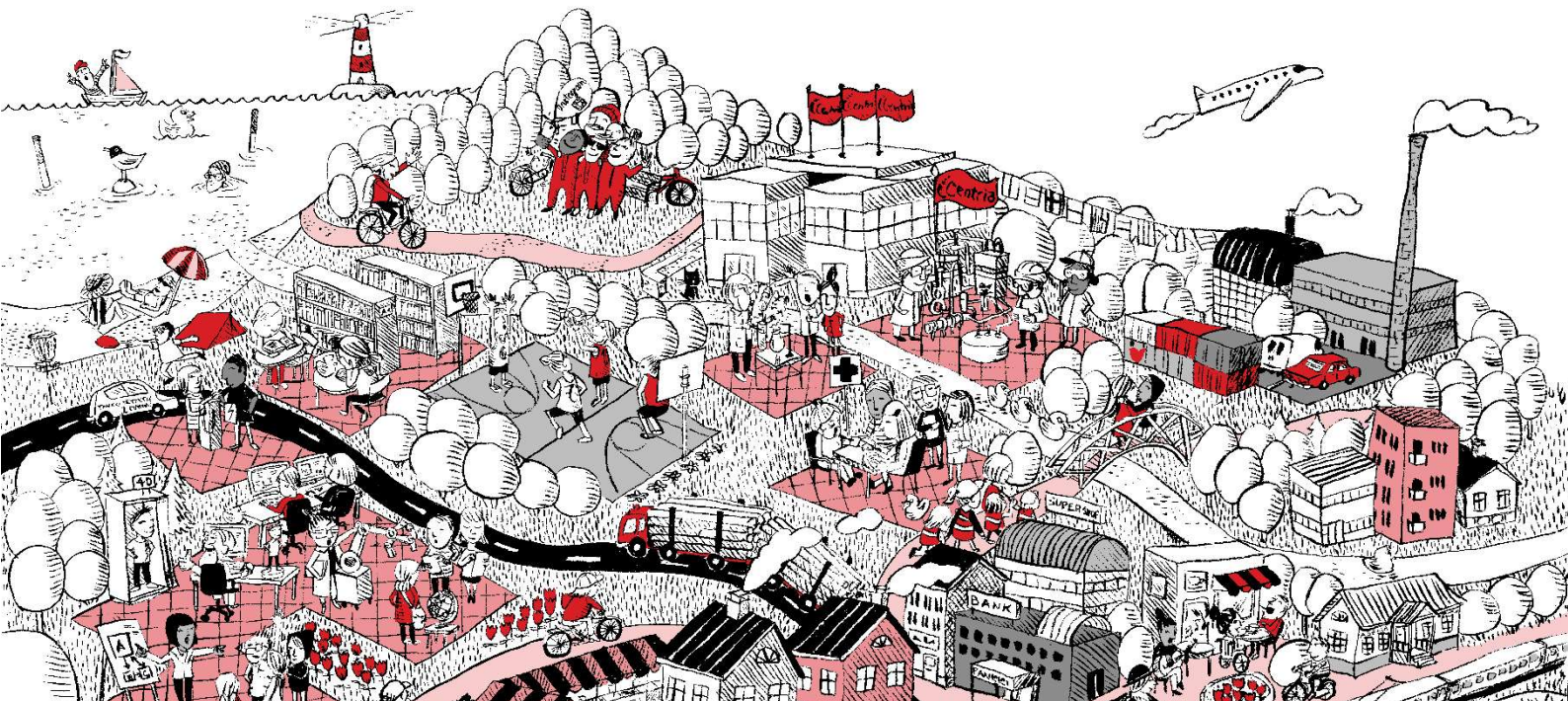


Jarno Honkakoski

KIINTEISTÖN LIITTÄMINEN 20 kV JAKELUVERKKOON

Kiinteistömuuntamot

Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus
Kevät 2021



TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Kevät 2021	Tekijä/tekijät Jarno Honkakoski
Koulutus Sähkövoimatekniikka		<input checked="" type="checkbox"/> AMK <input type="checkbox"/> YAMK
Työn nimi KIINTEISTÖN LIITTÄMINEN 20 kV JAKELUVERKKOON Kiinteistömuuntamot		
Työn ohjaaja Jari Halme		Sivumäärä 82+4
Työelämäohjaaja Jorma Honkakoski		
<p>Jakelumuuntamoissa muunnetaan keskijännitteisen jakeluverkon jännitetaso kuluttajille soveltuvaksi pienjännitteeksi. Muuntamot joudutaan sijoittamaan kaupunkialueilla usein rakennuksien sisälle, koska ylimääräistä tilaa rakentamiselle on vähän. Teollisuudessa muuntamot voidaan sijoittaa rakennuksien sisälle keskeisesti, jolloin pienjännitejakelun tehohäviöt saadaan pidettyä pienempänä.</p> <p>Kun kiinteistö liittyy suoraan keskijännitteiseen jakeluverkkoon kuluttajan omistuksessa olevalla muuntamalla, sen rakentaminen kuuluu usein kohteen sähköurakoitsijalle. Suurin osa talotekniikka-alalla toimivien urakoitsijoiden sähköasennustöistä ovat kuitenkin pienjänniteasennuksia, jolloin vaikiintuneet käytännöt ja toimintatavat suurjänniteasennuksiin saattavat olla vähäisiä.</p> <p>Työn toimeksiantajana oli Vihannin Sähkö Ky. Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää kiinteistömuuntamon rakentamiseen liittyviä määräyksiä ja ohjeistuksia yritykselle tulevaa muuntamon rakentamisprojektia varten. Lisäksi työtä voitaisiin käyttää jatkossa vastaavanlaisissa projekteissa apuna. Työssä käydään läpi kiinteistömuuntamon sähkölaitteiston keskeiset rakenteet ja kuvataan sähköurakoitsijan vastuulle kuuluvat asiat liittymisprosessin valmistelusta muuntamon käyttöönottoon asti. Kahdessa viimeisessä luvussa kuvataan opinnäytetyön aikana yrityksessä työn alla ollut kiinteistömuuntamon rakentamisprojekti käytännössä.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena syntyi kattava ohjeistus, jota voidaan käyttää apuna yrityksessä vastaavanlaisten projektien toteutuksessa ja suunnittelussa. Kiinteistömuuntamon rakentamistyöt sujuivat myös ongelmitta hyvän selvitystyön ansiosta. Työstä oli myös paljon hyötyä itselleni tulevaisuuden työmahdollisuuksia ajatellen.</p>		

Asiasanat Jakelumuuntamo, jakeluverkko, keskijännite, keskijänniteliittymä, kiinteistömuuntamo, muuntaja, muuntamo
--

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date Spring 2021	Author Jarno Honkakoski
Degree programme Electrical Engineering		
Name of thesis CONNECTING A PROPERTY TO A 20 kV DISTRIBUTION NETWORK Indoor substations		
Instructor Jari Halme	Pages 82+4	
Supervisor Jorma Honkakoski		
<p>In distribution substations, the voltage level of the medium voltage distribution network is converted to a low voltage suitable for consumers. In urban areas, the substations often have to be located inside buildings, as there is little extra space for construction. In industry, substations can be located centrally inside buildings, so that the power losses of the low voltage distribution can be kept smaller.</p> <p>When a property is connected directly to the medium voltage distribution network at a distribution substation owned by the consumer, the construction of the substation often belongs to the electrical contractor of the construction site. However, the majority of electricity installation works of the contractors in the field of building services is low voltage installations, whereby established practices and modes of operation might be limited.</p> <p>The thesis was commissioned by Vihannin Sähkö Ky. The purpose of this thesis was to find out the regulations and instructions related to construction of indoor transformer substations for an upcoming distribution substation construction project of the company. In addition, the thesis could be used as an instruction in similar projects in the future. In the thesis, the main structures of the indoor transformer's electrical equipment are reviewed and the matters for which the electricity contractor is responsible are described, from the preparation of the connection process to the commissioning of the transformer. The last two chapters describe the construction project of an indoor transformer that was going on in the company during the thesis in practice.</p> <p>As a result of the thesis, comprehensive guidelines were created that can be used as instruction for planning and implementing similar projects in the company. The construction of the indoor transformer substation also went smoothly, thanks to a proper study. The thesis was also a great benefit to myself in terms of future job opportunities.</p>		

<p>Key words Distribution network, distribution substation, indoor transformer, medium voltage connection, medium voltage, substation, transformer</p>

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

AHXAMK-W

Keskijänniteverkon kolmivaiheinen alumiinijohtiminen maakaapeli. Vaiheet on kerrattu kuparisen keskusköyden ympärille.

