanssissa yliaaltolähteen syöttämällä taajuudella. Tällöin yliaaltovirrat tai jännitteet usein moninkertaistuvat normaaliin tilanteeseen verrattuna. Resonanssi voi syntyä jonkin verkon osan kapasitanssien ja induktanssien välille. Verkossa tavanomaisia resonanssipiirejä ovat esimerkiksi syöttömuuntajan ja sen läheisyydessä alajännitepuolella sijaitsevan loistehon kompensointikondensaattorin muodostama piiri. Alajännitepuolelta tulevan yliaaltoherätteen kyseessä on rinnakkaisresonanssi. Rinnakkaisresonanssiin impedanssi on resonanssitaajuudella erittäin suuri. Tällöin suhteellisen pienikin yliaaltovirta saa aikaan resonanssiin ylisuuren ko. taajuudella värähtelevän ylijännitteen. (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen ja Palva 2011, 252.)

Yliaaltolähteen verkkoon syöttämät yliaaltovirrat aiheuttavat verkossa jännitesäröä. Jännitesäröä ilmoitetaan THD-arvona. Jännitesärö tarkoittaa aaltomuodon poikkeamista sinimuodosta. THD-arvo ilmoitetaan prosenttilukuna yliaaltokomponenttien suhteessa normaaliin sinimuotoiseen aaltoon. (ABB TTT 2000, 283.)

Sähkövetokaluston aiheuttamat yliaallot

Sähkövetokalusto saa käyttöenergiansa rautatien yläpuolella olevasta ajolangasta tai raiteiden vierestä ja/tai välistä virtakiskosta veturin virroittimen avulla. Ajolangasta tai virtakiskosta saatu sähkövirta muutetaan vetokaluston sähkömoottoreihin liike-energiaksi, joka siirretään voimansiirtolaitteiden eli yleensä ajomoottorikäyttöjen kautta veturin pyöriin. (Sähköveturi.)

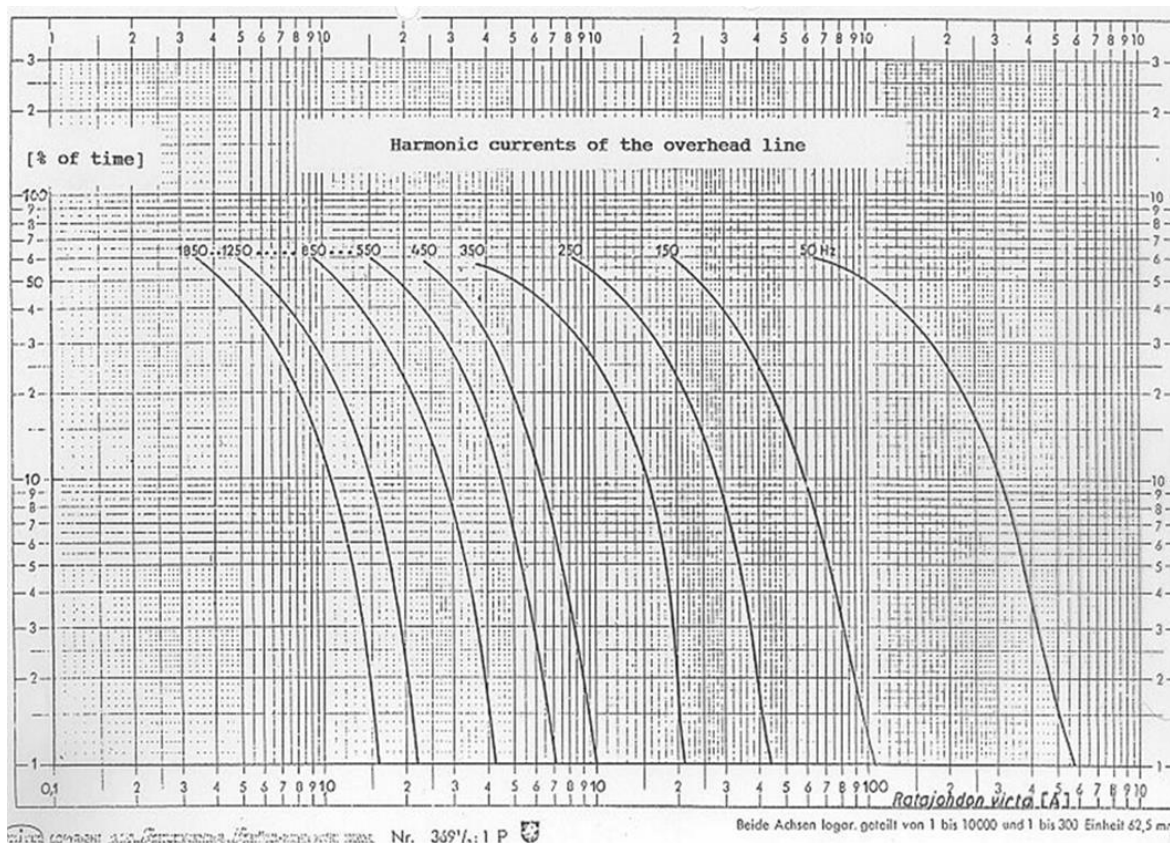
Sähkövetokalustoon kuuluvat muun muassa sähköveturit, joiden peruserätyypit ovat pysyneet monin paikoin muuttumattomina. Vaihtovirtakäyttöisissä vetureissa ajojohdon 15-25 kV jännite (Suomessa yksivaiheinen 25 kV 50 Hz) muutetaan päämuuntajassa ajomoottoreille sopivaksi jännitteeksi. Muuntajan ns. käännyksellä voidaan jännitettä portaittain säätää ja ajomoottorit ovat tässä perusrakenteessa sekavirtamoottoreita. (Sähköveturi.)

Tehoelektroniikka on sovellettu 1950-luvulta alkaen lähinnä vaihtovirtavetureihin. Aluksi sitä sovellettiin muuntajan jälkeiseen tasasuuntaukseen (diodiveturit) ja myöhemmin tyristorisäätöihin (tyristoriveturit). Vastaava tasavirtakäyttöön soveltuva laite on tyristorikatkoja. 1990-luvulta alkaen tehoelektroniikan kehitys mahdollisti siirtymisen miltei huoltovapaisiin ja pienikokoisiin kolmivaiheajomoottoreihin, joita syötetään tehoelektroniikalla toteutetuilla taajuusmuuttajilla. Taajuusmuuttajissa puolestaan käytetään öljy- tai vesijäähdytteisiä GTO-tyrstoreita tai IGB-transistoreita. (Sähköveturi.)

Sr2 veturin ajomoottoreissa on kolmivaiheikosulkumoottorit ja niitä syötetään taajuusmuuttajilla, joissa on öljyjäähdytteiset GTO-tyristorit. Veturin jarruttaessa ajomoottorit toimivat generaattoreina, jolloin junan liike-energia muutetaan sähköenergiaksi. Tämä sähköenergia syötetään takaisin ajojohdtimeen. (Sr2.)

Ajojohtimeen takaisintuleva energia aiheuttaa yliaaltoja sähköverkkoon (kuvio 6). Sähkövetokaluston yliaaltojen aiheuttajat ovat sähkövetokaluston tyristoriohjaus. Sähkövetokaluston ratajohtoon yliaal-

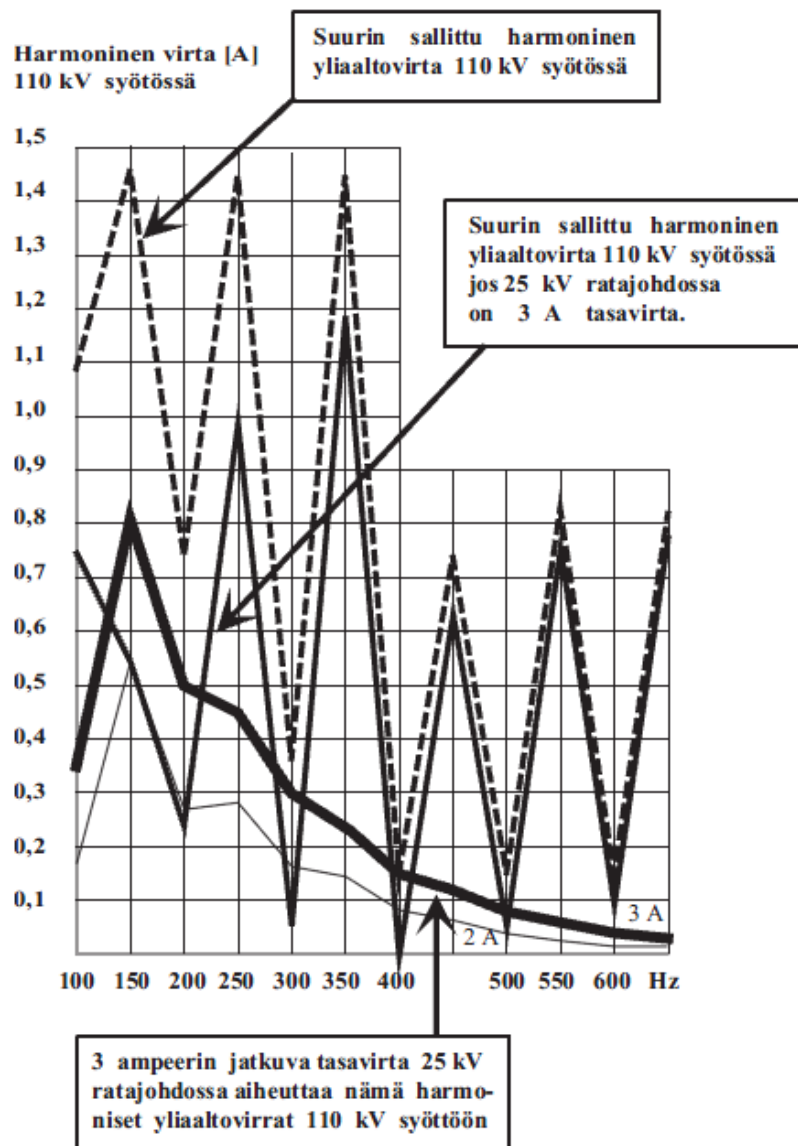
tojäännitteitä aiheuttavat myös yliaaltovirrat, joiden suuruuteen vaikuttavat ratajohdon kytkentätilan-
ne ja vetokaluston sijainti syöttöasemaan nähden. Sähkövetokalusto on suojattu ylijännitesuojauk-
sella (Liikennevirasto 2012.) Myös uusien junayksiköiden kytkeytyminen ja erottaminen ratajohdosta
aiheuttaa erittäin suuritaajuisten värähtelyilmiön.



KUVIO 6. Ratajohdon yliaaltovirrat (Tiippana 2012.)

Sähkövetokaluston yliaaltovirrat ja virran tasakomponentti todennetaan noin 200 km testiajolla. Ka-
luston käyttö on ajon aikana normaalin liikenteen mukaista. Testitulokset on hyväksyttäviä, jos 2-
100 – kertaisten harmonisten yliaaltojen (taajuusalue 100 – 5000 Hz) kaikista näytteistä 96 % alit-
taa taulukon arvot. Jos jonkun taajuuden arvot ylittävät 50 % taulukon arvot, tulosten hyväksyttä-
vyys on arvioitava erikseen Liikenneviraston kanssa. Rato 21:ssä on määritetty sallitut yliaaltovirrat
ja tasakomponentit 25 kV ratajohdossa. Veturin, junayksikön tai yhteenkytkettyjen veturien tai ju-
nayksiköiden sallitut harmoniset yliaaltovirrat 25 kV ratajohdossa (25 kV paluuvirtapiirissä) on esitet-
ty liitteessä 1. (Liikennevirasto 2012.)

Virran tasakomponentti 25 kV ratajohdossa (25 kV paluuvirtapiirissä) tutkitaan esim. spektrianaly-
saattorilla tai oskillografilla. Virran tasakomponentista 25 kV ratajohdossa ja 110 kV syötössä on teh-
ty diagrammi (kuvio 7). (Liikennevirasto 2012.)



KUVIO 7. Virran tasakomponentin vaikutukset 25 kV ratajohdossa ja 110 kV syötössä (Liikennevirasto 2012.)

5 YLIAALTOSUODATTIMET

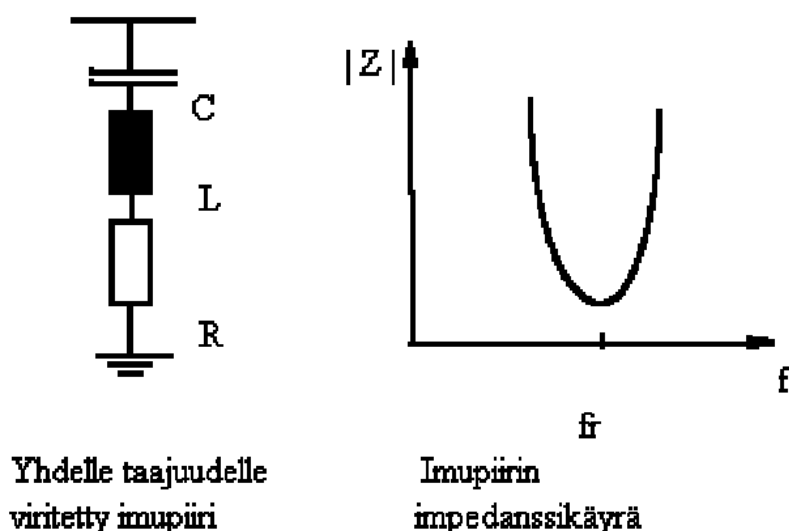
Yliaaltosuodattimia käytetään verkoissa, joissa yliaaltopitoisuus on suuri. Yliaaltosuodatin poistaa yliaaltovirtoja verkosta ja myös tuottaa tarvittavan loistehon. Sen myötä pienentämällä jännitesäröä myös sähkön laatu paranee verkossa. Laitteisto koostuu kondensaattoreista ja niiden kanssa sarjaan kytketyistä kuristimista, joita kutsutaan keloiksi. Haluttu kompensointiaste saavutetaan mitoittamalla kondensaattorin perustaajuudella tuottama loisteho. Tyypillisin yliaaltosuodatin koostuu kolmesta sarjaresonanssiipiiristä, jotka on viritetty viidennelle, seitsemännelle ja yhdelletoista yliaaltotaajuudelle. (Sähköinfo Oy 2006, 55 - 58.)

Kolmatta yliaaltoa ja sen kerrannaisvirtoja tuottavat yksivaiheiset, vaiheen ja nollan väliin kytketyt epälineaariset kuormitukset. Esimerkiksi yksivaiheiset tasasuuntaajat ja erilaiset purkausvalaisimien elektroniset liitäntälaitteet tuottavat kolmatta yliaaltoa. Kolmas yliaalto voi aiheuttaa yliaaltojen lisäksi muitakin ongelmia. (Sähköinfo Oy 2006, 55 - 58.)

Kolmannen yliaallon määrään voidaan vaikuttaa nollajohtimeen asennetulla rinnakkaisresonanssiipiirillä (ns. estopiiri). Toisena vaihtoehtona on vaiheen ja nollajohtimen välille kytkettävä sarjaresonanssiipiiri (imupiiri eli suodatin) (kuvio 8). Näitä kahta suodatinta kutsutaan myös nimellä passiivisuodatin. Kolmantena vaihtoehtona on kytkeä aktiivisuodatin. Estopiirin toiminta perustuu rinnakkaisresonanssiipiiriin, joka nollajohtimensa kanssa sarjaan kytkettynä muodostaa suuren impedanssin 150 Hz taajuudelle. Nollajohtimessa ei tämän seurauksena kulje kolmatta harmonista yliaaltovirtaa. (Sähköinfo Oy 2006, 55 - 58.)