Askeljännite U_A

Maadoitusjännitteestä esiintyvä osa kahden askeletäisyydellä olevan kohdan välillä.

HXCMK

Kuparijohtimella oleva yksijohtiminen keskijännitekaapeli.

Kaksoismaasulku

Käyttömaadoittamattoman verkon vikatilanne, jossa samanaikaisesti kahdessa eri verkon osassa vaihejohdin joutuu kosketuksiin maan tai maadoitetun osan kanssa.

Keskijännite

Vaihtojännite nimellisjännitteeltään 1-36kV.

Kosketusjännite U_{TP}

Maadoitusjännitteestä esiintyvä osa kahden samanaikaisesti kosketeltavan osan tai kohdan välillä.

Maadoitusjännite U_E

Maadoitusjärjestelmän impedanssissa vikavirran aiheuttama jännite.

Maasulku

Käyttömaadoittamattoman verkon vikatilanne, jossa vaihejohdin joutuu kosketuksiin maan tai maadoitetun osan kanssa.

P1-paloluokitus

Rakennuksen vaativin paloluokitus. Henkilömäärää ja rakennuksen kokoa ei ole rajoitettu. Rakennuksen oletetaan kestävän palossa sortumatta.

Pienjännite

Vaihtojännite nimellisjännitteeltään alle 1kV.

Redusointi

Sähköteknisien arvojen muuttaminen samaan jänniteportaaseen.

Rengasverkko

Silmukan muotoiseksi rakennettu jakeluverkonhaltijan verkko, jossa sähkö on syötettävissä kahta eri reittiä pitkin.

Resultoiva maadoitusimpedanssi

Yksittäisten yhteen kytkettyjen maadoitusjärjestelmien impedansseista muodostuva kokonaisuus.

RMU

Ring main unit, keskijännitemuuntamon kompakti SF₆-eristeinen keskijännitekojeisto.

S1-pätevyys

Oikeus toimia sähkötöiden- ja käytönjohtajana kaikissa sähkötöissä jännitetasosta riippumatta.

Selektiivisyys

Vikatilanteesta aiheutuvien häiriöiden rajaaminen mahdollisimman pienelle alueelle, jolloin ainoastaan lähimpänä vikaa oleva suojalaite toimii.

SF₆

Rikkiheksafluoridi, kojeistoissa ja kytkinlaitteissa käytettävä eristeenä toimiva kaasu.

Suurjännite

Vaihtojännite nimellisjännitteeltään yli 36kV. Kirjallisuudessa ja standardeissa voidaan myös keskijännitteestä käyttää nimitystä suurjännite.

Sähkölaitteistoluokka 2c

Yli 1kV vaihtojännitteisiä osia sisältävä kiinteistön sähkölaitteisto.

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 KESKIJÄNNITTEINEN JAKELUVERKKO	3
2.1 Verkon rakenne	4
2.2 Keskijänniteverkkojen maadoitustyypit	5
3 LIITTYMINEN KESKIJÄNNITTEISEEN JAKELUVERKKOON	7
3.1 Liittymätilaus	8
3.2 Keskijänniteliittymän aiheuttamat lisävaatimukset	8
4 KIINTEISTÖMUUNTAMO	10
4.1 Muuntamotilojen rakennustekniset vaatimukset	11
4.1.1 Paloturvallisuus	12
4.1.2 Valokaarioikosulun painevaikutus	13
4.1.3 Ilmanvaihto	13
5 KESKIJÄNNITEKOJEISTOT	15
5.1 Erottimet	17
5.2 Katkaisijat	19
5.3 Suojareleet	19
5.4 Pääkytkinkenno ja suojaus	20
5.5 Liittymiskennot	22
5.6 Mittauskenno	22
6 MUUNTAJAT	23
6.1 Muuntajan toimintaperiaate	23
6.2 Muuntajan häviöt	24
6.3 Kolmivaihemuuntaja	24
6.4 Kolmivaiheisten jakelumuuntajien kytkentäryhmät	25
6.5 Jakelumuuntajien rinnankäyttö	25
6.6 Jakelumuuntajien jännitteensäätö	26
6.7 Jakelumuuntajat	26
6.7.1 Öljymuuntajat	26
6.7.2 Kuivamuuntajat	28
6.8 Virtamuuntajat	30
6.9 Jännitemuuntajat	33
7 KESKIJÄNNITEKAAPELIT JA NIIDEN VARUSTEET	36
7.1 Muuntamoiden kaapeloinnit	36
7.2 Kaapelipäätteet ja jatkokset	38
7.2.1 Kutistemuovi- ja kylmäkutistemuovipäätteet	39
7.2.2 Pistokepääte	39
7.2.3 Kaapelijatkos	41
8 MAADOITUKSET	42

8.1 Laaja maadoitusjärjestelmä.....	44
8.2 Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä	44
8.3 Kiinteistömuuntamon maadoituselektrodi	46
8.3.1 Maadoituselektrodin maadoitusresistanssin mittaus käännepestemenetelmällä	49
8.3.2 Maadoituselektrodin, -johtimien ja suojamaadoitusjohtimien kuormitettavuus	50
8.4 Kuluttajamuuntamon maadoitukset	51
9 KIINTEISTÖMUUNTAMON RAKENTAMINEN	53
9.1 Valmistelevat työt.....	53
9.2 Keskijännitekojeisto.....	55
9.3 Muuntaja.....	57
9.4 Kiskosilta ja pienjännitepääkeskus	59
9.5 Keskijännitelaitteiston asennukset	61
9.5.1 Maadoitukset	62
9.5.2 Muuntamon muut varusteet.....	64
10 MUUNTAMON KÄYTTÖÖNOTTO JA TARKASTUKSET	66
10.1 Käyttöönottotarkastus	67
10.2 Aistinvaraiset tarkastukset.....	68
10.3 Jännitteettömänä tehtävät mittaukset.....	68
10.3.1 Suojajohtimien jatkuvuusmittaukset	69
10.3.2 Eristysresistanssimittaukset	70
10.3.3 Toiminnan testaukset.....	71
10.3.4 Pienjännitekatkaisijan asettelu	72
10.4 Muuntamon kytkeminen jännitteiseksi.....	74
10.5 Kolmannen osapuolen tarkastukset.....	78
11 YHTEENVETO	79
LÄHTEET	80
LIITTEET	
KUVIOT	
KUVIO 1. Suomen siirto- ja jakeluverkkojen periaate	3
KUVIO 2. Rengasverkko	4
KUVIO 3. Maasulkuvirran muodostuminen 1-vaiheisessa maasulussa maasta erotetussa verkossa	5
KUVIO 4. Sammutettu verkko	6
KUVIO 5. Pääkaavioesimerkki yhden muuntajan muuntamosta, jossa on RMU-kojeisto	15
KUVIO 6. Pääkaavioesimerkki isommasta muuntamosta, jossa on kennokojeisto	16
KUVIO 7. Laukaisuaika virran funktiona kaksipolttaisessa vakio- ja käänteisaika hidastuksessa	21
KUVIO 8. Häviötön 1-vaihemuuntaja	23
KUVIO 9. Kolmivaihemuuntajan rautasydän ja käämit	24
KUVIO 10. Jakelumuuntajien kytkentäryhmät	25
KUVIO 11. Valuhartsieristeisen muuntajan vaatimat suojaetäisyydet.....	29
KUVIO 12. Virtamuuntajan merkinnät	30
KUVIO 13. Jännitemuuntajien merkintöjä	33
KUVIO 14. Värähtelynvaimennusvastus.....	35
KUVIO 15. Sallittu kosketusjännite poiskytkentääjän mukaan.....	43
KUVIO 16. Resultoiva maadoitusimpedanssi	45
KUVIO 17. Perustusmaadoituselektrodi.....	46

KUVIO 18. Maaperän resistiivisyyden mittaaminen.....	47
KUVIO 19. Maadoituselektrodin mittaaminen käännepistemennetelmällä	49
KUVIO 20. Esimerkki sähkökäyttäjän muuntamon maadoituskaaviosta.....	51
KUVIO 21. Maadoituselektrodin mittaustulokset käännepistemennetelmällä.....	64
KUVIO 22. Pääkatkaisijan suojarleen toimintakarakteristiikat	72