Sarjaresonanssiipiiriä kutsutaan nimellä suodatin, joka koostuu kondensaattoreista ja keloista. Kelat on kytketty sarjaan yhdessä kondensaattoreiden kanssa. Suodatin tuottaa myös perustaajuudella loistehoa halutun tehokertoimen saavuttamiseksi. Kuristin on mitoitettu siten, että suodatin muodostaa erittäin matalaimpedanssisen sarjaresonanssiipiirin kolmannelle harmoniselle yliaaltotaajuudelle. Tämän vuoksi suurin osa harmonisista yliaalloista päättyy suodattimeen eikä verkkoon. Suodatin tuottaa halutun määrän loistehoa ja pienentää jännitesäröä. Vaiheen ja maan välillä tai vaiheiden välillä suodattimella on pieni impedanssi suodatettavalla yliaaltotaajuudella. (Sähköinfo Oy 2006, 55 - 58.)

Korkeimmilla yliaalloilla voidaan käyttää laajakaistasuodattimia (kuvio 9). Suodatinkuristin viritetään 150 Hz taajuudelle ja sen viritystaajuus voidaan säätää väliotoilla. Aktiiviseen suodattimeen verrattuna passiiviset suodattimet eivät vastaa verkon yliaaltotilan muutokseen, vaan suodattavat vain ennalta määrätyt yliaallot. Kytkettäessä suodattimia on verkon osan tila tunnettava hyvin. (Sähköinfo Oy 2006, 55 - 58.)



**Yhdelle taajuudelle
viritetty imupiiri**

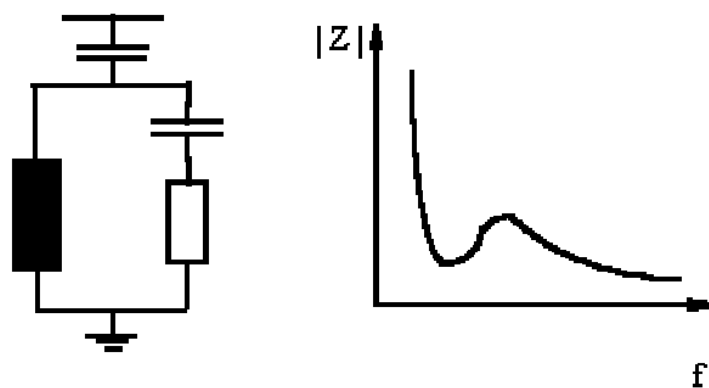
**Imupiirin
impedanssikäyrä**

KUVIO 8. Ensimmäisen kertaluokan suodatin (Korpinen, Mikkola, Keikko ja Falck.)

Passiivisten suodattimien rinnalle ovat tulleet puolijohdetekniikalla toteutetut aktiiviset yliaaltosuodattimet. Aktiivisten suodattimien etu passiivisiin suodattimiin verrattuna on, että siinä on mahdollisuuksia valita useampia suodatettavia taajuuksia. Etuna on myös mahdollisuus suodatukseen ilman loistehon tuotantoa. Tämän lisäksi aktiivisilla suodattimilla vältetään rinnakkaisresonanssivaara ja tilan tarve on huomattavasti pienempi. Sillä voidaan myös kompensoida kolmella jaolliset parittomat yliaallot eli nollajohtimen yliaallot. (Sähköinfo Oy 2006, 62.)

Aktiiviset suodattimet mittaavat virran yliaaltokomponentit ja tuottavat niiden kanssa 180° :n vaihe-siirrossa olevan virran, joka kumoaa alkuperäisen virran. Jos kuormassa yliaaltovirrat ylittävät aktiivisuodattimen kapasiteetin, jatkaa suodatin toimintaansa jättäen kapasiteettiinsa ylittävän osan yliaaltovirroista kompensoimatta. Tästä syystä aktiivisuodatin ei voi ylikuormittua. Aktiivisuodatin on siis ohjattu virtalähde. Se toimii samalla periaatteella kuin taajuusmuuttajatkin. Tasajännitekondensaattorit ladataan kompensoitavassa verkossa ja ne toimivat energialähteinä. Inverteri tuottaa PWM-modulaatiolla halutun virran verkkoon. Puolijohteina voidaan käyttää GTO-transistoreita, mutta suosittumia ovat IGBT-transistorit. (Sähköinfo Oy 2006, 62.)

Aktiivisuodatin voidaan kytkeä mihin tahansa verkon pisteeseen. Kustannustehokkuus ja kuormien säröytymät määräävät suodattimien sijoituspaikan. Puolijohdekytkinten suorituskyky ja aktiivisuodattimien kalleus ovat yleistymisen esteenä. Useamman sähkönkäyttäjän muuntopiirissä voi verkonosan tilan tarkastelu olla olennaisesti vaikeampaa kuin yhden sähkönkäyttäjän muuntopiirissä. Yleensä keskitettynä kompensointina yliaaltoja käytetään pien- ja keskijänniteverkoissa. Yliaaltoja suodattamalla saadaan siis parempilaatuista jännitettä ja poistetaan häiriöitä. (Sähköinfo Oy 2006, 62.)



**Laajakaistainen
suodatin**

**Suodattimen
Impedanssikäyrä**

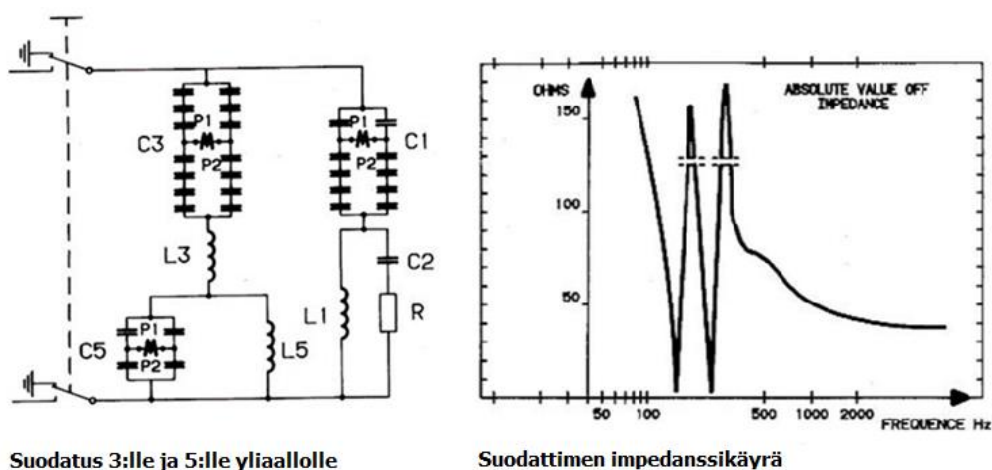
KUVIO 9. Laajakaistasuodatin (Korpinen, Mikkola, Keikko ja Falck.)

5.1 Suodatinlaitteisto sähköradan syöttöasemalla

Sähköradan paluusähkövirrasta tulee ongelmia syöttöaseman sähköjärjestelmään. Nämä johtuvat suurelta osin tyristoriohjatuista vetureista, jotka aiheuttavat yliaaltovirtoja. Yliaaltovirrat aiheuttavat vääristymiä kantaverkon jännitteessä, ylimääräistä kuormaa muuntajille ja verkkoon, häiriötä televerkkoon. Lisäksi syöttömuuntajan ja ratajohtimen resonanssitaajuus tuottavat harmonista audiotäajuutta. (Tiippana 2012.)

Sähköradan paluuvirran yliaaltovirtojen poistamiseen on suunniteltu sähköinen suodatin, jonka tarkoituksena on vaimentaa kolmas ja viides yliaalto. Lisäksi suodattimella vaimennetaan ajojohtimen resonanssi-ilmiötä, joka menee läpi muuntajan 110 kV verkkoon, sekä generoidaan loistehoa nimellistääjuudella. (Technical specification 2012.)

Suomen ratajohtoverkossa on kolme erityyppistä suodatinta. Suodatintyyppi ykkösesä on suodatus kolmannelle ja viidennelle yliaallolle sekä laajakaistasuodatin korkeille taajuuksille, jonka loisteho on 2,5 Mvar (kuvio 10).

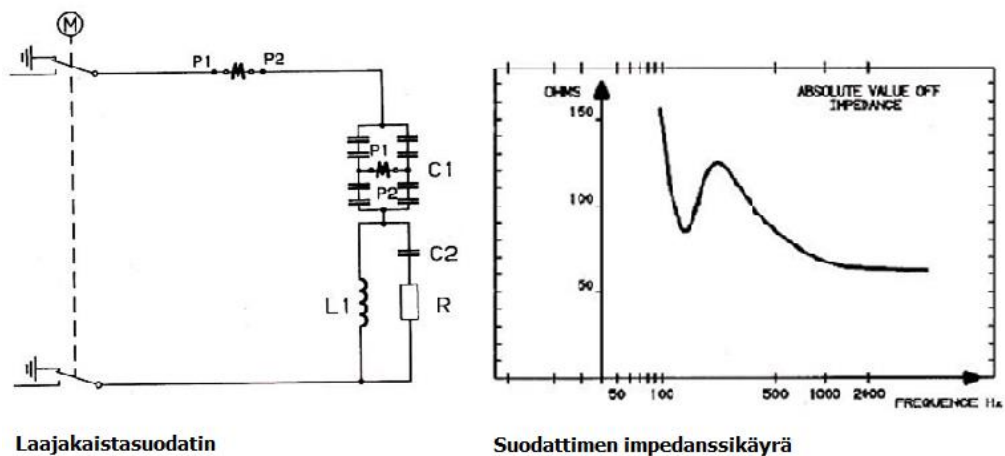


Suodatus 3:lle ja 5:lle yliaallolle

Suodattimen impedanssikäyrä

KUVIO 10. Suodatintyyppi ykkönen (Tiippana 2012.)

Suodatintyyppi kakkosessa on pelkästään laajakaistasuodatin, jonka loisteho on 2 Mvar (kuvio 11). Suodatintyyppi kolmosessa on pelkästään laajakaistasuodatin, jonka loisteho 1 Mvar.



Laajakaistasuodatin

Suodattimen impedanssikäyrä

KUVIO 11. Suodatintyyppi kakkonen (Tiippana 2012.)

5.2 Oulunkylän suodatin

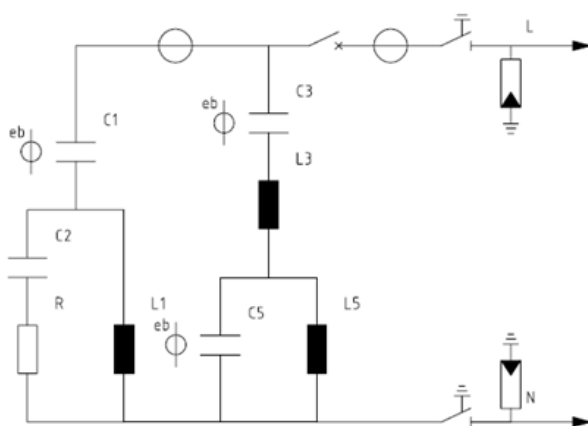
Oulunkylän syöttöaseman uuden suodattimen todellinen loisteho on paljon suurempi kuin aikaisemman. Suodatin on yhdistetty syöttöasemalla 25 kV jännitteeseen ilmajohdon ja paluujohdon väliin. Laitteisto on asennettu päämuuntajan toisiopuolelle sähköasemalla (kuva 2).



KUVA 2. Oulunkylän suodatin (valokuva Kalle Karhumaa.)

Suodattimen kelat on asennettu erilliseen betoniperustukseen kondensaattoriparistojen viereen. Betonissa ei ole yhtään teräsosaa. Kondensaattoriyksiköt on varustettu sisäisillä sulakkeilla, jotka toimivat selektiivisesti huomioon ottaen ylijännitteen ja epäsymmetrian suodattimen suojauksessa. Suodattimessa on kolmannen ja viidennen yliaallon suodatus sekä laajakaistasuodatus. Suodattimen kapasitiivinen loisteho 50 Hz:llä on jopa 4,2 MVaria. Laitteistoja on rakennettu kaksi kappaletta, päämuuntaja ykköselle ja kakkoselle. Suodattimen kytkinlaitteena on yksinapainen tyhjiökatkaisija, joka on sijoitettu muuntajan bunkkerisuojan päälle. Suodattimen nimellisjännite on 27,5 kV.

Yliaaltosuodattimen impedanssi on perustaajuudella kapasitiivinen. Tästä syystä suodatin tuottaa perustaajuista loistehoa. Suodatin kompensoi loistehon ja pienentää särön halutulle tasolle. (ABB TTT 2000, 285.)



KUVIO 12. Oulunkylän syöttöaseman suodatin (Suunnittelu.)

Keloilla L3 ja L5 pystyy virittämään suodattimet ottaen huomioon kondensaattoriyksikön toleransiarvo (kuvio 12). Määrittäessä komponenttien mitoitusvirrat virralle ja jännitteelle suodattimen yliaaltovirrat on otettava huomioon. (Technical specification 2012.)

Taulukko 1. Avojohton lyhytaikainen harmoninen virta (Technical specification 2012.)

Taajuus [Hz]	Yliaaltovirrat [A]
150	150
250	70
350	16
450	12
550	10
650	9
750	7
850	6
950	5
1050	4
1150	4
1250	3
1350	3

Taulukko 2. Avojohton pisin yhtenäinen virta (Technical specification 2012.)

150 Hz		250 Hz		350 Hz		450 Hz	
Aika [s]	Virta [A]	Aika [s]	Virta [A]	Aika [s]	Virta [A]	Aika [s]	Virta [A]
30	136	30	60	30	33	30	12
60	117	60	54	60	26	60	10
120	93	120	29	120	18	120	8
180	60	180	27	180	12	180	7
240	44	240	21	240	10	240	6
300	39	300	18	300	6	300	4

5.2.1 Kondensaattoriyksikön rakenne

Kondensaattoriyksikön käämielementit on koottu rinnan ja sarjaan. Käämin eristeenä on polypropeenikalvo ja eristeenä alumiinifolio. Sisäiset sulakkeet on varustettu jokaiseen käämiin. Kondensaattoriyksikön koosta riippuen yhden käämisulakkeen palo aiheuttaa 1,5–3 % tehon pienenemisen. Astian sisällä on kondensaattorin navat ja ne on yhdistetty purkausvastuksella. Kondensaattoriyksikö on kyllästetty synteettisellä öljyllä. Ympäristövaikutuksiltaan öljy on muuntajaöljyn kaltainen. Kondensaattoriyksiköt ovat 1-napaisesti tai 2-napaisesti eristettyjä. 1-napaisesti eristetyn yksikön kuori on aina jännitteinen. 2-napaisesti eristetyn yksikön kuori voi olla myös jännitteinen, esim. jos paristossa on useampia sarjakytkentöjä. Kondensaattorit on koestettu normin IEC 60871-1 mukaan. Kondensaattorin kapasitanssin toleranssi nimellisarvosta on yleensä -5...+10 % ja häviöt ovat <0,2 W/kvar. Paristot on kytketty eri vaiheisiin jännitteestä riippuen sarjaan ja tehosta riippuen rinnan. Telineiden välissä olevat tukieristimet erottaa sarjaankytketyt yksikköryhmät. (Nokian Capacitors.)

5.2.2 Kondensaattoripariston suojaus

Kondensaattoriyksikössä palaa sisäisiä käämisulakkeita käämiläpilyöntien seurauksena. Epäbalanssijoukon asetteluarvo määräytyy ehdosta, että pahimmassa asemassa olevan kondensaattoriyksikön yli vaikuttava jännite ole yli 10 % suurempi kuin verkon nimellijännite. Jännitteen noustessa paristossa yksikön tai useamman rinnakkain kytketyn ryhmän yli suuremmaksi, tulee pariston lauaeta pois itsestään. Yleensä isoissa paristoissa käytetään kaksiportaista suojausta. Hälytys saadaan, kun epäbalanssijännite tai -virta on 50...60 % laukaisuarvosta. Epäbalanssireleiden viiveasetteluina on yleensä hälytyksessä 5 s ja laukaisussa 0,1 s. Epäbalanssisuojauksen virran asetteluarvot saadaan pariston toimittajalta. (Mörsky 1992, 240.)

5.2.3 Suodatinlaitteiston katkaisija

Katkaisijoita käytetään yleisesti virtapiirien avaamiseen ja sulkemiseen. Ne voivat toimia sekä käsin ohjattuina että automaattisesti. Automaattisista katkaisijatoiminnoista tavallisin on avautuminen tai kiinni meneminen suojareleen toiminnasta. Tähän vaikuttaa esimerkiksi maasulkuvirran ja oikosulkuvirran suureen muutokset. Katkaisijalle avautumiskäskyn antaa virtapiiriin mittamuuntajien avulla kytketty rele. Automaattisen sulkeutumiskäskyn katkaisijalle antaa jälleenkytkentäreleistys. Katkaisi-

ja kykenee vaurioitumatta sekä avaamaan että sulkemaan oikosulkupiirin, jossa virta voi olla moninkertainen katkaisijan mitoitusvirtaan verrattuna. Kytkimistä ei löydy tällaista ominaisuutta, koska se pystyy katkaisemaan vain mitoitusvirtansa. Kytkimet eivät myöskään avaudu automaattisesti ylivirran seurauksena. (Elovaara ja Haarla 2011, 163.)

Virtapiirin katkaisussa virta ei katkea heti katkaisijan koskettimien avautuessa, vaan virtapiiri pysyy suljettuna valokaaren välityksellä. Valokaari syttyy koskettimien avautuessa seuraavasti:

- kosketinpaineen pienentyessä kosketusvastus kasvaa ja kosketinpinnat lämpenevät
- viimeiset kosketuspisteet sulavat, ja koskettimien irtautuessa niiden välille syntyy sula metallinen silta
- metallisilta höyrystyy ja sen johtavuus pienenee, ja tätä seuraa läpilyönti
- metallihöyry ja sitä ympäröivä väliaine ioinisoituvat, ja tämä synnyttää kasvavaa kaasuplasmaa. Näin muodostuu valokaarikanava, jossa virta kulkee. (Elovaara ja Haarla 2011, 163.)

Valokaarella on olennainen osa virran katkaisussa. Katkaistaessa suurta virtaa valokaaren johtavuus on varsin hyvä. Tämä sallii koskettimien avautumisen niin etäälle toisistaan, että syntynyt avausväli kestää täyden jännitteen valokaaren sammussa. Valokaaren vastus kasvaa virran pienentyessä. Virran nollakohdassa erityisesti valokaaren resistanssi kasvaa nopeasti, jos valokaarta jäädytetään sopivasti. Valokaari toimii siis kytkimen tavoin, johtimesta eristeeksi. Virran luonnollista nollakohtaa käytetään hyväksi vaihtovirtakatkaisijoiden katkaisussa. (Elovaara ja Haarla 2011, 163.)

Katkaisijoita on erityyppisiä. Katkaisijatyyppejä ovat esimerkiksi ilmakatkaisijat, öljykatkaisijat, vähäöljykatkaisijat, paineilmakatkaisijat, SF₆ katkaisijat ja tyhjiökatkaisijat. Tyhjiökatkaisija sisältää kiinteän ja liikkuvan koskettimen, jotka sijoitetaan tyhjiösäiliöön. Koskettimien erkautuessa toisistaan valokaari jää palamaan ionisoituneeseen kosketinpinoilta höyrystyneeseen metallipilveen. Metallihöyryn ionisaatio katoaa virran nollakohdassa ja itse höyry tiivistyy. Tämä prosessi tapahtuu hyvin nopeasti, mistä syystä tyhjiökatkaisijan katkaisukyky ei riipu juuri ollenkaan palaavan jännitteen muodosta tai jyrkkyydestä. 5-15 mm pituinen avausväli riittää kyllin suuren jännitelujuuden saavuttamiseen tyhjiön hyvän jännitelujuuden vuoksi. Kosketinpinoilla elektrodiaineet vaikuttavat olennaisesti valokaaren syntymiseen, palamiseen, ja sammumiseen. Kuorirakenteen on oltava ehdottoman tiivis. Tyhjiökatkaisijat vaativat jatkuvan ulkoisen puristusvoiman kyetäkseen johtamaan mitoitus- ja oikosulkuvirtoja ilman liiallista lämpenemistä. Lisäksi syntyvä lämpö voidaan siirtää ympäristöön vain liittimien kautta. (Elovaara ja Haarla 2011, 182.)

Oulunkylän sähköasemalle asennettiin yksinapainen ABB:n FSK II tyhjiökatkaisija suodattimen suojaksi (kuva 3). Katkaisijoita tuli kummallekin suodattimelle yksi kappale. Katkaisijat olivat ensimmäiset Suomessa, joita on asennettu rautatiesovelluksiin. Ulkomailla näitä katkaisijoita on enemmän käytössä.

FSK II S + laite on suunniteltu ulkokäyttöön ja sitä käytetään 50/60 Hz rautateiden radan virransyötöverkoissa. Tyhjiökatkaisija on varustettu modernin magneettisen käynnistysmekanismin kanssa, perinteisen jousimekanismin sijaan. Katkaisija on suunniteltu ilman mekaanisia vivustoja. Vivustot korvaa kaksi ohjauskoteloja. Ohjauskoteloista ensimmäinen kytketään maanpinnan yläpuolelle ja toinen sijaitsee tyhjiökatkaisijan magneettitoimilaitteessa. Ohjauskotelot yhdistetään kaapelilla. Suurin

etu magneettitoimilaitteella ja kaapeliyhteydellä on se, että se eliminoi useita liikkuvia osia. Siitä luodaan asennus, joka on olennaisesti huoltovapaa ja luotettava. (ABB 2010.)



KUVA 3. FSK II + tyhjiökatkaisija (valokuva Kalle Karhumaa.)

6 RELESUOJAUS

Releet seuraavat sähköverkon tilaa ja tarpeen vaatiessa suorittavat kytkentöjä automaattisesti. Releen toiminta on oltava nopea, luotettava, herkkä ja toimii poikkeuksellisissa käyttöolosuhteissa. Releen toiminnan on oltava selektiivistä. Selektiivisyydellä tarkoitetaan sitä, että vikaantunut komponentti erotetaan muusta verkosta. Näin voidaan minimoida sähkökäyttäjälle aiheutuneet haitat. Suojauksen on katettava aukottomasti koko suojattava järjestelmä. Suoja-alueita voi olla esimerkiksi muuntajat, johdot, generaattorit ja moottorit, jotka rajoittuvat relesuojan ohjaamiin katkaisijoihin. (Mörsky 1992, 15)

Suojareleet ja niiden ohjaamat katkaisijat muodostavat suoja-alueita. Vierekkäisen suoja-alueiden peittyessä toisensa, on suoja-alue aukoton. Suoja on absoluuttisesti selektiivinen toimimalla omalla suoja-alueella tapahtuvissa vioissa. Virtaporrasta perustuvaa selektiivisyyttä sanotaan virtaselektiivisyydeksi ja aikaporrastukseen perustuvaa selektiivisyyttä sanotaan aikaselektiivisyydeksi. Relesuojauksen päätehtävä on vikojen havaitseminen ja vika-alueen rajoittaminen mahdollisimman pieneksi. (Mörsky 1992, 15)

Relesuojauksen on oltava mahdollisimman yksinkertaisia käyttäjälle ja siltä vaaditaan myös käyttövarmuutta. Suojauksen on voitava koestaa käyttöpaikalla. Lisäksi relesuojauksen hankintakustannukset on oltava kohtuulliset. (Mörsky 1992, 15)

6.1 Yleistä relesuojauksen rakenneosista

Releet tarvitsevat avukseen muita komponentteja suoriutuakseen suojaustehtävästä. Muita komponentteja ovat katkaisijat, mittamuuntajat, apuenergiälähteet, hälytys – ja raportointikeskukset sekä mittaus-, laukaisu- ja tiedonsiirtoyhteydet. Mittamuuntajien tehtävänä on muuntaa sähköverkon primäärisuureet releille sopivaan muotoon. Mittamuuntajia ovat jännite- ja virtamuuntajat. Katkaisija on sähköverkon primääripiirin osa, jolle releet antavat sulkua- ja avauskoskettimiensa välityksellä toimintaohjeita. Apuenergiälähdettä kutsutaan tasajännitekeskukseksi. Se sisältää akuston, josta saa tiettyjen vikatilanteiden aikana ohjattua katkaisija auki ja kiinni. (Mörsky 1992, 16.)

Vikatilanteista saadaan oikea kuva nopeasti ja luotettavasti hälytys- ja raportointikeskuksilla. Releitä voi olla suuria määriä tarkasteltavassa kohteessa, joten releen toimintatietojen keskitetty kerääminen on tarpeellista. Relesuojaukokokonaisuudessa tarvitaan myös johdotuksia siirtämään mittaus- ja kytkentätietoja tietoliikenneverkkoon. (Mörsky 1992, 16.)

6.2 ABB REX 521 –johdonsuojarele suodattimen suojauksessa

Oulunkylän sähköasemalla yhtä suodatinta suojaa kaksi ABB REX 521 -johdonsuojarelettä ja kolme SPAJ 160 C kondensaattoripariston suojalettä (kuvio 13). ABB REX 521 johdonsuojareleistä ensimmäinen suojaa suodattimen koko järjestelmää. Rele toimii ylivirtasuojana. Ylivirtasuoja toimii, kun virta ylittää sille asetetun arvon. Ylivirtarele suojaa suodatinta oikosulkutapauksissa ja ylikuormi-

tuksissa. ABB REX 521 releistä toinen suojaa suodattimen laajakaistaistaosuutta oikosuilulta ja ylikuormituksilta.

Suojarele REX 521 on suunniteltu nimenomaan keskijänniteverkon suojaukseen, valvontaan, mittaukseen ja ohjaukseen. Tyypilliset sovellukset ovat keskijänniteverkon ala-asemat. Sovelluksia käytetään ala-asemille tuleviin ja lähteviin syöttöjohtoihin. Suojareleessä on myös mittaustulot virtamuuntajille ja jännitemuuntajille. Tehokkuus suojareleessä perustuu mikroprosessipohjaiseen laiteympäristöön. Releen ohjelmointiratkaisuissa ja laitteistoissa on käytetty uusinta teknologiaa. Käyttöliittymä (HMI) käsittää neste-kidenäytön (LCD), jonka erilaiset näkymät tekevät paikallisen käytön helpoksi ja antavat käyttäjälle tietoja indikointi-ilmoitusten avulla (kuva 4). (ABB 2004.)



KUVA 4. ABB REX 521 –johtonsuojarele (ABB 2004.)

6.3 Suojarele SPAJ 160 C suodattimen kondensaattoripariston suojauksessa

Jokainen suodattimen SPAJ 160 C rele suojaa omaa kondensaattoriparistoa. Kondensaattoripariston virtamuuntajan erovirta on yleensä nolla. Vian tullessa kondensaattoriparistolle erovirta nousee. Virtamuuntaja, joka on ryhmitelty kondensaattoriyksiköiden väliin huomaa erovirran. Virtamuuntaja muuntaa virran releelle sopivaksi virraksi. Rele havahtuu ja virran noustessa asetteluarvon yli se hälyttää ja laukaisee katkaisijan.

Releen päätarkoituksena on toimia loistehokompensointiin ja harmonisten yliaaltojen suodatuksen käytettyjen kondensaattoriparistojen suojauksessa. Kondensaattoriparistoja suojataan harmonisten yliaaltojen aiheuttamalta ylikuormitukselta sekä pariston sisäisissä vikatilanteissa syntyviltä ylijännitteiltä. Suojauksen on myös estettävä varautuneen kondensaattoripariston ennenaikainen uudelleenkytkentä sähköverkkoon. Suojarele SPAJ 160 C sisältää kondensaattoripariston suojarelemoduulin SPCJ 4D40:n (kuva 5). (ABB 2002.)



KUVA 5. Kondensaattoripariston suojarile SPAJ 160 C (ABB 2002.)

6.4 Virtamuuntajat suodattimen suojauksessa

Virtamuuntajan tarkoituksena on muuntaa piirin virta. Piirin virta muunnetaan kyseessä olevan piirin suojauksessa, valvonnassa ja mittauksessa käytettäville maan potentiaalissa oleville releille ja mittareille sopiviksi virroiksi. Sen lisäksi eristää ensiö- ja toisiopiirit toisistaan. (ABB TTT 2000, 286.)

Virran mittaus on vaikeampaa kuin jännitteen, koska virran vaihtelu on suurempaa. Virtamuuntaja kuormittaa termisellä nimellisvirralla kaikissa lämpötiloissa. Terminen nimellivirta on yleensä 100 – 120 % nimellisvirrasta. Virtamuuntajat on mitoitettu toistamaan 50 Hz taajuisia sinimuotoisia virtoja. Yliaallot aiheuttavat virheitä virtamuuntajien toimintaan. (Mörsky 1992, 101.)

Virtamuuntajia on suunniteltu sekä mittaus- että suojaustarkoituksiin. Virtamuuntaja tarvitsee eri sydämet, koska suojaustarkoituksiin tulevan virtamuuntajan vaatimukset ovat erilaiset kuin mittaus-tarkoituksiin. Muuten virtamuuntaja on yhteinen fyysisesti sekä mittaus- että suojausmuuntajalle. Yksi virtamuuntajan valintaan vaikuttava tekijä on tarkkuusluokka. Tarkkuusluokka antaa virran mittauksessa syntyvän suurimman sallitun virtavirheen suuruuden. Se ilmoitetaan numeroarvona. (Mörsky 1992, 101.)

Energian mittaukselle on suurimmat vaatimukset. Esimerkiksi enintään 10000 GWh:n suuruiseen vuosittaiseen energiankulutukseen suositellaan tarkkuusluokkaa 0,5. Tätä suuremmilla kuormituksilla on valittava 0,2. Tarkkuusluokat 1 ja 3 ovat tyyppilliset tarkkuusluokat valvontamittauksessa. Suojauksessa yleisimpiä ovat 5 ja 10P tarkkuusluokat. (Elovaara ja Haarla 2011, 205)

Suojauksen tarkkuusluokan valinta riippuu relesuojausratkaisuista sekä käytetyistä releistä ja niiden mittausperiaatteesta. Yleisesti tarkkuusluokkaa 5P sopii keskijännitteille, koska siinä käytetään suljettuja sydämiä. Suurilla jännitteillä käytetään 10P, koska sydämissä on ilmarako ja 5P kulmavirhevaatimuksen täyttäminen on tällöin mahdotonta. Sydämen merkintä suojausvirtamuuntajassa on esimerkiksi 10P50. Numero 10 tarkoittaa yhdistettyä virhettä. P kirjain tarkoittaa sitä, että kyse on suojaussydäimestä (protection). Tarkkuusrajakerrointa tarkoittaa numero 50. Tarkkuusrajakerroin on määritetty puhtaalla vaihtovirralla. Virran tasakomponentti suurentaa virhettä ratkaisevasti. Tasa-

komponentin esiintyessä tulee virhe helposti virtamuuntajan tarkkuusluokkaa suuremmaksi. Sitten joudutaan valitsemaan huomattavasti suurempi tarkkuusrajakerroin, jos halutaan säilyttää sama tarkkuus. Tarkkuusrajakertoimet nimellisellä taakalla on standardoituna 5, 10, 15, 20 ja 30:n arvot. (Mörsky 1992, 112.) Oulunkylän suodatinlaitteisto sisältää pelkästään 10P10 virtamuuntajia. Ne on tarkoitettu ainoastaan suojaustarkoitukseen.

Virtamuuntajan nimelliset ensiövirrat ovat 10; 12,5; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60 ja 75A. Näitä virta-arvoja voidaan suurentaa kymmenkertaisina. Alleviivatut arvot ovat suositeltuja. Ensiövirtaa ei mielellään kannata valita turhan suureksi, koska releiden ja mittareiden herkkyysien kanssa voi tulla ongelmia. Virtamuuntajan nimellistoisiovirrat ovat 1 A, 2 A, ja 5A. Pienillä toisioisiovirroilla on kiinnitettävä huomiota toisiopuolen ylijännitteisiin. Sen vuoksi lyhyillä etäisyyksillä käytetään toisiovirran viittä ampeeria. Pitkissä toisiopiireissä tulee toisiokaapelin kuluttama teho kohtuuttoman suureksi. Tämä on otettava huomioon nimellistehon valinnassa. (Mörsky 1992, 106.) Suodatinlaitteiston virtamuuntajissa on ainoastaan 5A nimellistoisiovirrat. Virtamuuntajan toisiopiirin yksi piste ja kosketeltavissa olevat metalliosat on maadoitettava.