KUVAT

KUVA 1. Esimerkkikohteen kiinteistömuuntamo	10
KUVA 2. Ilmaeristeisen kojeiston SF ₆ -eristeinen varokekuormanerotin.....	18
KUVA 3. Hermeettisesti suljettu öljyeristeinen jakelumuntaja.....	27
KUVA 4. Valuhartsieristeinen muuntaja	28
KUVA 5. AHXAMK-W -kaapelin rakenne	37
KUVA 6. HXCMK -kaapelin rakenne.....	37
KUVA 7. Sähkökentän jakautuminen kaapelipäätteessä.....	38
KUVA 8. Kutistemuovipäätteen rakenne	39
KUVA 9. 630A C1 -tyypin kulmapistokepäätteen	40
KUVA 10. Sähkökentän jakautuminen kaapelijatkoksen kohdalla	41
KUVA 11. Kohteeseen asennettujen kojeiston kansikuva.....	55
KUVA 12. Mittauskenno	57
KUVA 13. Asennettu valuhartsieristeinen muuntaja suojakotelo avattuna.....	58
KUVA 14. Pääkeskuksen syöttökenttä	60
KUVA 15. Muuntamon maadoituskisko	63
KUVA 16. Muuntamon varusteita	65
KUVA 17. AHXAMK-W 3x185AL+35CU -kaapelit liittymiskennossa.....	66
KUVA 18. Vaiheistuksen mittaaminen.....	75
KUVA 19. Varokekuormanerotin käyttöpaneeli	76
KUVA 20. Esimerkki jännitetasojen ja vaihejärjestyksen tarkastamisesta	77

TAULUKOT

TAULUKKO 1. Kantavien ja osastoivien rakenteiden vaatimukset P1-paloluokan rakennuksessa.....	12
TAULUKKO 2. Muuntamotilan seinärakenteet valokaarioikosulun paineen mukaan mitoitettuna.....	13
TAULUKKO 3. Muuntamosta poistettava ilmamäärä koneellisella ilmanvaihdolla	14
TAULUKKO 4. Keskijännitekojeistojen sähköisiä mitoitusarvoja.....	17
TAULUKKO 5. Ohjeellinen muuntajan suojaavan sulakkeen valinta	20
TAULUKKO 6. Suositeltavat eristysvälit käyttöjännitteen mukaan.....	29
TAULUKKO 7. Virtamuuntajien tarkkuusluokat	31
TAULUKKO 8. Mitoitusjännitekertoimen arvoja.....	34
TAULUKKO 9. Jännitemuuntajien tarkkuusvaatimukset	35
TAULUKKO 10. Maaperän ominaisresistanssien arvoja.....	47
TAULUKKO 11. Maadoituselektrodin maadoitusresistanssin laskentakaava	48
TAULUKKO 12. Materiaalivakiot	51
TAULUKKO 13. Asennettujen muuntajan teknisiä tietoja	59
TAULUKKO 14. Esimerkki kojeiston eristysresistanssin mittaustuloksista	71
TAULUKKO 15. Oikosulkuvirta-arvot ja pääkeskuksen mitoitusarvot	73
TAULUKKO 16. Pääkatkaisijan asetteluarvot	74

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä käsitellään rakennukseen sijoitetun muuntamon toteutusprosessia ja sitä koskevia ohjeistuksia ja käytäntöjä. Työn päätarkoitus oli toteutusvaiheessa, mutta työn teoriaosuudessa on selvitetty myös suunnittelun kannalta hyödyllisiä asioita. Rakennukseen sijoitetut muuntamot voidaan jakaa omistussuhteeltaan joko verkonhaltijan tai kuluttajan omistukseen kuuluviksi. Tässä opinnäytetyössä käsitellään kuluttajan omistukseen kuuluvia muuntamoita, joissa kuluttaja muuntaa käyttämänsä sähkön pienjännitteeksi.

Liittyminen keskijännitteiseen jakeluverkkoon ja oman muuntamon rakentaminen tulee kysymykseen suurissa teollisuus- ja kaupallisissa kohteissa, joissa tehontarve on niin suuri, ettei pienjänniteliittymää ole saatavilla tai sitä ei kannata taloudellisista syistä toteuttaa. Tällaisen kohteen tullessa työksi sähköurakkakokonaisuuteen yleensä kuuluu myös muuntamon rakentaminen.

Opinnäytetyö tehtiin Vihannin Sähkö Ky:lle, joka on vuonna 1961 perustettu talotekniikka-alan sähköasennuksia suorittava yritys. Yrityksellä on suurjänniteasennuksiin oikeuttavat S1-urakointioikeudet, mutta suurin osa töistä on kuitenkin pienjänniteasennuksia. Tarve opinnäytetyölle syntyi yrityksessä, kun työksi tuli teollisuuskohde, jonka sähköurakkaan kuului myös sähkön käyttäjän omistaman kiinteistömuuntamon rakentaminen. Kiinteistömuuntamon toteuttaminen on huomattavasti vaativampi ja sisältää enemmän huomioon otettavia asioita kuin lähes valmiina paikalle tuotavan ja ulos sijoitettavan puistomuuntamon toteuttaminen. Tarkoituksena on kehittää keskijänniteasennuksien suorittamista yrityksessä niin että jatkossa vastaavanlaiset työt voidaan suorittaa kokonaisuudessaan yrityksen omaa työvoimaa käyttäen.

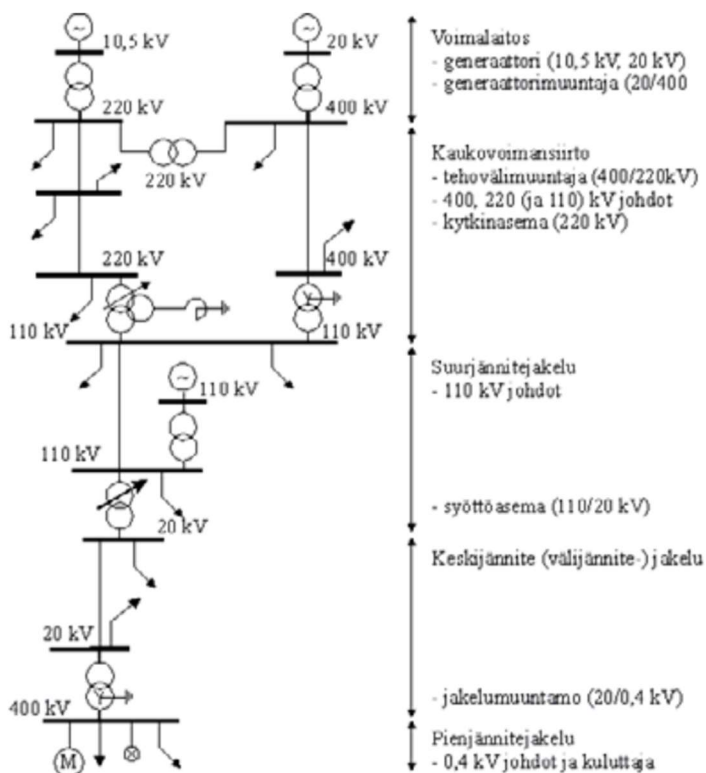
Opinnäytetyön alkuosa muodostuu teoriaosuudesta, jossa on käyty aluksi läpi keskijännitteisen jakeluverkon rakennetta ja muuntamoiden toimintaa sen osana. Rakennukseen sisälle sijoitetut muuntamolaitteistot liittyvät yleensä maakaapeliverkkoon, joten työssä ei käsitellä ilmajohtoihin liittyviä asennusteknisiä seikkoja. Teoriaosuudessa on myös kuvattu projektin alkuvaiheen tehtäviä ja muuntamotiloihin kohdistuvia rakennusteknisiä vaatimuksia. Kokonaisuuden ymmärtämiseksi kiinteistömuuntamon sähkölaitteistojen rakenne ja pääosat sekä niiden valintaan vaikuttavat seikat on käyty mahdollisimman kattavasti läpi. Teoriaosuus on koottu käyttäen alan kirjallisuutta ja ohjeistuksia.

Opinnäytetyön käytännön osuutta, johon osallistuin muuntamon rakentamiseen sähköurakoitsijan edustajana, kuvataan työn luvuissa 9 ja 10. Luvuissa on kuvattu muuntamon rakentaminen valmistelutöistä käyttööntamiseen saakka sekä kerrottu teoriaosuudessa esitettyjen asioiden soveltamisesta käytännössä.

2 KESKIJÄNNITTEINEN JAKELUVERKKO

Jakeluverkkoa käytetään sähkön siirtoon kulutusalueilla pienille ja keskisuurille sähkökäyttäjille, Jakeluverkot voidaan jakaa edelleen keski- ja pienjänniteverkkoihin. Keski- ja pienjänniteverkko on Suomessa useimmiten 20 kV, mutta joissain kaupungeissa käytetään myös 10 kV jännitettä. Keski- ja pienjänniteverkko saa alkunsa sähköasemalta, jossa suurempi jännite, yleensä 110 kV muunnetaan päämuuntajassa keski- ja pienjänniteverkon jännitetasoon. Lähempänä kuluttajia keski- ja pienjänniteverkon jännite muunnetaan jakelumuuntajilla 0,4 kV pienjännitteeksi. (Korpinen 1998a, 1.)

Keski- ja pienjänniteverkkoa tarvitaan sähkön siirtämiseen sähköasemalta lopullisten sähkökäyttäjien läheisyyteen, koska sähkönjakelussa pyritään hyvällä, yli 95%, hyötysuhteella tapahtuvaan voimansiirtoon. Tästä johtuen siirron ja jakelun häviöt on pidettävä kohtuullisena. Johdolla syntyvät pätötehohäviöt ovat verrannollisia virran neliöön ja johdolla siirrettävä teho on puolestaan verrannollinen jännitteeseen ja virtaan. Tästä seuraa, että mitä suurempia tehoja joudutaan siirtämään, sitä suurempia jännitteitä on käytettävä. Optimiratkaisuna käytettävät jännitetasot, on järkevää porrastaa siirrettävän tehon ja etäisyyden mukaan. Kuviossa 1 on esitetty siirto- ja jakeluverkkojen periaate Suomessa. (Korpinen 1998a, 2.)

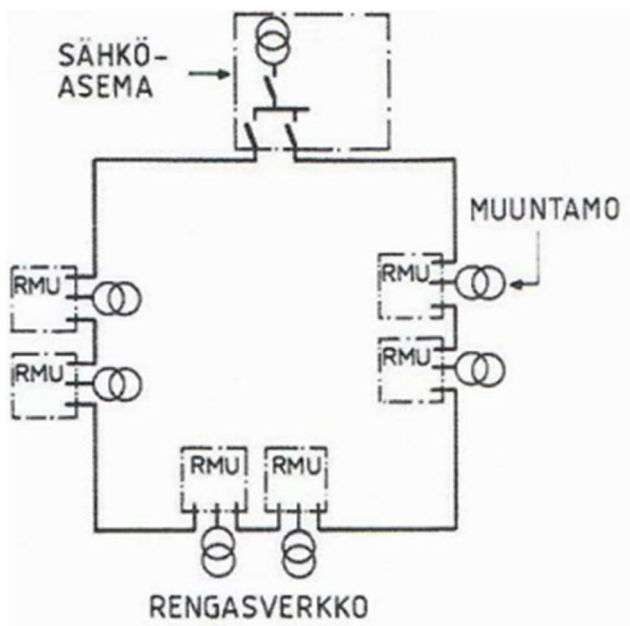


KUVIO 1. Suomen siirto- ja jakeluverkkojen periaate (Korpinen 1998a, 3)

2.1 Verkon rakenne

Keskijänniteverkolla on huomattava vaikutus sähkönsiirron varmuuteen, yli 90 prosenttia sähkönkuluttajien kokemista sähkökatkoista johtuu keskijänniteverkon vioista. Suomessa keskijänniteverkko on rakennettu ilmajohdoilla ja maakaapeleilla, maakaapeloinnin ollessa yleisempi taajama- ja kaupunkialueilla. Viime vuosina keskijänniteverkkojen maakaapelointiastetta on alettu lisäämään myös taajamien ulkopuolella luonnonilmiöiden aiheuttamien vikatilanteiden ehkäisemiseksi. Vuonna 2019 1-70 kV:n jakeluverkoista 38,4% oli maakaapeloitu. Maakaapelointiaste vaihtelee verkkoyhtiöiden mukaan. Maaseudulla toimivilla yhtiöillä on enemmän ilmajohdoilla toteutettua verkkoa. (Lakervi & Partanen 2009, 125; Energiavirasto 2019.)

Kaupunkialueilla keskijänniteverkot rakennetaan renkaan muotoiseksi, jolloin jakelumuuntamoille saadaan syötettyä sähköä useampaa reittiä pitkin (KUVIO 2). Rengasverkko voi lisäksi sisältää myös sen sisäpuolisia varayhteyksiä, jolloin verkkoa kutsutaan silmukoiduksi. Suojausten yksinkertaistamiseksi verkkoja käytetään kuitenkin säteittäisenä, jolloin rengas on normaalisti avattuna. Huolto- tai vikatilanteessa rengas suljetaan hetkellisesti, jolloin tietty johtoväli tai muuntamo voidaan kytkeä jännitteettömäksi ilman että sähkönjakelu muille käyttäjille keskeytyisi. Verkon jakorajojen muutoksissa käytetään muuntamoiden kojeistoissa olevia kuormanerottimeja. Maaseudulla keskijänniteverkot ovat pääasiassa säteittäisiä, jolloin sähkön kulku jakelumuuntamolle on järjestettävissä vain yhtä reittiä pitkin. (Korpinen 1998a, 2; Lakervi & Partanen 2009, 125.)

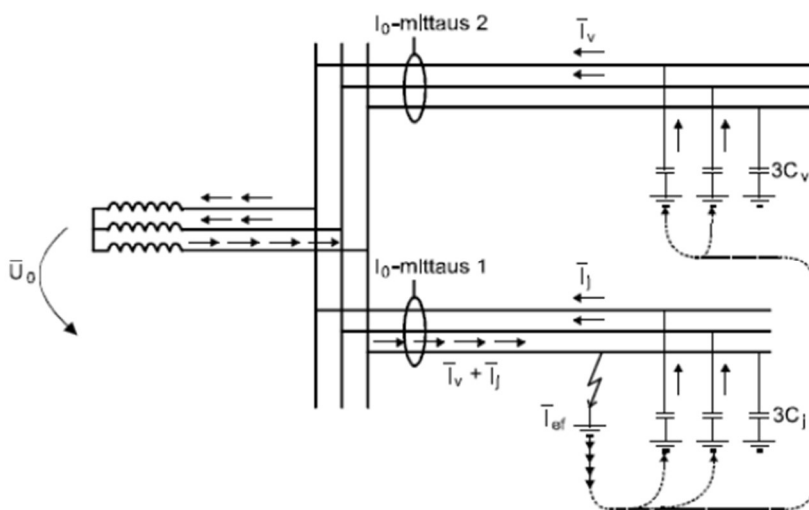


KUVIO 2. Rengasverkko (Elovaara & Haarla 2011, 139)

2.2 Keskijänniteverkkojen maadoitustyypit

Suomessa keskijänniteverkot ovat joko maasta erotettuja tai kompensoituja verkkoja, jossa verkon tähtipiste tai useampi on maadoitettu induktiivisen kompensointikuristimen kautta. Verkkoa syöttävän sähköaseman muuntajan toisiokäämit on kytketty kolmioon ja jakelumuuntajilla ensiökäämit on kytketty kolmioon, jolloin verkossa on käytössä ainoastaan kolme vaihetta. Suurimpana syynä maasta erotettujen verkkojen käyttöön keskijännitejakelussa on Suomen maaperän huono johtavuus ja siitä aiheutuvat maadoitusjänniteongelmat. Maasulkuvirtojen ollessa pieniä on ihmisille vaaraa aiheuttavat kosketus- ja askeljännitteet helpompi saada turvalliselle tasolle. (Lakervi & Partanen 2009, 182.)

Maasta erotetun verkon tähtipistettä ei ole maadoitettu, jolloin suoraa johtavaa yhteyttä maahan ei ole lainkaan. Vikatilanteessa, jossa vaihejohdin joutuu kosketuksiin maan tai maadoitetun osan kanssa, vikapiiri sulkeutuu ainoastaan verkon vaiheiden ja maan välille muodostuneiden maakapasitanssien kautta (KUVIO 3). Maakapasitanssien kautta sulkeutuvan vikavirtapiirin impedanssi on suuri, jolloin maasulkuvirta jää pienemmäksi kuin verkon kuormitusvirta. Maasulkuvirran suuruuteen vaikuttava maakapasitanssi määräytyy galvaanisesti yhteen kytketyn verkon pituuden ja rakenteen mukaan. (Lakervi & Partanen 2009, 183.)