7 SUODATINLAITTEISTON KÄYTTÖÖNOTTO

Käyttöönotossa koko sähkölaitteiston suojausjärjestelmineen on tehtävä käyttöönottotarkastus. Käyttöönottotarkastus on säädetty laissa.

Sähkölaitteistolle on tehtävä käyttöönottotarkastus, jossa riittävässä laajuudessa selvitetään, ettei sähkölaitteistosta aiheudu sähköturvallisuuslain (410/96) 5 §:ssä tarkoitettua vaaraa tai häiriöitä. (Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös sähkölaitteistojen käyttöönotosta ja käytöstä 1996, 3§.)

Käyttöönottotarkastuksesta tulee laatia sähkölaitteiston haltijan käyttöön tarkastuspöytäkirja, jollei 2 momentissa muuta määrätä. Tarkastuspöytäkirjasta tulee käydä ilmi kohteen yksilöintitiedot, selvitys sähkölaitteiston säännönmukaisuudesta, yleiskuvaus käytetyistä tarkastusmenetelmistä sekä tarkastusten ja testausten tulokset. Tarkastuksen tekijä on allekirjoitettava tarkastuspöytäkirja. (Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös sähkölaitteistojen käyttöönotosta ja käytöstä 1996, 4§)

Suodatinlaitteiston sisäisten suojalaitteiden mm. epäbalanssisuojien toiminnat tulee tarkastaa valmistajan antamien ohjeiden mukaan. Käyttöönotossa laitteisto otetaan käyttöön valmistajan yksityiskohtaisten ohjeiden mukaan. (Sähköinfo Oy 2006.)

Suodatinlaitteiston käyttöönoton yhteydessä oli tarkastettava, mitattava tai koestettava seuraavaa:

- omakäyttökeskus – ja jakelu
- tasasähkökeskus ja – järjestelmä
- suojauslaitteiden koestus
- komponenttien mittaaminen ja koestus
- katkaisijan kiinnistöreleiden koestus
- kelojen viritys
- hälytyskeskus

Lopuksi katsottiin, toimiiko laite suunnitelmien mukaisesti.

7.1 Omakäyttökeskuksen tarkastus

Omakäyttömuuntaja muuntaa 400/230 V omakäyttökeskusta, joka syöttää omakäyttökuormaa. Omakäyttökuormituksia ovat esimerkiksi sähköaseman pistorasiat, valaistus, ilmastointi, lämmitys ja katkaisijoiden lämmitys. Lisäksi sieltä lähtee myös syöttö suodattimien yksinapaisten katkaisijoiden ohjaimen lämmitykseen. Katkaisijoiden lämmityksen jännite mitattiin katkaisijan ohjainyksiköstä. Omakäyttökeskus syöttää omana syöttönä vakiojännitetasasuuntaajia, jotka syöttävät omaa tasajännitekeskusta.

7.2 Tasasähkökeskuksen tarkastus

Tasasähkökeskuksesta toteutetaan tasasähkönjakelu sähköasemilla. Se syöttää alakeskuksia, jotka sijaitsevat lähellä kulutuspeiteitä eri puolilla sähköasemaa. Jokaista tasajännitekeskusta varmistaa akkuvarmennus, jonka avulla voidaan ohjata katkaisijat auki ja kiinni vian tultua tasajännitekeskukseen. Katkaisijoiden ohjausjännite on 110 V tasasähköjännitettä. Lisäksi tasasähkökeskus syöttää

hälytyskeskukseen +24 V jännitteen ja kaukokäyttökaapille +48 V jännitteen. Tasasähkökeskuksesta lähtee syöttö myös suodattimien yksinapaisten tyhjiökatkaisijoiden ohjainkoteloon. Katkaisijoiden ohjaussähkö mitattiin katkaisijan ohjainkotelosta.

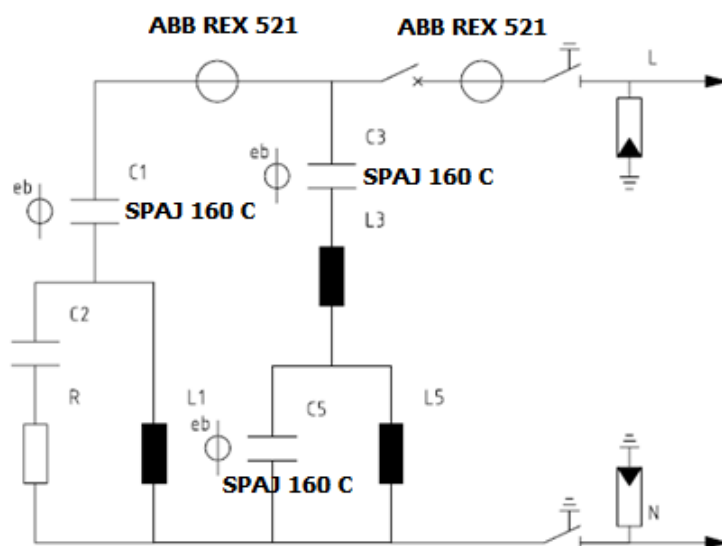
7.3 Suojareleiden koestus

Käyttöönottokoestuksessa kokeillaan käytännön toimintoja ja eri laitteiden toimintaa. Siinä mitataan releiden ja säätimien suureita ja simuloidaan käyttö- ja vikatilanteita. Mittauksilla varmistetaan laitteiston moitteeton toiminta käytön vaatimalla tarkkuudella. Ennen koestusta on tiedettävä jokaisen suojalaitteen, komponentin tai piirin käyttötarkoitus. Lisäksi koestus tulee suorittaa siten, että voidaan todeta, täyttääkö järjestelmä sille asetetut vaatimukset. Ennen relesuojauksen käyttöönottoa siihen liittyvät sähkölaitteet on todettava ja tarkastettava kaikin puolin kelpoiksi. (Mörsky 1992, 367.)

Sähköturvallisuusmääräykset edellyttävät, että yli 1000 V sähköaseman ylivirta- ja maasulkusuojien asettelut, toiminta ja kunto tarkastetaan kolmen vuoden välein. Sen lisäksi todetaan, että sähkölaitteet ja -laitteistot on suunniteltava, rakennettava, valmistettava ja korjattava sekä niitä on huollettava ja käytettävä niin, ettei niistä aiheudu henkeen, terveyteen tai omaisuuteen kohdistuvaa vaaraa eivätkä ne sähköisesti tai muulla tavoin kohtuuttomasti häiritse ympäristöään. (Mörsky 1992, 367.)

Suojareleet havahtuvat, toimivat ja palautuvat tarkkailemiensa suureiden muutosten perusteella. Rele pysyy normaalitilanteessa niin kauan, kuin tarkkaileman suureen toiminta-arvo ei sivuuta asetettua toiminta-arvoa. Releen tarkkaileman suureen ylittäessä sille asetellun toiminta-arvon rele havahtuu. Jos rele on havahtuneena tarpeeksi kauan, se antaa laukaisukäskyn katkaisijalle ja lähettää hälytyksen. Rele palautuu, jos mittaussuure poistuu toiminta-alueelta havahtumisaikana tai releen toimittua. Toiminta-ajaksi sanotaan vian laukaisuun tai hälytykseen kuluva aika. Sitä voidaan halutessaan pidentää asettelemalla releelle hidastus. Palautumisajaksi kutsutaan sitä, kun rele palautuu mittaussuureen pienentyessä alle asetteluarvon. Vian alkamisen ja vikapaikan verkosta erottamisen välillä olevaa aikaväliä sanotaan vian erotusajaksi. (Elovaara ja Haarla 2011, 344.)

Kaikille releille laitetaan asetteluarvot. Asetteluarvojen releet koestetaan niiden asettelualueen alimmalla ja ylimmillä arvoilla. Releen päätarkoituksena on, että asetteluarvojen ylittyessä rele tekee hälytyksen ja laukaisee katkaisijan.



KUVIO 13. Sähköaseman suodatin ja suojarleet (suunnittelu.)

Mekaanisissa ja staattisissa releissä toteutettujen suojauskien ensiö- ja toisiopiirit voidaan koestaa monella eri tavalla. Koestustapaa voidaan käyttää harkinnan ja olosuhteen mukaan. Koestustavat ovat seuraavia:

- suojauskien ensiökoestus
- suojauskien toisiokoestus
- suojauskien valehäiriökoestus
- suojarleiden koestus. (Mörsky 1992, 366.)

Ensiökoestus on kaikkein luotettavin, koska se kattaa kaikki suojauskissa mukana olevat laitteet. Siinä mittamuuntajien ensiön tai ensioreleen kautta syötetään koestusvirta ja -jännite. Katkaisijan toimiessa järjestelmä on tarkastettu. Suojauskien toisiokoestuksessa toimintatapa on vähän erilainen. Toisiopiirit irrotetaan aluksi mittamuuntajista, minkä jälkeen toisiopiiriin syötetään koestusvirta ja -jännite. Eri koestussuureiden arvoilla tarkkaillaan releen toimintaa. Laukaisupiirin toiminta tarkastetaan laukaisemalla katkaisija tai mittaamalla laukaisupiirin kunto, jos käyttötekniset haitat katkaisijan toimimisessa ovat huomattavat. Suojauskien valehäiriökoestuksessa tehdään tarkoituksellisesti ensiöpuolen vika jännitteeseen johtoon ja todetaan suojauskien toiminta. Suojarleiden koestuksessa voidaan rele irrottaa suojauspiiristä ja kytkeä sähkölaitteistoon, josta saadaan tarvittavat koestusvirrat ja -jännitteet. (Mörsky 1992, 366.)

Releen koestuksen ensimmäisenä vaiheena testattiin releen näyttämä ensiökoestuksena, jolloin virtamuuntajan ensiöpuolelle syötettiin nimellisvirta ja releen piti näyttää saman verran kuin ensiön virta. Muuten Oulunkylän suodatinlaitteiston kaikkien releiden koestuksessa käytettiin suojauskien toisiokoestusta. Releen testauksessa käytettiin Omicron CMC 256-6 releen testaus- ja kalibroitimittaria (kuva 6). Mittari on tarkoitettu suurta tarkkuutta vaadittuihin sovelluksiin.



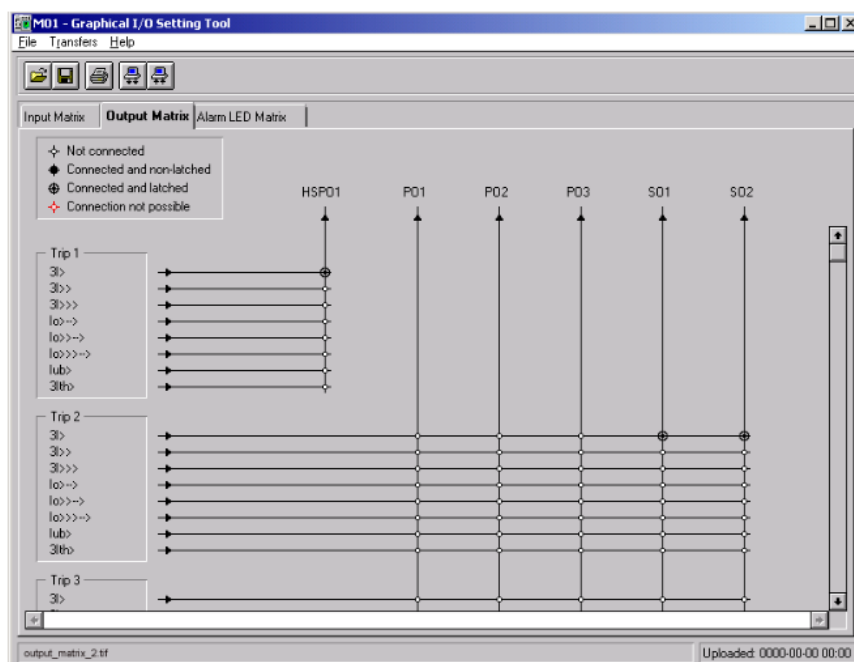
KUVA 6. Omicron CMC 256-6 mittari

7.3.1 ABB REX 521 -johdonsuojareleen koestus

Koestus tehtiin seuraavassa järjestyksessä:

- johdotusten tarkistus
- releasettelujen tekeminen releelle
- mittauksen toiminnan tarkistus releeltä
- asetteluarvojen koestus
- asetteluarvojen koestus yliaalloilla.

Releen koestukset aloitettiin ABB REX -johdonsuojareileiltä. Kaikki johdotukset käytiin läpi koko järjestelmässä, mahdollisten kytkentävirheiden varalta. Suojarele sisältää paljon erilaisia ulkoisia parametreja. Suojareleen ulkoiseen parametrisointiin käytettiin Relay Setting Tool ja Graphical I/O Setting Tool-työkalua (kuva 7). Parametreja voidaan asettaa PC:llä ja siitä siirtää suojareleelle sarjaliittymän kautta. Ulkoisen parametrisoinnin helpottamiseksi Relay Setting Tool -työkaluun on lisätty oma Graphical I/O setting Tool - asettelutyökalu REX 521-relettä varten. Työkalulla asetellaan tulojen, lähtöjen ja hälytysdiodien kytkinryhmät (ABB 2004.)



KUVA 7. Graphical I/O setting tool – asettelutyökalu (ABB 2004.)

Jokaisessa relesarjassa on omat ohjelmansa, joissa on erilaisia toimintoja. 500-sarjan releissä on vikatalenne. Ohjelmassa on myös eri suojauslohkoja, joista voidaan valita suojaustoimintoja, ohjaustoimintoja, mittaustoimintoja, kunnonvalvontatoimintoja, sähkönlaadunvalvontatoimintoja ja perustoimintoja. Rele on myös ohjelmoitu mittaamaan kaikkia taajuuksia.

Ensiöpuolen koestuksessa on aluksi tarkistettava releen näyttämä näytöltä. Koestuksessa oli otettava huomioon virtamuuntaja nimellisvirta. 500 A virta syötettiin Programma virransyöttöyksiköllä (kuva 15) virtamuuntajan ensiöpuolelle, ja releen näyttämä oli 500 A. Tarkistus tehtiin aluksi pienillä virroilla. Itse koestus tehtiin toisiopuolen koestuksena.

Suojauksen toimintanopeuteen voidaan vaikuttaa suojaustavan valinnalla, jolla on merkittävä vaikutus oikosulkuun aiheuttamiin haittoihin. Nopeammalla suojauksella vaarat, vahingot ja termiset rasitukset jäävät pienemmiksi. Lisäksi oikosulun aiheuttama jänniterasitus jää lyhyemmäksi, jos suojaus toimii nopeasti. Yksinkertaisin tapa toteuttaa selektiivinen suojaus on käyttää aikaselektiivisyyttä. Periaatteena on porrastaa suojauksen toiminta-aikoja siten, että aina lähimpänä vikakohtaa oleva rele toimii ensin. Aikaselektiivinen suojaus toteutetaan ylivirtareleillä. Ylivirtareleet toimivat kahdella eri tavalla, joko vakioaikaisina tai käänteisaikaisina. (ABB TTT, 217.) Vakioaikaylivirtarele havahtuu mitausvirran ylittäessä asetteluarvon ja toimii, kun se on ollut havahtuneena asetteluajan. Rele palautuu asetteluarvon virran laskiessa riittävästi. Käänteisaikaylivirtareleen toimintahidastus on virtaan nähden käänteinen, eli rele laukaisee suurivirtaiset releet nopeammin kuin pienivirtaiset. (Elovaara ja Haarla 2011, 346.)