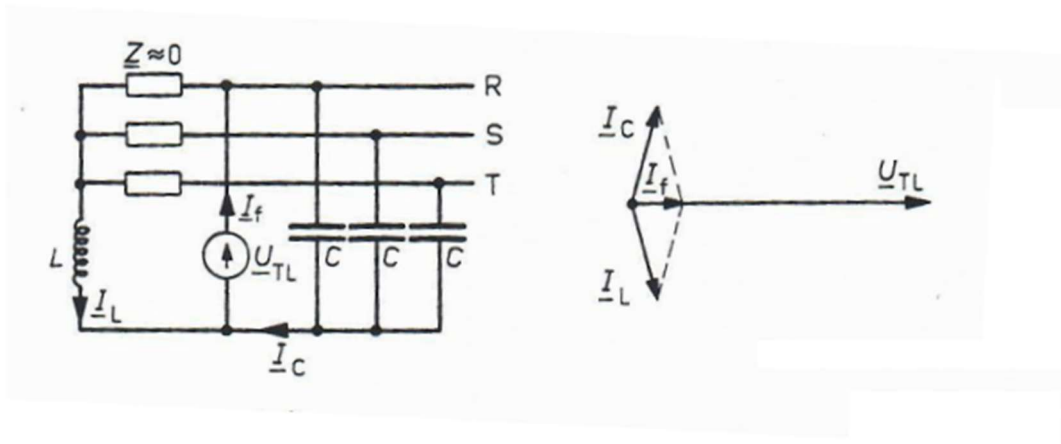


KUVIO 3. Maasulkuvirran muodostuminen 1-vaiheisessa maasulussa maasta erotetussa verkossa (ABB 2000a, 5)

Kompensoidussa verkossa syöttävän muuntajan tähtipiste tai verkon useamman muuntajan tähtipiste maadoitetaan suuri impedanssien induktiivisen kompensointikuristimen kautta. Kuviossa 4 on esitetty

kompensoidun verkon periaatetta, jossa verkon tähtipisteen ja maan välille kytkettävän sammutuskuristimen tuottaman induktiivisen virran I_L tarkoituksena on kompensoida sähköverkon maakapasitanssien tuottama lähes vastakkaissuuntainen kapasitiivinen virta I_C pois, jolloin maadoitusjännitteitä aiheuttava maasulkuvirta I_F saadaan poistettua lähes kokonaan.

Kompensoidussa verkossa maasulkujen aiheuttamat valokaaret sammuvat pienen virran vuoksi yleensä itsestään, jonka takia sähkönkäyttäjille sähkökatkoksen aiheuttavia pika- ja aikajälleenkytkentöjä ei tarvitse käyttää. Tämän ominaisuuden vuoksi kompensoituja verkkoja kutsutaan myös sammutetuiksi verkoiksi. Maakaapeloinnin lisääntyessä myös kompensointitarve on lisääntynyt, maakaapelien tuottaessa ilmajohtoja huomattavasti enemmän kapasitiivista loisvirtaa. (Lakervi & Partanen 2009, 184-185.)



KUVIO 4. Sammutettu verkko (Elovaara & Laiho 1999, 84)

Maasulun synnyttämän pienen vikavirran vuoksi maasulkusuojausta ei voida toteuttaa oikosulkusuojauksen tavoin ylivirtasuojien käyttämisellä. Verkon ollessa terveessä tilassa sen vaihejännitteiden summa maahan nähden on nolla ja verkon kapasitanssien aiheuttamien varausvirtojen summa on myös nolla. Maasulkutilanteessa epäsymmetriasta johtuen kuviossa 3 esitetty tähtipisteen jännite U_0 ja vaihevirtojen summa I_0 poikkeavat vian aikana nollost. Jäykässä maasulussa, jossa ei ole vikaresistanssia, terveiden vaiheiden jännite maata vasten kasvaa pääjännitteen suuruiseksi ja tähtipisteen jännite vaihejännitteen suuruiseksi. Virta I_0 puolestaan on verkon kapasitanssien tuottama maasulkuvirta. Edellä mainittujen suureiden lisäksi suojauksessa on tarkasteltava kapasitiivisen virran kulkusuuntaa mittaamalla virran I_0 ja jännitteen U_0 välistä kulmaa, jotta suojaus toimisi oikealla johtolähdöllä. (Lakervi & Partanen 2009, 186-187.)

3 LIITTYMINEN KESKIJÄNNITTEISEEN JAKELUVERKKOON

Keskijänniteliittymän hankkiminen pienjänniteliittymän sijaan on oltava hyvin perusteltua. Sähkösuunnittelijan on arvioitava hankkeen alkuvaiheessa kohteen vuotuinen sähköenergian tarve ja suurin tarvittava sähköteho. Jos tarvittavan huipputehon tarve on lähellä pienjänniteliittymien ylärajaa, on hyvä arvioida muuntamon ja keskijänniteliittymän kannattavuus verkkoyhtiöltä saatujen tietojen perusteella. Huipputehon tarve voi olla mahdollisesti myös niin suuri, ettei pienjänniteliittymää olisi tarjolla lainkaan. Suurin mahdollinen pienjänniteliittymän koko vaihtelee verkonhaltijan ja rakennuksen sijainnin mukaan, tyypillisesti se on korkeintaan 3x1250A. (Roine, Ylinen & Härkönen 2018, 2.)

Projektin aloitusvaiheessa on selvitettävä muutamia asioita, jotta voidaan arvioida muuntamohankinnan kannattavuus. Muuntamohankinnan kannattavuuteen vaikuttavia asioita ovat:

- verkonhaltijan sähkönsiirron ja liittymismaksujen erot pien- ja keskijännitteellä, kiinteistön arvioidulla liittymisteholla
- muuntamon rakentamiskustannukset
- käytönjohtajan palkkiot ja muuntamon huoltokustannukset
- muuntajan aiheuttamat häviöt.

(Roine, Ylinen & Härkönen 2018, 2.)

Muita keskijänniteliittymää puoltavia asioita voivat olla esimerkiksi käyttövarmuuteen vaikuttavat näkökohdat. Taloudellisen arvion ja muiden asioiden perusteella tehdään päätös muuntamon rakentamisesta, jonka jälkeen sähkösuunnittelija selvittää yhdessä muiden suunnittelualojen kanssa tiloihin liittyviä rakennusteknisiä asioita. (Roine ym. 2018, 3.)

Lopuksi muuntamosta laaditaan lopulliset suunnitelmat, jotka sisältävät seuraavia asiakirjoja: asemapiirustus, pääkaavio, maadoituskaavio, tasopiirustus, kojeiston piirikaavio, rakennepiirustus leikkauksiin, johtotiepiirustus ja sähkötyöselostus. Edellä mainituista piirustuksista tulee lähettää verkonhaltijalle hyväksyttäväksi asemapiirustus, pääkaavio, johtotiepiirustus, maadoituskaavio, kojeiston piirikaavio ja sähkötyöselostuksesta muuntamoaa koskevat kohdat. Alustava rakentamisen aikataulu on myös ilmoitettava verkonhaltijalle. (Roine ym. 2018, 3.)

3.1 Liittymätilaus

Projektin alkuvaiheessa kiinteistön omistajan tulee tehdä liittymissopimus verkonhaltijan kanssa hyvissä ajoin, että jakeluverkkoyhtiö ehtii suunnitella ja suorittaa mahdolliset verkon rakentamistyöt. Keskijänniteliittymissä asemakaava-alueella liittymän edellyttäessä sähköverkon rakentamista toimitusaika on liittymispisteeseen yleensä yhdestä kolmeen kuukautea. Suuritehoisissa keskijänniteliittymissä, jotka liittyvät sähköasemalle, on toimitusaika tyypillisesti vuodesta kahteen. Sähköverkon suunnittelu ja sähköverkon rakentaminen liittymispisteeseen aloitetaan sen jälkeen, kun liittyjä on toimittanut liittymissopimuksen verkonhaltijalle. (Oulun Energia 2020, 4.)

Sähköliittymän liittämiskohta sovitaan erikseen kiinteistön omistajan tekemässä liittymissopimuksessa. Keskijänniteliittymissä liittymispisteenä ovat verkonhaltijan maakaapeliin liityntäpisteet liittäjän keskijännitekojeistossa. Verkonhaltija vastaa kaapeliojan kaivuusta ja peitosta ainoastaan yleisellä alueella ja liittäjän urakoitsijan tulee rakentaa kaapelireitti tontilla, kiinteistöllä tai siihen rinnastettavalla rakennuspaikalla verkkoyhtiön ohjeiden mukaisesti. (Oulun Energia 2020, 5-9.)

Liittymissopimuksen lisäksi ennen toivottua sähköön kytkemistä on tehtävä kytkennän tilaus verkkoyhtiön yleistietolomakkeella ja sähköön osto- sekä verkkopalvelusopimus. Kytkenän tilaus on sähköurakoitsijan vastuulla ja sähköön ostosopimuksen tekeminen kiinteistön loppukäyttäjän vastuulla. On kuitenkin hyvä varmistaa, että sähköön ostosopimus on tehty hyvissä ajoin ennen kytkennän ajankohtaa. Liittymiskaapelointiin ja kytkennän tilaukseen liittyvät yksityiskohdat ja käytännöt kannattaa varmistaa verkkoyhtiöltä jo aikaisessa vaiheessa. (Roine ym. 2018, 3.)

Kytchentäpäivänä muuntamon on oltava kaikilta osin valmiina ja käyttöönottotarkastuksien tehtynä, jotta se voidaan kytkeä jännitteiseksi. Kohteen käytönjohtajan vastuulla on kytkeä jännite pääkatkaisijalta tai varokeuormanerotimelta eteenpäin. Tyypillisesti käytönjohtaja on rakennusaikana sähköurakoitsijan sähkötöiden johtaja.

3.2 Keskijänniteliittymän aiheuttamat lisävaatimukset

Keskijänniteliittymällä olevan rakennuksen sähkölaitteistolle käytölle ja huollolle on asetettu sähköturvallisuuslaissa lisävaatimuksia. Sähkönkäyttäjän omistaman muuntamon rakentaminen rakennukseen tai

sen yhteyteen aiheuttaa rakennuksen sähkölaitteistoluokan kohoamisen luokkaan 2c. Tästä johtuen sähkölaitteiston haltijan on nimettävä sähkölaitteistolle käytönjohtaja ja huolehdittava sähkölaitteiston huolto- ja kunnossapito-ohjelman laatimisesta ja noudattamisesta. Lisäksi muuntamon huolto- ja kunnossapitotöitä suorittavien urakoitsijoiden sähkötyönjohtajalla tulee olla S1-pätevyys.

Käyttöönoton jälkeen muuntamolle ja muulle sähkölaitteistolle suoritetaan 3 kk:n sisällä käyttöönotosta sähköurakoitsijan käyttöönototarkastuksen lisäksi kolmannen osapuolen varmennustarkastus alempien luokitusten tapaan. Määräaikaistarkastukset suoritetaan luokan 2c-laitteistoille 10 vuoden välein. (Sähköturvallisuuslaki 1135/2016.)

Kohteeseen nimetty käytönjohtaja vastaa sähköturvallisuuslain noudattamisesta sähkölaitteiston käyttämisessä ja huoltamisessa sekä sähkölaitteiston sähköturvallisuuslain mukaisesta kunnosta. Käytönjohtajan tulee opastaa käyttötöiden tekijät ja varmistaa, että heillä on riittävä ammattitaito tehtävänsä. Sähkölaitteiston haltijan tulee antaa käytönjohtajalle riittävät mahdollisuudet ja tiedot suoriutua tehtävästään. Vaikka muuntamo aiheuttaakin yleensä vaatimuksen nimetä käytönjohtaja, käytönjohtajan vastuulla on koko rakennuksen sähkölaitteisto pienjänniteasennuksineen. (Sähköturvallisuuslaki 1135/2016.)

Käytönjohtajan tulee olla sähkölaitteiston haltija, tämän palveluksessa tai sellaisen yrityksen palveluksessa oleva henkilö, jolla on kunnossapitosopimus sähkölaitteiston haltijan kanssa. Jos sähkölaitteistoon kuuluu enintään kolme nimellisjännitteeltään enintään 20 kV:n muuntamo, voi käytönjohtajana poikkeuksellisesti toimia myös sivutoiminen ulkopuolinen henkilö. Käytönjohtajalla tulee olla sama sähköpätevyysluokitus kuin sähkölaitteiston rakentajallakin. Yli 1000 V:n osia sisältävässä sähkölaitteistossa käytönjohtajalla tulee olla S1-pätevyys. (Sähköturvallisuuslaki 1135/2016.)

4 KIINTEISTÖMUUNTAMO

Kiinteistömuuntamossa muuntamon tarvittavat sähkölaitteet on toteutettu rakennuksen sisälle, sitä varten rakennettuihin tiloihin. Muuntamo sisältää keskijännitekojeiston, jakelumuuntajan tai useamman ja pienjännitepääkeskuksen. Sähkönkäyttäjän kiinteistömuuntamossa jakelumuuntajalla syötetään rakennuksen pienjännitepääkeskusta. Teollisuudessa ja suurissa rakennuksissa voi olla myös alamuuntamoita ja useampia pienjännitepääkeskuksia. Kuvassa 1 on esimerkkikohteeseen toteutettu kiinteistömuuntamo. Muuntaja on liitetty pienjännitepääkeskukseen kaapeleiden sijaan kiskostoilla.



KUVA 1. Esimerkkikohteen kiinteistömuuntamo

Henkilö- ja paloturvallisuuden vuoksi kiinteistömuuntamoille asetetut määräykset ovat huomattavasti vaativampia kuin ulos asennettaville puistomuuntamoille. Rengasverkkoon liitetyt muuntamot myös toimivat verkkoyhtiön jakeluverkon osana, jolloin suunnittelu ja rakentaminen on tehtävä verkkoyhtiön

ohjeiden mukaan. Seuraavissa luvuissa käydään läpi muuntamotiloille asetettuja rakennusteknisiä vaatimuksia.

4.1 Muuntamotilojen rakennustekniset vaatimukset

Muuntamo tulisi sijoittaa mahdollisuuksien mukaan maanpäälliseen kerrokseen ja rakennuksen ulkoseinälle, jolloin muuntajan ja kojeistojen kuljettaminen sekä verkkoyhtiön käyttöhenkilöstön kulku tiloihin olisi parhaiten järjestettävissä. Usein tämä ei ole kuitenkaan mahdollista, vaan tilat on sijoitettava rakennuksen kellaritiloihin. Tiloja sijoitettaessa rakennuksen sisälle on kuljetusreitteihin kiinnitettävä erityistä huomiota, koska rikkoutuneen muuntajan vaihtaminen myöhemmin tulee olla mahdollista. Tilaan on voitava kuljettaa kappale, jonka pituus on 2500 mm, leveys 1100 mm ja korkeus 2200 mm. Kuljetusreittien pitää kestää myös muuntajan paino, joka on useita tuhansia kiloja. Rengasverkon kuormanerottimien sijaitessa muuntamossa on verkkoyhtiön edustajilla oltava pääsy muuntamotiloihin kaikkina vuorokauden aikoina. Kulkemisen mahdollistamiseksi tiloihin on rakennuksen ulkopuolelle sijoitettava avainsäiliö reittiavaimella. Muuntamon ovi sarjoitetaan verkkoyhtiön sarjaan. (Energiateollisuus Ry 2016a, 6-9.)

Tilojen sijoituksessa on lisäksi huomioitava myös jakeluverkon liittymispisteen sijainti, sillä liittymiskaapeloinnin reitin rakennuksen sisällä on oltava mahdollisimman lyhyt ja suora. Liittymiskaapelit on asennettava palonkestävästi rakennuksen sisällä. Liittymiskaapeleita ja muuntajan kaapeleita varten tilan alle on voitava rakentaa 700-1000 mm syvä kaapelikanava, huomioiden käytettävien kaapeleiden taivutussäteet. Kaapelikuilun ja putkitusten sijainti on määritettävä hankitun kojeisto ja muuntajatyypin mukaan. (Energiateollisuus Ry 2016a, 25.)

Muuntajatilojen kokoon vaikuttavat valitun kojeistotyypin ja muuntajien koko. SF₆-eristeiset kojeistot vaativat jonkin verran vähemmän tilaa kuin ilmaeristeiset kojeistot. Rakennuksen pienjännitepääkeskus on käyttötoimenpiteiden vuoksi käytännöllisempää sijoittaa erillisiin tiloihin, kuitenkin muuntamotilojen viereen. Uusien rakennettavien tilojen koko on helpoin mitoittaa tyyppitetyn kojeiston ja muuntajan valmistajan antamien mittojen mukaan. Tilan minimikorkeutena voidaan pitää 2500 mm sekä kojeiston eteen hoitokäytävälle on jätävä 800 mm vapaata tilaa, myös kojeiston ovi avattuna tai katkaisija ulosvedettynä. (Energiateollisuus Ry 2016a, 8; SFS 6001 2018, 55.)