REX 521 -johdonsuojarele toimii vakioaikaisena, jolloin toimintanopeus ei riipu mitatun virran suuruudesta. Virtamuuntajalta saadaan tieto suojareleelle, joka ylivirran havaittuaan ohjaa katkaisijan auki asetellulla toiminta-ajalla ($t>$). Asetteluarvoa eli havahtumisvirtaa suurempia virtoja tulkitaan ylivirtoina ($I>$). Releelle voidaan antaa erilaisia toimintaparametreja, joiden mukaan rele toimii kuten pikalaukaisu ($I>>$, $t>>$) ja aikalaukaisu ($I>$, $t>$). Releen asetteluissa otettiin käyttöön kaksi edellä mainittua ylivirtasuojausporrasta. Ensimmäistä ylivirtasuojausporrasta $I>$ kutsutaan myös nimellä perussuojausporras. Tämän suurin mahdollinen virta-asettelu (eli havahtumisarvo) määräytyy johtolähdön pienimmän oikosulkuvirran mukaan. Toista ylivirtasuojausporrasta $I>>$ kutsutaan nimellä momenttisuojausporras. Releiden testauksessa käytettiin Omicronin testausohjelmaa tietokoneella. Koko suodattimen suojauksessa käytettävän releen asettelut olivat seuraavat:

$I>>750A$	$t = 0,05s$	$1,5 \times I_n$
$I>625A$	$t = 0,3s$	$1,25 \times I_n$

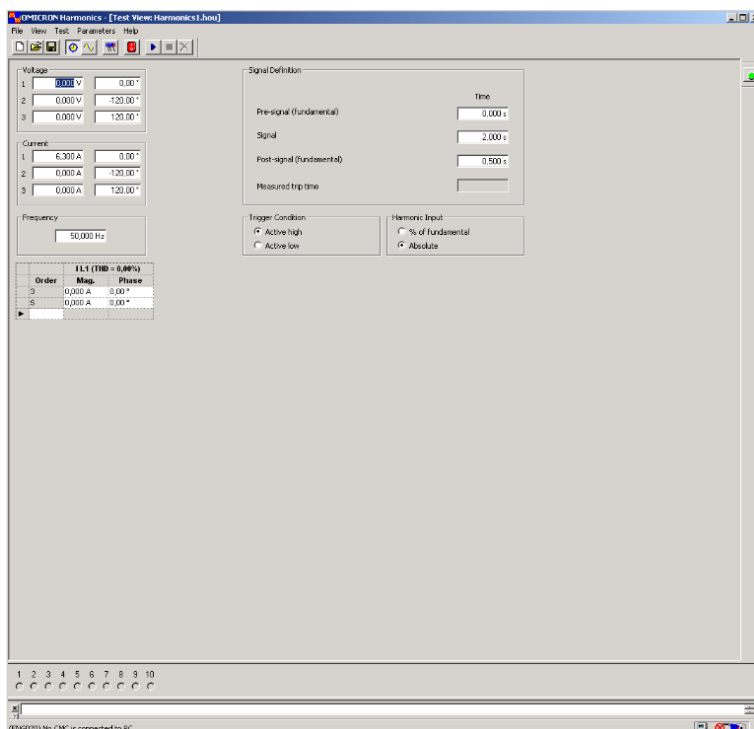
Ensimmäisen ja toisen ylivirtaportaan toiminta-aikaero on suuri (0,25s), koska silloin tiedetään selvästi, kumpi ylivirtaportaista toimii. Numeroarvoja syötettäessä tietokoneen ohjelmaan oli otettava huomioon virtamuuntajan muuntosuhde ja ylivirtaportaan kerroin. Koestuksen tarkoituksena oli testata releen toiminta virroilla, joka on asetteluarvoa pienempi sekä suurempi.

Ensimmäiseksi testattiin toisen ylivirtaportaan toiminta. Toisessa ylivirtaportaassa piti tulla hälytys asetteluarvon ylittyessä. Koestuksessa aluksi katsottiin releen toiminta alle asetteluarvon olevilla virroilla. Rele ei saanut toimia ennen kuin asetteluarvo on ylitetty. Virtaa nostettiin portaittain kohti asetteluarvoa. Asetteluarvon ylittyessä rele havahtui ja asetellun toiminta-ajan ylittyessä hälytys tuli releelle ja hälytystaululle. Releen toiminta-aika ja virta-arvo merkattiin mittauspöytäkirjaan. Ensimmäisessä ylivirtaportaan koestuksessa tehtiin samalla tavalla kuin edellisessä. Asetteluarvojen ja toiminta-ajan ylittyessä katkaisija laukesi ja hälytys toimi.

Suodattimen tarkoitus on suodattaa nimenomaan kolmatta ja viidettä yliaaltoa. Omicronin monipuolisten toimintojen ansiosta sillä voidaan testata, miten rele käyttäytyy eri taajuuksilla. Rele oli ohjelmoitu niin, että se mittaa kaikkia taajuuksia. Omicron harmonics ohjelmaan voitiin valita, mille taajuuksille virtaa syötetään. Ennen taajuuksien syöttämistä Omicronista releelle oli laskettava taajuuksien virta-arvot. Virta-arvojen määrittämisessä käytettiin apuna seuraavaa kaavaa:

$$I = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2} \quad (1)$$

Kaavaa apuna käyttäen laskettiin perustaajuuden virran, kolmannen ja viidennen yliaaltovirran summa alle asetteluarvon. Tämän jälkeen syötettiin perustaajuuden virta, kolmannen ja viidennen yliaallon virta Omicron Harmonics tietokoneohjelmaan (kuva 8). Sen jälkeen syötettiin samat taajuudet kuin edellisessä eri arvoilla siten, että virran summa ylittää asetteluarvon. Rele havahtui asetteluarvon ylittyessä ja toiminta-ajan ylittyessä laukaisi katkaisijan.



KUVA 8. Yliaaltosuojausten testausohjelma (valokuva Kalle Karhumaa.)

Laajakaistaosuutta suodattimessa suojaa 100/5 virtamuuntaja. Laajakaistaisessa osuudessa suojarieleenä on myös ABB REX 521 johdonsuojarele. Releen asettelut olivat seuraavat:

$I > 500A$	$t = 0,05s$	$5 \times I_n$
$I > 250A$	$t = 0,3s$	$2,5 \times I_n$

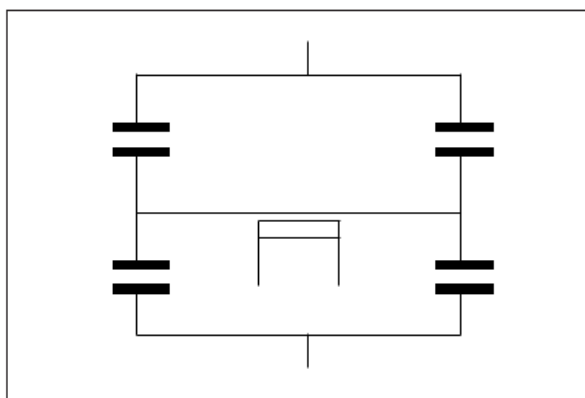
Ensiöpuolen koestuksessa oli aluksi tarkistettava releen näyttämä näytöltä. Koestuksessa oli otettava huomioon virtamuuntaja nimellisvirta. 100 A virta syötettiin Programma virransyöttöyksiköllä (kuva 15) virtamuuntajan ensiöpuolelle, ja releen näyttämä oli 100 A. Tarkistus tehtiin aluksi pienillä virroilla. Itse koestus tehtiin toisiopuolen koestuksena. Toisiopuolen koestuksessa täytyi myös ottaa huomioon virtamuuntajan muuntosuhde ja ylivirtaportaan kerroin. Testauksissa tehtiin muuten samat toimenpiteet kuin edellisessä releessä.

7.3.2 Kondensaattoripariston suojariele SPAJ 160 C koestus

Koestus tehtiin seuraavassa järjestyksessä:

- johdotusten tarkistus
- releasettelujen tekeminen releelle
- mittauksen toiminnan tarkistus releeltä
- asetteluarvojen koestus.

Rele mittaa kondensaattoriparistoissa mahdollisesti syntyvän epäbalanssivirran. Epäbalanssivirtaa mittaava virtamuuntaja on kytketty yksivaihesillan haarojen väliin (kuva 9). Jokaisen kondensaattoripariston suojana on 5/5 virtamuuntaja.



KUVA 9. Virtamuuntaja yksivaihesillan haarojen välissä (ABB 1999.)

Normaalitilanteessa virtamuuntajien erovirta on nolla. Paristot on myös suojattu sisäisillä sulakkeilla ja silloin kun erovirta nousee liian suureksi, kondensaattoreiden sulakkeet rikkoutuvat sisältä. Erovirran noustessa asetteluarvojen yläpuolelle rele hälyttää ja laukaisee katkaisijan. Virta voi nousta väärinlaisen ryhmittelyn tai asennuksen seurauksena. Kondensaattorin sulakkeen palaessa joudutaan vaihtamaan koko kondensaattori.

Kondensaattoripariston suojarieleen tyyppi on monitoimisuojarele. Monitoimisuojareleessä yhdistyvät ylikuormitussuojaus, epäsymmetriasuojat ja alivirtavalvonta. Alivirtavalvonta toimii vakioaikaisesti.

Sen tehtävänä on valvoa kondensaattoriparistossa tapahtuvaa virran alenemista. Epäsymmetriasuojauksen tarkoituksena on kytkeä viallinen kondensaattoriparisto irti verkosta. Näin saadaan esitettyä se, että mihinkään sen yksiköstä ei kohdistuisi yli 10 % ylijännite. Epäsymmetriasuoja mittaa vain virran perustaajuista komponenttia. Suojaukseen kuuluu hälyttävä ja laukaiseva toimintaporras. Laukaisuporras toimii käänteisaikaisesti ja sen ominaiskäyrä vastaa jyrkkyydeltään "Normal Inverse"-standardikäyrästä. Käyrästä noudattavat seuraavaa matemaattista kaavaa:

$$t[s] = \frac{k \cdot 101.2}{\left[\left(100 \cdot \frac{\Delta I}{\Delta I_{2>}} \right)^{-97} \right]} + 0,02 \quad (2)$$

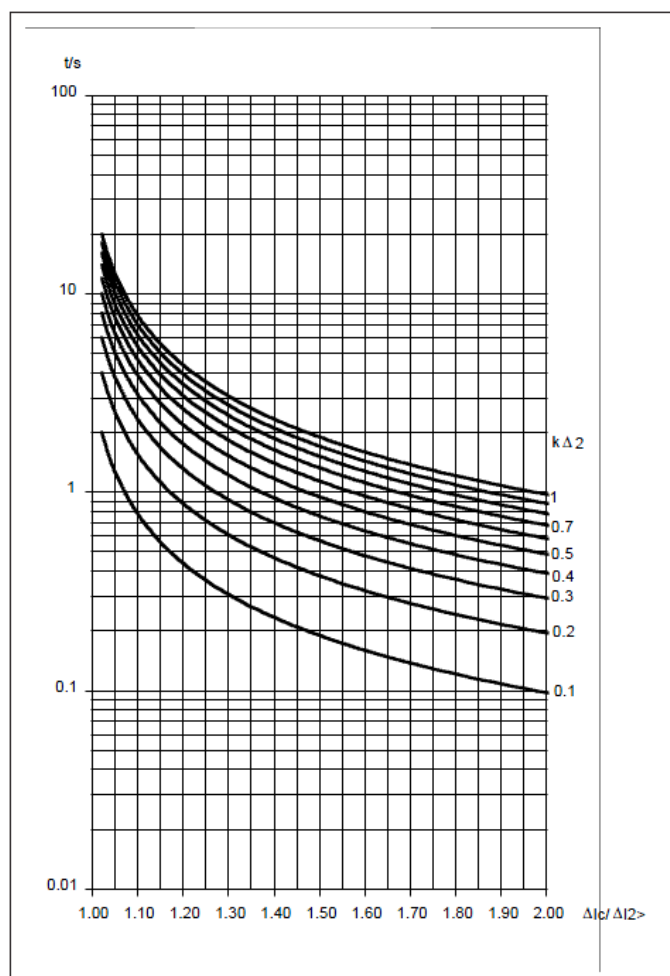
, jossa t = toiminta-aika sekunteina

k = aseteltava aikakerroin

ΔI = mitattu virta

$\Delta I_{2>}$ = aseteltu havahtumisvirta

Havahtumisvirran asettelualue on 2...80 % releen nimellisvirrasta. Aikakertoimen k avulla voidaan säätää käyrästä jyrkkyyttä (kuvio 14). Asettelualue on 0,1...1. (ABB 1999.)

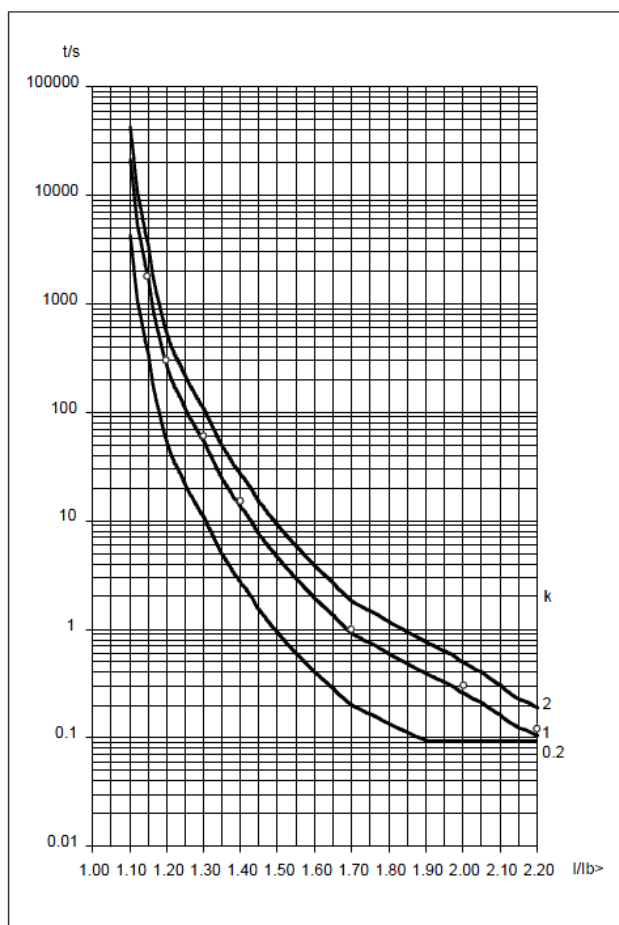


KUVIO 14. Kondensaattoripariston suojausmoduulin SPCJ 4D40 epäsymmetriavirran käänteisaikatoiminto (ABB 1999.)

Ylijännitesuoja mittaa ylijännitteen huippuarvoa ottaen huomioon yliaallot 13. yliaaltoon saakka. Ylikuormitussuoja on kaksiportainen. Ensimmäinen porras hälyttää ja toinen laukaisee. Hälytysporras toimii vakioaikaviiveen mukaisesti. Sen havahtumisarvo ja toiminta-aika voidaan asettaa tarpeen mukaan. Tällöin releen laukaisevan portaan asettelualue on 0,3...1,5 kertaa nimellisvirta ja hälyttävän portaan asettelualue on 0,8...1,2 kertaa laukaiseva porras. Laukaisuporras toimii käänteisaikaperiaatteella. Sen ominaiskäyrästä vastaa standardien ANSI/IEEE C37.99 ja IEC 60871-1 mukaista kondensaattoriparistojen aikariippuvaista jännitelujuutta. Aikakertoimen k avulla voidaan käyrästä jyrkkyyttä säätää (kuvio 15). Asettelualue on 0,2...2. Minimitoiminta-aika on 100ms. (ABB 1999.)