4.1.1 Paloturvallisuus

Kiinteistömuuntamo tulee rakentaa omaksi palo-osastokseen Ympäristöministeriön asetuksen rakennusten paloturvallisuudesta 848/2017 mukaan. Rakenteiden palonkestävyys määräytyy muuntajatilojen sisältämien laitteiden palokuorman mukaan ja rakennuksen paloluokituksen (P1, P2 ja P3) mukaan. Suurin muuntajatilojen palokuormaa lisäävä tekijä on muuntajan sisältämä öljy. Valuhartsieristeisillä muuntajilla palokuorma on huomattavasti pienempi. Taulukossa 1 on esitetty muuntamotilojen kantavien ja osastoivien rakenteiden vaatimukset P1-paloluokituksella olevassa rakennuksessa. Rakenteiden palonkestävyys ilmoitetaan minuutteina tiiviyden E, eristävyys I ja rakennusosien kantavuuden R suhteen. (Ympäristöministeriö 848/2017; Energiateollisuus Ry 2016a, 7.)

TAULUKKO 1. Kantavien ja osastoivien rakenteiden vaatimukset P1-paloluokan rakennuksessa (Energiateollisuus Ry 2016a, 7)

Kerrosten lukumäärä	O 1 luokan eristysnestettä sisältävän muuntajan tila		F 0 luokan kuivamuuntaja tai kojeistotila	
	Kantavien rakennusosien vaatimukset	Osastoivien rakennusosien vaatimukset	Kantavien rakennusosien vaatimukset	Osastoivien rakennusosien vaatimukset
Enintään 2	R 120	EI 120	R 60	EI 60
3 – 8 tai kellaritaso	R 180	EI 180	R 60	EI 60
Yli 8 tai 1. kellaritason alapuolella	R 240	Ei 120	R 120	EI 120

Taulukossa ilmoitetut arvot edellyttävät, että muuntaja on korkeintaan 1600 kVA:n kokoinen. Sijoitettaessa muuntamoon useampia muuntajia, jokaisella yli 1000 kVA:n muuntajalla tulee olla oma palo-osasto. F1-luokan kuivamuuntajille ei ole varsinaisesti asetettu ajallista palonkestoisuusvaatimusta, mutta pintojen on täytettävä luokan B-s1, d0 vaatimukset. Käytännössä kuitenkin valokaarioikosulun aiheuttama paineisku asettaa rakenteille vaatimukset. Sijoitettaessa F1-luokan kuivamuuntaja kojeiston kanssa samaan tilaan määräytyvät luokkavaatimukset F0-luokan mukaan. (Energiateollisuus Ry 2016a, 7; SFS 6001 2018, 71.)

Muuntamotiloista ulos johdettavien kaapeleiden ja ilmanvaihdon kanavien läpiviennit on tiivistettävä niin, etteivät ne oleellisesti heikennä läpäistävän rakenteen osastoivuutta. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että tehtävän palokatkon luokka on oltava vastaava kuin osastoivien rakenteiden. Muuntamon oven palonkestävyyden tulee olla puolet osastoivien rakenteiden kestävyyydestä, vähintään kuitenkin EI60. (Energiateollisuus Ry 2016a, 7; SFS 6001 2018, 71.)

4.1.2 Valokaarioikosulun painevaikutus

Valokaarioikosulku syntyy kahden johtimen välille eristyksen vioittuessa tai eristysaineen menettäessä eristyskykynsä. Valokaari voi syntyä myös liiallisen jännitteen nousun seurauksena. Kytkinlaitteissa valokaarioikosulku voi tapahtua epäonnistuneen kytkentätapahtuman seurauksena. Valokaarioikosulku aiheuttaa ympäristön nopean lämpenemisen ja paineen nousun. Valokaarioikosulun aiheuttama paineisku on otettava huomioon muuntamon rakenteiden mitoituksessa, sillä avokojeistoilla pahimmissa tapauksissa seiniä on kaatunut ja ovia auennut. Nykyaikaisilla kojeistoilla paine purkautuu hallitusti kojeiston alle ja taakse, jolloin käyttöturvallisuus on huomattavasti parempi. (Roine ym. 2018, 6.)

Muuntamossa valokaarioikosulku voi esiintyä keskijännitekojeistossa, muuntajassa suurjännite- tai pienjännite navoissa ja kiskosillassa. Paine voi purkautua muuntamotilasta kytkentätilanteessa avoimena pidettävästä ovesta, keskijännitekojeistolle rakennetuista erityisistä paineenpurkauskanavista ja ilmanvaihdon aukoista. Taulukossa 2 on esitetty muuntamotilojen seinärakenteet valokaarioikosulun paineen mukaan mitoitettuna. Käytettäessä ilmanvaihtokanavia paineenpurkauskanavina on kanavien poikkileikkausten yhteenlasketun pinta-alan oltava vähintään 0,18 m², jotta taulukossa mainitut seinävahvuudet riittävät. (Roine ym. 2018, 7.)

TAULUKKO 2. Muuntamotilan seinärakenteet valokaarioikosulun paineen mukaan mitoitettuna (Energiateollisuus Ry 2016a, 8)

Rakenne	Seinän paksuus mm	Ohje
Betoni	120	Ø 8 K 200 A500H ¹⁾
Tiili	130	Tiilen lujuusluokka \geq 25 Laastin lujuusluokka \geq 8
Kevytbetoniharkko	290	KSB 3 - 650

4.1.3 Ilmanvaihto

Kiinteistömuuntamoissa joudutaan useimmiten käyttämään koneellista ilmanvaihtoa painovoimaisen sijaan. Erityisesti kuivamuuntajia käytettäessä, joissa jäähdytys on luonnollisella ilmankierrolla, riittävästä ilmanvaihdosta tulee huolehtia. Suurella kuormalla tai kuormitushuipun ollessa kesäaikaan voi olla tarpeen käyttää myös ilman jäähdytystä.

Muuntamon ilmanvaihtojärjestelmä ei saa olla yhteinen rakennuksen muiden ilmanvaihtojärjestelmien kanssa. Kanavat on johdettava mahdollisimman suoraan ulos ja tuloilma on otettava mahdollisimman viileästä ja pölyttömästä paikasta. Ilmanvaihtojärjestelmä varustetaan automaattisella ohjauksella, jossa puhaltimia ohjataan huonelämpötilan mukaan. (Roine ym. 2018, 6.) Taulukossa 3 on esitetty muuntamosta poistettavia ilmamääriä eri muuntajatehoilla. Tarvittavan jäähdytysilman määrä voidaan laskea myös seuraavalla kaavalla:

$$V = \frac{0,78 \times P_h}{\Delta t} \text{ m}^3/\text{s} \quad 1)$$

jossa P_h on muuntajan tyhjäkäynti ja kuormitushäviöt mitoitusteholla

Δt on tulo- ja poistoilman lämpötila ero °C

Lämpötilaero tulee valita siten, että poistettava ilma ei ylitä +40 °C astetta. Kuormitushuipun sijoituessa kesäaikaan lämpötilaeron arvona voidaan käyttää +10 °C ja talviaikaan +2 0°C (Roine & Kankainen 2017, 4).

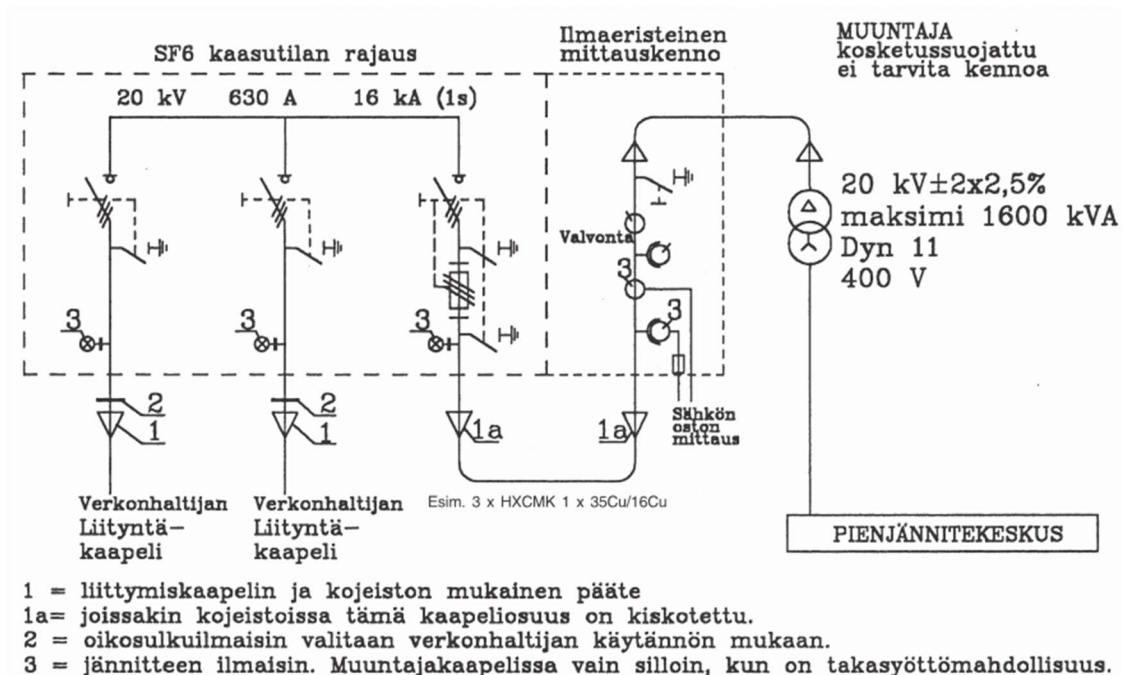
TAULUKKO 3. Muuntamosta poistettava ilmamäärä koneellisella ilmanvaihdolla (Roine & Kankainen 2017, 5)