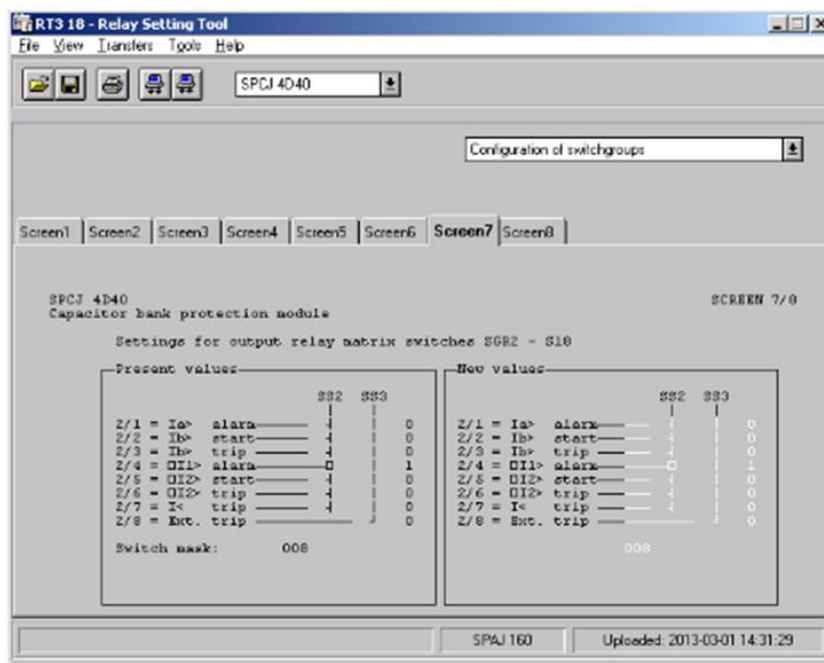
Taulukko 3. ANSI-ominaiskäyrät (ABB 1999.)

$I/I_b >$	t (s)	toiminta-aika (s) standardin mukaan	
1,15	1620	1800	IEC 871-1
1,20	270	300	IEC 871-1
1,30	54	60	ANSI 18-1980, IEC 871-1
1,40	13,5	15	ANSI 18-1980
1,70	0,9	1	ANSI 18-1980
2,00	0,27	0,3	ANSI 18-1980
2,20	0,10	0,12	ANSI 18-1980

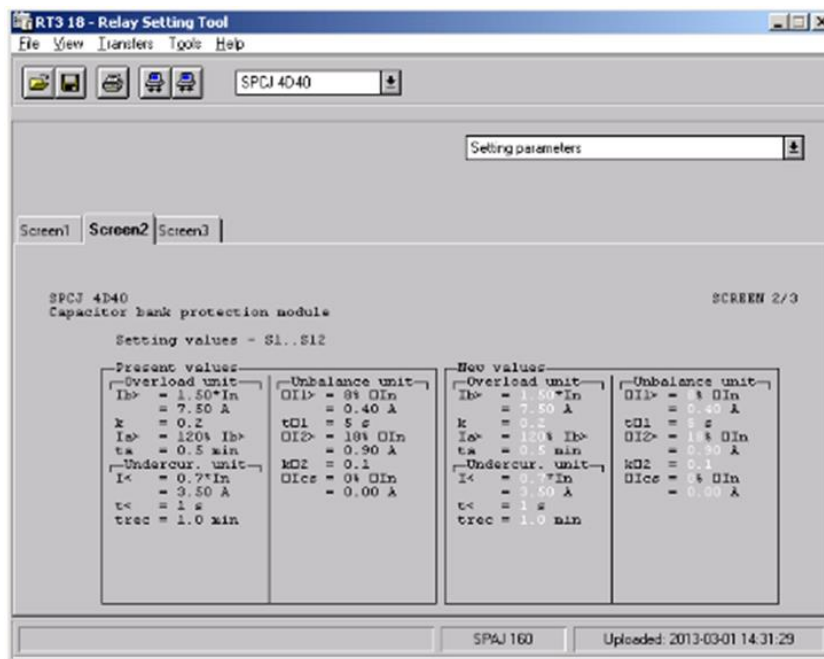


KUVIO 15. Kondensaattoripariston suojailemoduulin SPCJ 4D40 ANSI-käänteisaikatoiminto (ABB 1999.)

Jokaiselle kondensaattoripariston suojareleelle on erilaiset asetellut ja suositukset on saatu kondensaattoripariston toimittajalta. Releen mukana tuli ohjelma, jolla voitiin laittaa tarvittavat asetellut releelle. Releelle laitettiin hälytys ja laukaisuasetellut (kuva 12). Lisäksi joka releelle aseteltiin epäbalanssiyksikön arvot kondensaattoripariston toimittajan saadun suosituksen mukaan (kuva 13).



KUVA 10. Esimerkki hälytyksien asetelluista (valokuva Kalle Karhumaa.)



KUVA 11. Esimerkki epäbalanssiyksikön arvojen asetelluista (valokuva Kalle Karhumaa.)

Releen testauksessa käytettiin Omicronin Quick CMC ohjelmaa. Releessä on kaksi mittatuloa ja 5A mittatulo kytkettiin releelle. SPACOM-sarjan releissä tulokset saadaan prosentteina. Jokaisessa releessä oli erilaiset asetelluarvot. Erään SPAJ 160 C releen asetellut olivat seuraavat:

Hälytys 0,1 A (5s)	0,02 x In
Trip 0,4 A (0,1s)	0,08 x In

Ensiöpuolen koestuksessa oli aluksi tarkistettava niin kuin edellisten releiden koestuksessa, releen näyttämä näytöltä. Muuten koestus tehtiin toisiokoestuksena. Toisiopuolen koestuksessa esimerkiksi syötettäessä releelle 100 mA ja näytöltä saadaan tulokseksi 2 % asettelujen mukaisesti. Releelle tehtiin aluksi hälytyksen asetteluarvolle testit. Ensimmäiseksi testattiin pienemmillä virroilla kuin asetteluarvo. Sen jälkeen virtaa nostettiin portaittain kohti asetteluarvon rajaa. Asetteluarvon ylittyessä rele havahtui ja hälytti, kun se oli ollut havahtuneena asetteluajan. Tämän jälkeen tarkastettiin hälytykset releeltä ja hälytystaululta. Releen toiminta-aika sekä virran arvo merkattiin pöytäkirjaan. Sen jälkeen testattiin trip asetteluarvot samalla tavalla kuin edellisessä. Testauksessa piti katkaisijan aueta ja hälytys tulla releeltä syötettävän virran ylittäessä asetteluarvon. Sitten kokeiltiin isolla virralle releen toiminta. Syötettiin esimerkiksi 1 A virta, jolloin releen toiminta-aika oli jopa alle 1 sekunti. Tämä perustuu juuri Inverse-käyrän mukaiseen toimintaan. Tulokset merkattiin pöytäkirjaan. Lopuksi tarkistettiin hälytykset ja laukaisu syöttämällä suoraan virtamuuntajan toisiopuolelle virtaa yli asetteluarvon. Näin pystyttiin näkemään miten rele toimii käytännössä kun vika tulee kondensaattoriparistolle. Jokainen epäbalanssireleet koestettiin samalla tavalla ja asettelut laitettiin joka releelle kondensaattoriparistotoimittajan suosituksen mukaan.

7.4 Komponenttien mittaukset ja koestus

Jokaisen komponentin mittaaminen oli tärkeä suorittaa käyttöönnotossa. Sillä varmistettiin, että saadaan suodatin viritettyä ja kondensaattoriparistot eivät ole epäbalanssissa virtamuuntajaan nähden. Lisäksi sillä varmistettiin suojauksen toiminta. Seuraavat komponentit oli mitattava tai koestettava:

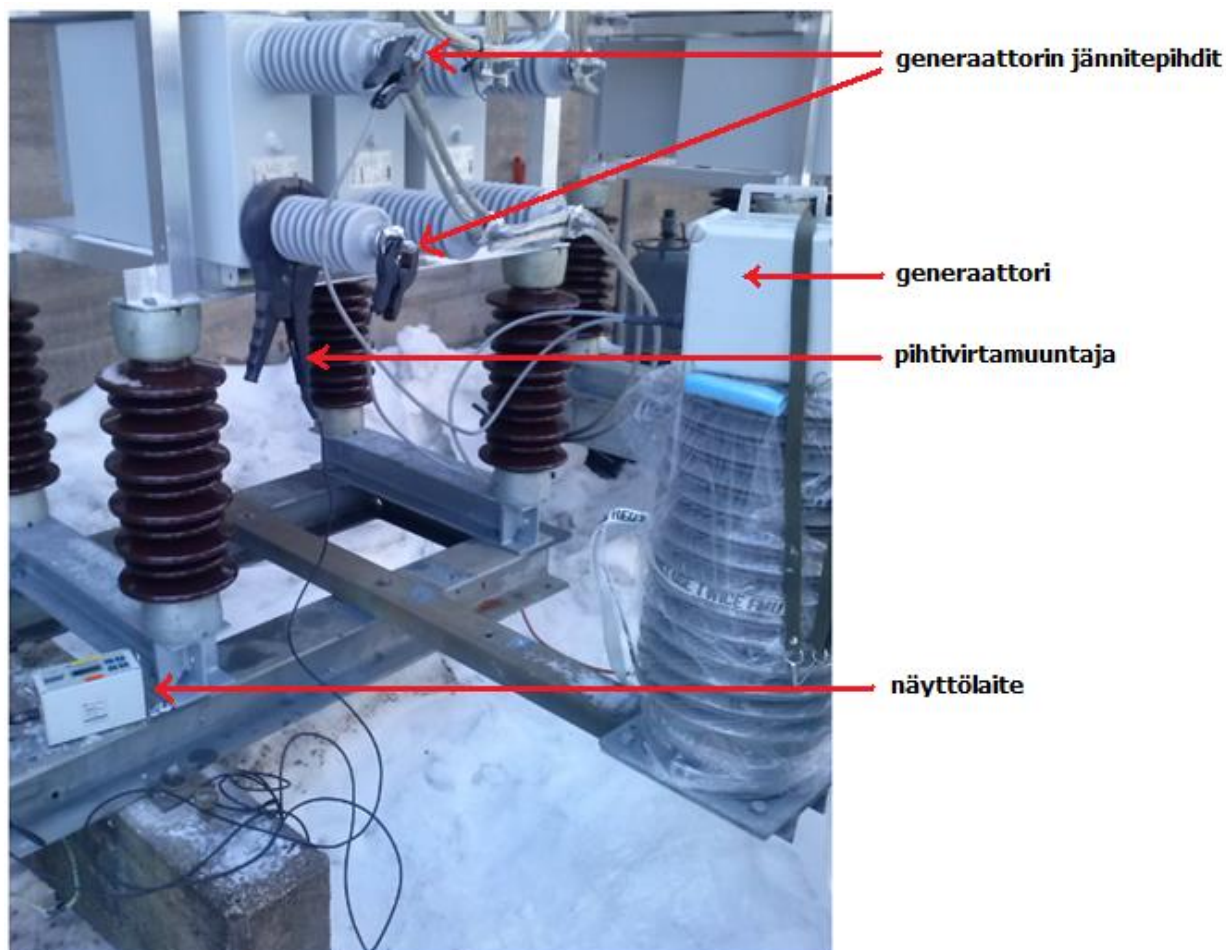
- kondensaattorien mittaukset ja kondensaattoriparistojen mittaukset
- kelojen mittaukset
- vastusten mittaukset
- virtamuuntajien mittaukset
- katkaisijoiden mittaukset ja koestus.

7.4.1 Kondensaattorien ja kondensaattoriparistojen mittaukset

Kondensaattoreiden mittaukset suoritettiin NCM-20 kapasitanssimittarilla. Mittarilla voidaan mitata kondensaattorin kapasitanssin, purkamatta yksiköiden välistä johdotusta. NCM-20 on kannettava ja akkukäyttöinen koostuen erillisestä näyttöyksiköstä ja testigeneraattorista ja se soveltuu kenttäkäyttöön. Mitattu kapasitanssi luetaan näyttöyksikön 3-numeroiselta nestekidenäytöltä ja generaattoriosassa on sisäinen kalibroitikondensaattori.

Ennen mittauksen aloitusta näyttöyksikkö oli kalibroitava sisäänrakennetulla kalibroitikondensaattorilla mittaussjohtimien vaikutuksen poistamiseksi. Näytöllä aluevalinta täytyi olla 200 μf , jotta kalibroitinta olisi mahdollisimman tarkka. Jännitepihdit kytkettiin generaattoriin. Pihtien leukoja ei tarvinnut kytkeä mihinkään. Pihtivirtamuuntaja kytkettiin generaattorin kahvan ympärille ja näyttölaitteiden kalibroitipainikkeilla näytön lukema aseteltiin samaksi kuin generaattorin kahvan alle teipattu kalibroitikondensaattorin kapasitanssi.

Ennen mittaustapahtumaa oli varmistettava huolellisesti kondensaattorin varauksettomuus, koska sen purkautuminen generaattorin lähtöön voi vaurioittaa laitetta. Mittaustapahtuma aloitettiin kytkemällä generaattorin jännitepihdit pariston rinnankytkettyjen kondensaattoriyksiköiden kytkentäjohdtimeihin. Lisäksi kytkettiin pihtivirtamuuntaja kondensaattorin eristimen ympärille (kuva 14). Mittaukset kirjattiin pöytäkirjaan ja vertailtiin kondensaattorin kilpiarvoihin.



KUVA 12. Käytännön mittaustapahtuma (valokuva Kalle Karhumaa.)

Kondensaattorien mittausten jälkeen suoritettiin kondensaattoriparistojen mittausta. Kondensaattoriparistojen kokonaiskapasitanssit mitattiin samalla mittarilla, mutta se kytkettiin mittaamaan koko kondensaattoriparistoa.

7.4.2 Kelojen mittaukset

Kelojen mittausta suoritettiin Megger Sverker 780 releen testausyksiköllä ja Fluke 289 yleismittarilla. Yleismittari kytkettiin mittaamaan kelan virtaa. Sverker 780 testausyksiköltä syötettiin 10 V jännitettä ja yleismittarilta otettiin virta-arvot ylös. Ennen kuin mittaauksella saatu arvoa voitiin verrata kilpiarvoihin, oli laskettava kelan suure kaavalla. Laskettaessa käytettiin seuraavaa kaavaa:

$$L = \frac{U_L * \omega}{I} \quad (3)$$

Lisäksi oli tarkastettava kelojen maadoitus.

7.4.3 Vastusten mittaukset

Vastuksen mittaukset suoritettiin suoraan vastuksen napojen päistä Fluke 289 yleismittarilla. Mittauksen tulosta vertailtiin vastuksen kilpiarvoihin.

7.4.4 Virtamuuntajien mittaukset

Ennen käyttöönottoa oli virtamuuntajilta tarkistettava muutamia tärkeitä asioita, koska näin mittaukset onnistuvat ja saadaan paras mahdollinen lopputulos. Virtamuuntajilta on tarkistettava seuraavaa:

- nimellisarvot
- toisiopiirit releille ja mittareille
- maadoitus
- muuntosuhteet.

Mittamuuntajien muuntosuhteiden mittaukset suoritettiin Programma 600A virransyöttöyksiköllä ja Fluke 289 yleismittarilla (kuva 15). Virransyöttöyksiköltä syötettiin vaihtovirtaa virtamuuntajan nappoihin ja yleismittarilta saatiin tarkka arvo syötettävästä virrasta. Muuntosuhteen mittauksen tarkoituksena oli syöttää virtamuuntajalle ensiöpuolen verran virtaa ja toisiopuolelta mittarin pitäisi näyttää toisiopuolen virran arvo. Rele näyttää kuitenkin saman virran kuin virtamuuntajan ensiön nimellivirta. Virran syöttö toisiopuolelle aloitettiin ensin pienillä virroilla ja suurennettiin kohti virtamuuntajan maksimivirran rajaa. Näin vältetään turhilta laiterikoilta, jos virtamuuntajassa on vika. Jokainen releen muuntosuhde mitattiin samalla tavalla ja kirjattiin tulokset pöytäkirjaan.



KUVA 13. Programma 600 A virransyöttöyksikkö ja Fluke yleismittari (valokuva Kalle Karhumaa.)

7.4.5 Katkaisijoiden mittaukset ja koestus

Käyttöönoton yhteydessä katkaisijoille tehtiin koestus, jossa tarkastettiin täyttääkö katkaisija sille asetetut vaatimukset ja määritettiin toimintasuureiden perusarvot, joihin verrataan myöhemmissä kunnossapitomittauksissa saatuja arvoja. Katkaisijalle tehtiin myös tarkastuksia asennuksen laadun takaamiseksi. Katkaisijalle oli tehtävä seuraavia koestusmittauksia ja tarkastuksia:

- dippikytkimien säätö
- katkaisijoiden toiminta-ajat
- koskettimien ylimeno-resistanssi
- aistinvarainen tarkastus
- mekaaninen tarkastus
- eristimen tarkastus
- katkaisijan sijainnin tarkastus
- päävirtateiden tarkastus
- maadoitusten tarkastus
- katkaisijalta tulevien hälytyksien testit
- kaukokäyttö
- toiminta vikatilanteissa.

Katkaisija sisältää myös laskurin, jonka arvot on syytä ottaa ylös huoltovälin määrittämiseksi. Yksinapainen tyhjiökatkaisijan ohjainyksikön MABS piirikortilla on dippikytkimiä. Dippikytkimistä voitiin säätää esimerkiksi ohjauksen jännite ja energiavikahälytys. Lisäksi kortilta voitiin valita ohjaus paikalliseksi tai kaukokäytölle. Nämä oli hyvä tarkistaa ennen varsinaista käyttöönottoa. Suojauksen kokonaisuutena vaikuttaa kolme asiaa siihen pisteeseen, että katkaisija on auki. Nopeuteen vaikuttaa suojariekin aikahidastus, apureleiden toimintaviive sekä katkaisijoiden toiminta-aika. Katkaisijan toiminta-aika mitattiin Megger Egil katkaisijan analysointilaitteella (kuva 16).



KUVA 14. Megger Egil katkaisija analysointilaitteella (valokuva Kalle Karhumaa.)

Analysaattorilla mitattiin katkaisijan kiinni-auki ohjaus. Seuraavaksi mitattiin erikseen normaali kiinniohjaus ja aukiohjaus. Katkaisijoiden ylimenovastus mitattiin Programma Mikro-ohmimittarilla (kuva 17). Mittarilla syötettiin 400A tasavirtaa ja saatiin tulokset mittarin digitaaliselle näytölle. Mittarilla voi myös mitata, erottimet, kiskoliitokset, veitsisulakkeet, erilaiset muut liitoskohdat ja maadoitusverkot.



KUVA 15. Programma micro-ohmi mittari

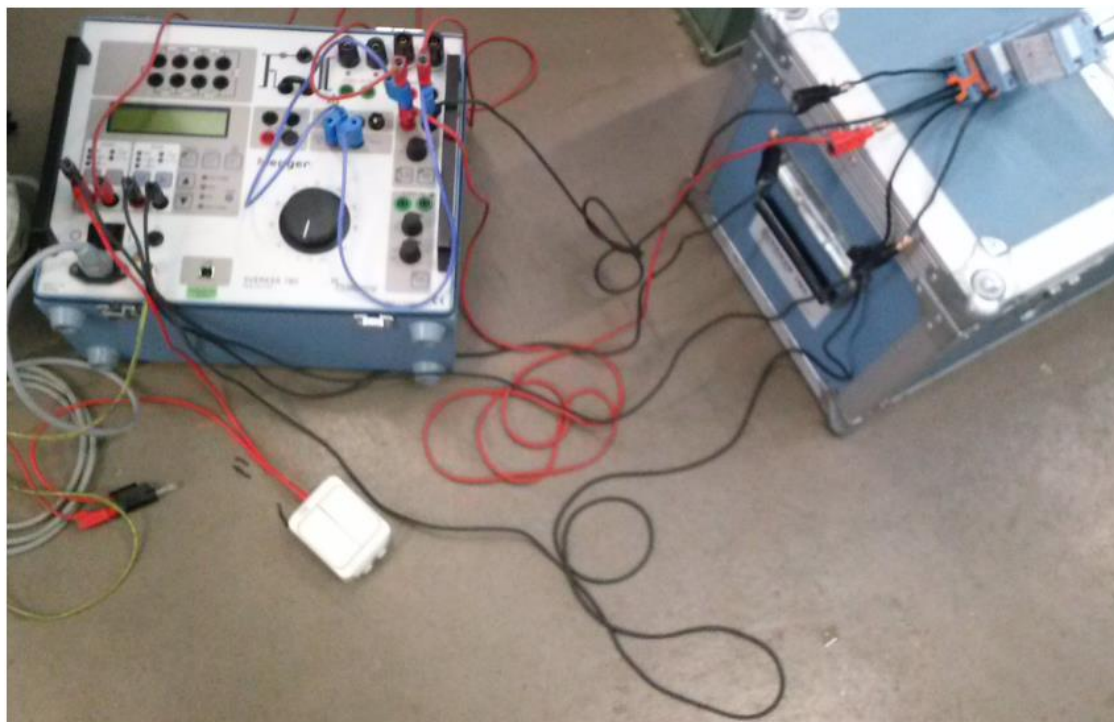
7.5 Kiinniohjauksen estoreleen koestus

Suodattimen lisäsuojaksi on asennettu kiinniohjauksen estorele, jolla estetään katkaisijan kiinniohjaus ennen kuin kiinniohjauksen estoreleelle aseteltu aika on kulunut. Katkaisijan kiinniohjauksen estolla varmistetaan, että paristot purkautuvat ennen jälleenkytkentää. Purkausaika saatiin pariston toimittajalta. Rele oli päästöhidastettu rele. Kiinniohjauksen estoreleen koestuksen tarkoituksena oli tehdä seuraavaa:

- releen sähköpiirien tarkastus
- aika-asettelun tekeminen
- toiminta-ajan mittaus
- tarvittava säätö.

Katkaisijaa voidaan avata monesta eri paikasta. Katkaisija avautuu kaukokäytöllä, ohjaustaulun napilta, katkaisijan ohjaimesta ja suojareleen toimiessa. Katkaisijan avautuessa menee tieto päästöhidastetulle releelle. Tiedon tullessa releelle kiinniohjauksen piiri katkeaa ja päästöhidastettu rele pitää piiriä auki niin kauan, kun aseteltu katkaisijan kiinniastoaika on kulunut. Ennen koestuksen tekemistä oli tarkistettava kaikki kytkennät, koska näin varmistettiin releen toiminta. Releelle säädettiin katkaisijan kiinniastoaika releelle, toisin sanoen päästöarvon aika releeseen siinä olevasta potentiometristä. Tämän jälkeen kytkettiin mittarista releelle ja mitattiin releen päästöarvon aika (kuva 18). Kun päästöaika saatiin säädettyä haluttuun aikaan, kytkettiin rele paikalleen. Päästöajan mittaus suorit-

tiin Megger Sverker 780 releen testausyksiköllä. Yksikön digitaaliselta näytölle saatiin suoraan kiinniohjauksen estoaika.



KUVA 16. Kiinniohjauksen estoreleen koestus (valokuva Kalle Karhumaa.)

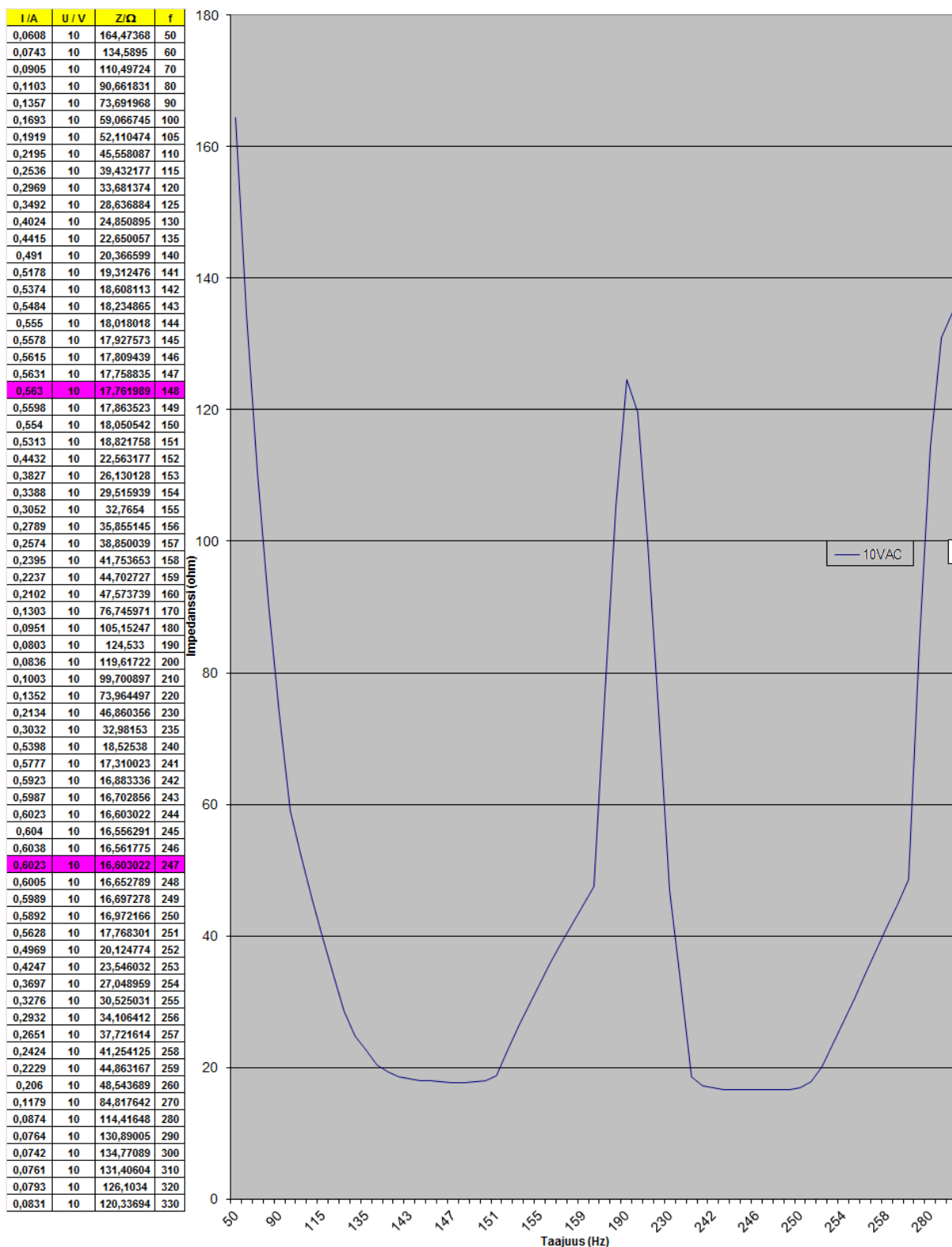
7.6 Suodattimen viritys

Suodattimen virityksen tarkoituksena on saada suodatin toimimaan oikealla tavalla. Virityksessä syötettiin suodattimeen jännitettä ja eri taajuuksia. Näiden avulla saatiin virta-arvoja, joiden perusteella voitiin piirtää nykytekniikkaa hyödyntäen suodattimen impedanssikäyrä. Impedanssikäyrästä nähtiin, miten suodatus toimii kolmannella ja viidennellä yliaallolla. Lisäksi nähtiin laajakaistaisen suodatuksen toiminta. Paras vaihtoehto oli saada impedanssin putoamaan ennen 150 Hz ja 250 Hz, koska silloin vältetään resonanssi-ilmiöltä. Suodattimen viritys tehtiin kelan väliottopisteiden kautta. Kelassa C3 ja C5 on väliottopisteet ja kummassakin kelassa on kolme väliottopistevaihtoehtoa. Viritys tapahtui vaihtamalla yhdistyslevyn paikkaa kelojen väliottopisteisiin; ja impedanssikäyrä muuttui sen mukaan, missä kohdassa oli kelan yhdistyslevy (kuva 19). Mittaukset tehtiin Omicron 256-6 releen testaus- ja kalibrointimittarilla, johon kytkettiin myös yleismittari. Tätä ennen oli tarkistettava huolellisesti, että kaikki kytkennät ja maadoitukset oli tehty suodattimella.



KUVA 17. Yksi kelan väliottopisteistä, jossa on yhdistyslevy paikallaan (valokuva Kalle Karhumaa.)

Omicronin ohjelmalla syötettiin jännitettä 10 V ja taajuutta nostettiin portaittain. Joka taajuuden jälkeen virta-arvot merkattiin Excelin laskentaohjelmaan. Valmiiseen Excelin laskentaohjelmaan alkoi muodostua suodattimen impedanssikäyrä. Kummastakin suodattimesta haettiin neljä eri impedanssikäyrävaihtoehtoa yhdistyslevyn paikkaa vaihtamalla kelojen väliottopisteisiin. Neljästä impedanssikäyrän vaihtoehdosta valittiin paras vaihtoehto (kuvio 16).



KUVIO 16. Suodattimen impedanssikäyrä (valokuva Kalle Karhumaa.)

7.7 Hälytyskeskuksen tarkastus

Relesuojauksen toteuttaminen merkitsee suurta määrää laukaisu-, hälytys-, ja merkinantoinformaatiota. Se tulee kerätä yhteen paikkaan, jossa se on nopeasti ja selkeästi havaittavissa. Tätä varten sähköasemilla on suunniteltu hälytyskeskus. Oulunkylän sähköasemalla hälytyskeskus on liitetty kaukokäyttö- ja automaatiojärjestelmään, jolloin valvontakohteesta voidaan ohjata esimerkiksi katkaisijoita. Suojareilla on hälytyksien jännite +24 V, joka menee hälytyskeskukseen hälytyksen ta-

pahtuessa. Hälytyskeskukselta lähtee tieto asennontoistoreleen kautta kaukokäyttökaapille. Kaukokäyttökaapilta hälytys jatkaa valokuituyhteyksiä pitkin suoraan valvomoon. Päivystäjä saa tiedon siitä, mikä vika on kyseessä, ja ilmoittaa viasta korjaajille. Suojareleiden hälytyksistä tarkastettiin alijännitteen<U, itsevalvonta IRF ja lämpösuoja LMP:n toiminta.

8 SUODATTIMEN TOIMINTA TYHJÄKÄYNNILLÄ

Suodattimelle tehtiin lopputestaukset 25 kV jännitteillä. Lopputestauksessa syötettiin jännitettä radalle päin suodattimen läpi. Päämuuntaja 1 koko suodattimen suojauksessa käytetyn ABB REX 521-releen tyhjäkäyntivirta oli 161,7 A. Laajakaistaosuuden suojauksessa käytetyn ABB REX 521-releen tyhjäkäyntivirta oli 116,6 A. Epäbalanssireleen tyhjäkäyntivirrat olivat seuraavat:

$C3 = 0,3 \% (0,015 \text{ A})$

$C1 = 2,5 \% (0,125 \text{ A})$

$C5 = 0,0 \% (0,0 \text{ A})$.

Päämuuntaja 2 koko suodattimen suojauksessa käytetyn ABB REX 521-releen tyhjäkäyntivirta oli 159,7 A. Laajakaistaosuuden suojauksessa käytetyn ABB REX 521-releen tyhjäkäyntivirta oli 114,7 A.

Epäbalanssisuojan tyhjäkäyntivirrat olivat seuraavat:

$C3 = 0,8 \% (0,4 \text{ A})$

$C1 = 4,7 \% (0,235 \text{ A})$

$C5 = 0,8 \% (0,04 \text{ A})$.

Käyttöönotto voitiin todeta kaikin puolin onnistuneeksi.

9 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä Oulunkylän sähköradan syöttöaseman suodatinlaitteistoon käyttöönotto. Opinnäytetyö aloitettiin tutustumalla työmaahan. Työmaalla tutustuin syöttöasemaan ja suodatinlaitteiston komponentteihin. Tutustumiskäynnillä suodatinlaitteistoa ei ollut vielä asennettu. Opinnäytetyön aluksi olin projekti-insinöörin apuna piirtämässä sähköpiirustuksia Hyvinkäällä työmaan kiireisen aikataulun vuoksi. Sähköpiirustuksia piirtäessä sai paremman käsityksen suojuuksista ja komponenttien toiminnoista. Olin myös asentamassa suodatinlaitteistoa loppuajana ennen käyttöönottoa.

Käyttöönotossa oli haasteellisinta releiden koestukset. Siinä onnistuttiin kuitenkin tosi hyvin. Lisäksi materiaalin kerääminen opinnäytetyön raporttiin oli todella haasteellista. Loppukuvien palautus ja suodatinlaitteiston käyttöönotto suoritettiin projektin aikataulun mukaisesti.

Olin viime kesänä asentamassa suodatintyyppi kolmosta toisella rataosuudella. Siitä oli apua opinnäytetyön tekemisessä. Suodatinlaitteiston käyttöönotossa suoritettavia toimintoja en ollut tehnyt aikaisemmin. Työ oli kokonaisuudessaan todella mielenkiintoinen ja sopivan haastava. Työ vaati tutustumista erilaisiin koestuksiin ja suojuksiin. Työn aikana sai myös tutustua erilaisiin mittareihin ja releisiin. Projekti tarjosi hyvän tilaisuuden tutustua suunnitteluun, asennuksiin sekä käyttöönottoon.

LÄHDELUETTELO

ABB 1999. SPCJ 4D40 Kondensaattoripariston suojarelemoduuli, käyttöohje ja tekninen selostus [verkkoaineisto]. [viitattu 2013-04-24]. Saatavissa: [http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/9c3ffa19284a2bdcc2256c7e0051aad4/\\$file/fm_spaj160c_fi_cac.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/9c3ffa19284a2bdcc2256c7e0051aad4/$file/fm_spaj160c_fi_cac.pdf)

ABB TTT 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita. Vaasa: Ykkös-Offset Oy.

ABB 2002. SPAJ 160 C Kondensaattoriparistojen suojarele [verkkoaineisto]. [viitattu 2013-02-12]. Saatavissa: [http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/9c3ffa19284a2bdcc2256c7e0051aad4/\\$file/fm_spaj160c_fi_cac.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/9c3ffa19284a2bdcc2256c7e0051aad4/$file/fm_spaj160c_fi_cac.pdf)

ABB 2004. Suojarele REX 521, Tekninen ohje, yleistä [verkkoaineisto]. [viitattu 2013-01-20]. Saatavissa: [http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/1ace541c82c08b3fc2256f250037fff5/\\$file/rex521techfid.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/1ace541c82c08b3fc2256f250037fff5/$file/rex521techfid.pdf)

ABB 2010. FSK II S +, Operating and Maintenance Manual. Meyrin: ABB.

ARO, Martti, ELOVAARA, Jarmo, KARTTUNEN, Matti, NOUSIAINEN, Kirsi ja PALVA, Veikko 2011. Suurjännitetekniikka. Helsinki: Otatieto.

ELOVAARA, Jarmo ja HAARLA, Liisa 2011. Sähköverkot II, verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Helsinki: Otatieto.

KARONEN, Tommi 2010. Epäsymmetrisen kuormituksen ja yliaaltojen mittaukset Mikkelin ammattikorkeakoulussa. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. [viitattu 2013-02-12]. Saatavissa: http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/13483/Karonen_Tommi.pdf?sequence=1

KAUPPA- JA TEOLLISUUSMINISTERIÖN PÄÄTÖS SÄHKÖLAITTEISTOJEN KÄYTTÖNOTOSTA JA KÄYTÖSTÄ 5.7.1996/517. Lainsäädäntö. SFS 2007.SFS-KÄSIKIRJÄ 600. Helsinki: SFS.

KORPINEN, Leena, MIKKOLA, Marko, KEIKKO, Tommi ja FALCK, Emil. Yliaalto-opus. [viitattu 2013-04-24]. Saatavissa: <http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/ylialto-opus.pdf>

LIIKENNEVIRASTO 2005. Ratatekniset määräykset ja ohjeet [verkkoaineisto]. [viitattu 2013-01-29]. Saatavissa: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/rato_5_sahkoistetty_rata.pdf

LIIKENNEVIRASTO 2012. Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 21 Liikkuva kalusto [verkkoaineisto]. [viitattu 2013-04-05]. Saatavissa: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lo_2012-21_rato_21_web.pdf

MÖRSKY, Jorma 1992. Relesuojaustekniikka. Hämeenlinna: Otatieto Oy.

NOKIAN CAPACITORS. Asennus-, käyttö- ja huolto-ohje.

SR2 2013. [viitattu 2013-03-16]. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Sr2>

SUOMEN RATAVERKKO 2013. [viitattu 2013-04-10]. Saatavissa:
http://fi.wikipedia.org/wiki/Suomen_rataverkko

SUOMEN RAUTATEIDEN SÄHKÖISTYSJÄRJESTELMÄ 2013. [viitattu 2013-03-03]. Saatavissa:
http://fi.wikipedia.org/wiki/Suomen_rautateiden_s%C3%A4hk%C3%B6istysj%C3%A4rjestelm%C3%A4

SÄHKÖINFO OY 2006. Yliaallot ja kompensointi. Tampere: Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry.

SÄHKÖVETURI 2013. [viitattu 2013-04-15]. Saatavissa:
<http://fi.wikipedia.org/wiki/S%C3%A4hk%C3%B6veturi>

TECHNICAL SPECIFICATION 2012. Liikennevirasto.

TIIPPANA, Erkki 2012. Diplomi-insinööri. Pohjoismaiden rautatiet. Nordisk Elteknisk Ingenjörsk Utbildnings. Power supply. Sastamala 20.11.2012. Luento.

TRAFI 2006. Sähköratamääräykset. [viitattu 2013-04-05]. Saatavissa:
http://www.trafi.fi/filebank/a/1337765556/74a7ed262ac3c2ea883111043e616524/9740-Kumottu_Sahkoratamaaraykset_B16.pdf

VR TRACK OY 2013. [viitattu 2013-04-07].
Saatavissa: http://www.vrtrack.fi/fi/index/vr_track_oy.html

LIITE 1 SALLITUT HARMONISET YLIAALTOVIRRAT 25 KV RATAJOHDOSSA

Taulukko 1- Sallittu yliaaltovirran tehollisarvo, kun summanimellisteho P = 1 MW ilman lämmitystä			
Yliaalto	Yliaalto	Yliaalto	Yliaalto
Taajuus	Virta	Taajuus	Virta
No / [Hz]	[mA]	No / [Hz]	[mA]
2/100	660	3/150	880
4/200	440	5/250	880
6/300	220	7/350	880
8/400	90	9/450	440
10/500	90	11/550	500
12/600	90	13/650	500
14/700	90	15/750	130
16/800	90	17/850	330
18/900	90	19/950	330
20/1000	90	21/1050	90
22/1100	90	23/1150	150
24/1200	90	25/1250	150
26/1300	90	27/1350	90
28/1400	90	29/1450	120
30/1500	90	31/1550	110
32/1600	90	33/1650	90
34/1700	90	35/1750	100
36/1800	90	37/1850	96
38/1900	90	39/1950	90
40/2000	90	41/2050	89
42/2100	87	43/2150	86
44/2200	85	45/2250	83
46/2300	82	47/2350	81
48/2400	79	49/2450	78
50/2500	77	51/2550	76
52/2600	75	53/2650	74
54/2700	73	55/2750	72
56/2800	71	57/2850	70
58/2900	70	59/2950	69
60/3000	68	61/3050	67
62/3100	67	63/3150	66
64/3200	65	65/3250	64
66/3300	64	67/3350	63
68/3400	63	69/3450	62
70/3500	62	71/3550	61
72/3600	61	73/3650	60
74/3700	60	75/3750	59
76/3800	59	77/3850	58
78/3900	58	79/3950	57
80/4000	56	81/4050	56
82/4100	56	83/4150	55
84/4200	55	85/4250	54
86/4300	54	87/4350	54
88/4400	53	89/4450	53
90/4500	53	91/4550	52
92/4600	52	93/4650	52
94/4700	51	95/4750	51
96/4800	51	97/4850	50
98/4900	50	99/4950	50
100/5000	50	->	0,022+2,75/n

Taulukko 2 - Sallittu yliaaltovirran suhde nimellisvirtaan			
Inim = Nimellisvirta ilman lämmitystä, Ih = Yliaaltovirta			
Yliaalto	Suhde	Yliaalto	Suhde
Taajuus	Ih/Inim	Taajuus	Ih/Inim
No / [Hz]	[A/A]	No / [Hz]	[A/A]
1/ 50	1	1/ 50	1
2/100	0,0165	3/150	0,022
4/200	0,0110	5/250	0,022
6/300	0,0055	7/350	0,022
8/400	0,0023	9/450	0,011
10/500	0,0023	11/550	0,0125
12/600	0,0023	13/650	0,0125
14/700	0,0023	15/750	0,0033
16/800	0,0023	17/850	0,0083
18/900	0,0023	19/950	0,0083
20/1000	0,0023	21/1050	0,0023
22/1100	0,0023	23/1150	0,0038
24/1200	0,0023	25/1250	0,0038
26/1300	0,0023	27/1350	0,0023
28/1400	0,0023	29/1450	0,0030
30/1500	0,0023	31/1550	0,0028
32/1600	0,0023	33/1650	0,0023
34/1700	0,0023	35/1750	0,0025
36/1800	0,0023	37/1850	0,0024
38/1900	0,0023	39/1950	0,0023
40/1600	0,0023	41/2050	0,0023
42/2100	0,0023	43/2150	0,0022
44/2200	0,0022	45/2250	0,0021
46/2300	0,0021	47/2350	0,0020
48/2400	0,0020	49/2450	0,0020
50/2500	0,0019	51/2550	0,0019
52/2600	0,0019	53/2650	0,0018
54/2700	0,0018	55/2750	0,0018
56/2800	0,0018	57/2850	0,0018
58/2900	0,0018	59/2950	0,0017
60/3000	0,0017	61/3050	0,0017
62/3100	0,0017	63/3150	0,0017
64/3200	0,0017	65/3250	0,0016
66/3300	0,0016	67/3350	0,0016
68/3400	0,0016	69/3450	0,0016
70/3500	0,0016	71/3550	0,0015
72/3600	0,0015	73/3650	0,0015
74/3700	0,0015	75/3750	0,0015
76/3800	0,0015	77/3850	0,0014
78/3900	0,0014	79/3950	0,0014
80/4000	0,0014	81/4050	0,0014
82/4100	0,0014	83/4150	0,0014
84/4200	0,0014	85/4250	0,0014
86/4300	0,0014	87/5350	0,0013
88/4400	0,0013	89/5450	0,0013
90/4500	0,0013	91/4550	0,0013
92/4600	0,0013	93/4650	0,0013
94/4700	0,0013	95/4750	0,0013
96/4800	0,0013	97/4850	0,0013
98/4900	0,0013	99/4950	0,0012
100/5000	0,0012	->	0,00055+0,069/n

Taulukko 3 - Sallittu yliaaltovirran tehollisarvo, kun summanimellisteho P = 6,2 MW ilman lämmitystä

Yliaalto	Yliaalto	Yliaalto	Yliaalto
Taajuus	Virta	Taajuus	Virta
No / [Hz]	I [A]	No / [Hz]	I [A]
2/100	4,1	3/150	7,7
4/200	2,7	5/250	5,5
6/300	1,4	7/350	5,5
8/400	0,56	9/450	2,7
10/500	0,56	11/550	3,10
12/600	0,56	13/650	3,10
14/700	0,56	15/750	0,81
16/800	0,56	17/850	2,00
18/900	0,56	19/950	2,00
20/1000	0,56	21/1050	0,56
22/1100	0,56	23/1150	0,93
24/1200	0,56	25/1250	0,93
26/1300	0,56	27/1350	0,56
28/1400	0,56	29/1450	0,74
30/1500	0,56	31/1550	0,68
32/1600	0,56	33/1650	0,56
34/1700	0,56	35/1750	0,62
36/1800	0,56	37/1850	0,60
38/1900	0,56	39/1950	0,56
40/2000	0,56	41/2050	0,55
42/2100	0,55	43/2150	0,53
44/2200	0,54	45/2250	0,52
46/2300	0,51	47/2350	0,50
48/2400	0,49	49/2450	0,48
50/2500	0,48	51/2550	0,47
52/2600	0,47	53/2650	0,46
54/2700	0,46	55/2750	0,45
56/2800	0,45	57/2850	0,44
58/2900	0,44	59/2950	0,43
60/3000	0,43	61/3050	0,42
62/3100	0,42	63/3150	0,41
64/3200	0,41	65/3250	0,40
66/3300	0,40	67/3350	0,39
68/3400	0,39	69/3450	0,39
70/3500	0,39	71/3550	0,38
72/3600	0,38	73/3650	0,37
74/3700	0,37	75/3750	0,37
76/3800	0,37	77/3850	0,36
78/3900	0,36	79/3950	0,35
80/4000	0,35	81/4050	0,35
82/4100	0,35	83/4150	0,35
84/4200	0,34	85/4250	0,34
86/4300	0,34	87/4350	0,34
88/4400	0,33	89/4450	0,33
90/4500	0,33	91/4550	0,33
92/4600	0,32	93/4650	0,32
94/4700	0,32	95/4750	0,32
96/4800	0,32	97/4850	0,32
98/4900	0,31	99/4950	0,31
100/5000	0,31	->	0,14 + 17 / n

Taulukko 4 - Sallittu yliaaltovirran huippuarvo, kun summanimellisteho P = 6,2 MW ilman lämmitystä

Yliaalto	Yliaalto	Yliaalto	Yliaalto
Taajuus	Virta	Taajuus	Virta
No / [Hz]	\hat{i} [A]	No / [Hz]	\hat{i} [A]
2/100	5,8	3/150	10,4
4/200	3,9	5/250	7,7
6/300	1,9	7/350	7,7
8/400	0,77	9/450	3,9
10/500	0,77	11/550	4,3
12/600	0,77	13/650	4,3
14/700	0,77	15/750	1,2
16/800	0,77	17/850	2,9
18/900	0,77	19/950	2,9
20/1000	0,77	21/1050	0,77
22/1100	0,77	23/1150	1,40
24/1200	0,77	25/1250	1,40
26/1300	0,77	27/1350	0,77
28/1400	0,77	29/1450	1,00
30/1500	0,77	31/1550	0,96
32/1600	0,77	33/1650	0,77
34/1700	0,77	35/1750	0,88
36/1800	0,77	37/1850	0,84
38/1900	0,77	39/1950	0,77
40/2000	0,77	41/2050	0,77
42/2100	0,76	43/2150	0,75
44/2200	0,74	45/2250	0,72
46/2300	0,71	47/2350	0,70
48/2400	0,69	49/2450	0,68
50/2500	0,67	51/2550	0,66
52/2600	0,65	53/2650	0,64
54/2700	0,64	55/2750	0,63
56/2800	0,62	57/2850	0,61
58/2900	0,61	59/2950	0,60
60/3000	0,59	61/3050	0,58
62/3100	0,58	63/3150	0,57
64/3200	0,57	65/3250	0,56
66/3300	0,56	67/3350	0,55
68/3400	0,55	69/3450	0,54
70/3500	0,54	71/3550	0,53
72/3600	0,53	73/3650	0,52
74/3700	0,52	75/3750	0,51
76/3800	0,51	77/3850	0,50
78/3900	0,50	79/3950	0,49
80/4000	0,49	81/4050	0,49
82/4100	0,48	83/4150	0,48
84/4200	0,47	85/4250	0,47
86/4300	0,46	87/4350	0,47
88/4400	0,46	89/4450	0,46
90/4500	0,46	91/4550	0,45
92/4600	0,45	93/4650	0,45
94/4700	0,45	95/4750	0,44
96/4800	0,44	97/4850	0,44
98/4900	0,43	99/4950	0,43
100/5000	0,43	->	0,19 + 24 / n