Muuntajateho kVA	Poistettava ilmamäärä [m ³ /h]	
	Dt = 20 °C	Dt = 10 °C
800	1200	2300
1000	1400	2800
1250	1600	3100
1600	1900	3900

5 KESKIJÄNNITEKOJEISTOT

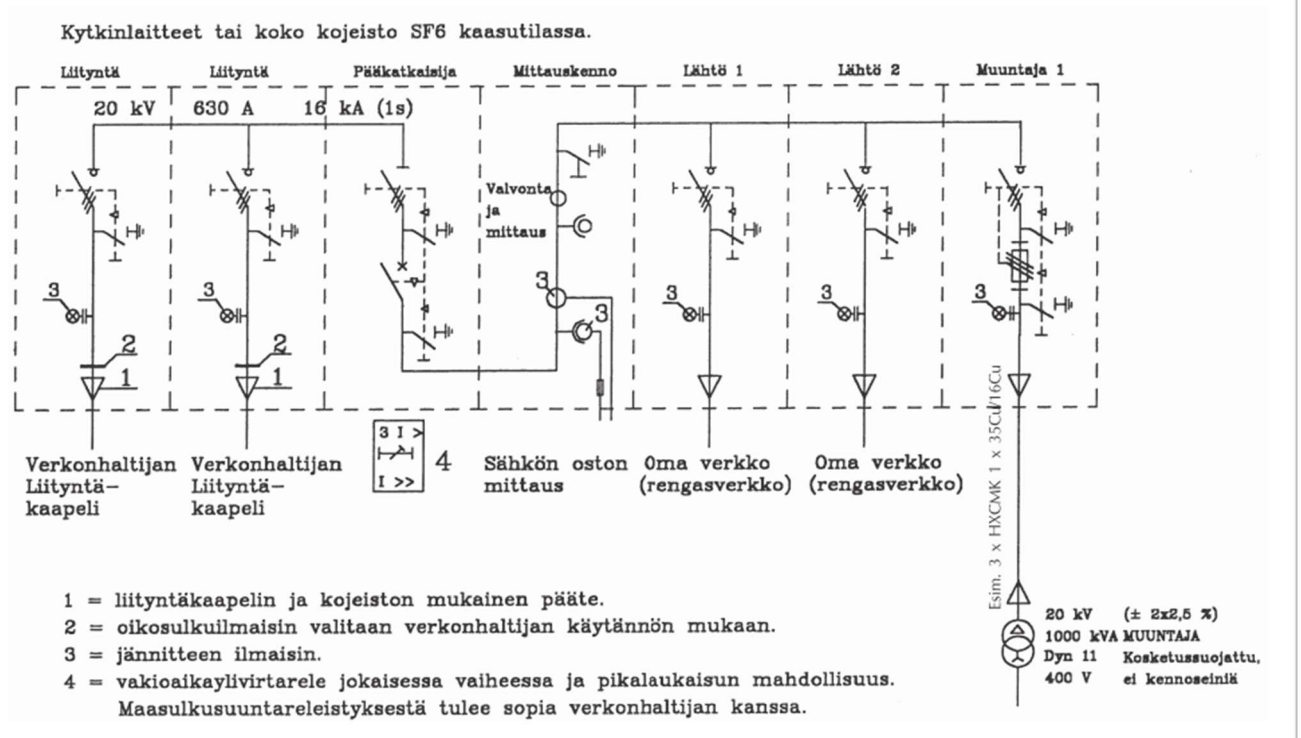
Keskijännitekojeistolla tarkoitetaan kokonaisuutta, joka sisältää muuntamon tarvittavat kytkentä-, suojaus-, ohjaus- ja valvontalaitteet. Muuntamo liittyy sähköverkkoon keskijännitekojeistoon liitetyiden kaapeleiden välityksellä. Kojeisto sisältää myös liittymän jälkeisen sähköverkon suojauslaitteet ja sähkön mittaukseen tarvittavat laitteet. Kiinteistömuuntamon kojeistot ovat nykyisin kosketussuojattuja koteloituja kaasueristeisiä tai ilmaeristeisiä ja ne on varustettu kaasueristeisillä kytkinlaitteilla. (Elovaara & Haarla 2011, 117-120.)

Kuluttajamuuntamoissa käytetyt keskijännitekojeistot jaetaan tyyppinsä puolesta kompakteihin RMU-kojeistoihin tai erillisistä moduuleista rakennettuihin kennokojeistoihin. RMU- eli rengassyöttökojeistot soveltuvat pieniin, yhden muuntajan ratkaisuihin. RMU-kojeistojen kytkinlaitteet ja kokoojakiskot on sijoitettu yhteiseen teräksestä valmistettuun säiliöön, joka on täytetty eristeenä toimivalla kaasulla. Kaapelipäätteinä käytetään pistokemallisia kosketussuojattuja päätteitä, jolloin kaapelitila saadaan sovitettua pienempään tilaan, koska etäisyysvaatimukset ovat pienemmät. Kuviossa 5 on tyypillinen yhden muuntajan kojeisto, jossa on kuormanerotin rengasverkon kaapeleille ja varokekuormanerotin muuntajalähtöä varten sekä mittauskenno. (Roine ym. 2018, 10.)



KUVIO 5. Pääkaavioesimerkki yhden muuntajan muuntamosta, jossa on RMU-kojeisto (Roine ym. 2018, 10)

Kennokojeistoissa jokaisella kennolla on oma kaasutila tai kokoojakisko- ja kaapelitilat voivat olla ilmaeristeisiä, mutta kytkinlaitteet ovat kuitenkin kaasueristeisiä. Kennokojeistot vaativat jonkin verran enemmän tilaa kuin RMU-kojeistot, mutta ovat parempia laajennettavuuden ja vikakestoisuuden vuoksi, koska kytkinlaitteet ovat erillisissä kaasutiloissa, jolloin kojeistoon voidaan vaihtaa tai lisätä yksi kenno tarpeen mukaan. Kuviossa 6 on esitetty isomman muuntamon pääkaavio, jossa on käytetty kennokojeistoratkaisua. (Roine ym. 2018, 10.)



KUVIO 6. Pääkaavioesimerkki isommasta muuntamosta, jossa on kennokojeisto (Roine ym. 2018, 11)

Eristekaasuna kojeistoissa ja kytkinlaitteissa käytetään SF₆ kaasua eli rikkiheksafluoridia. SF₆-kaasun jännitelujuus on huomattavasti parempi kuin ilman, jolloin kaasueristeiset kojeistot voidaan rakentaa pienempään tilaan pienempien ilmavälien vuoksi. SF₆-kaasulla on myös hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet, mikä tekee siitä hyvän valokaaren sammutuskaasun. SF₆-kaasu on lisäksi myrkytön ja palamaton eikä reagoi herkästi muiden kemiallisten aineiden kanssa. Huonona puolena on, että SF₆ on erittäin voimakas kasvihuonekaasu, sillä hiilidioksidiin verrattuna SF₆-kaasun suhteellinen vaikutus ilmakehän lämpenemiseen on noin 24 000 kertainen. Kytkinlaitteiden valokaaren tai osittaispurkausten hajottaessa SF₆-kaasua siihen syntyy myös myrkyllisiä yhdisteitä, jotka on otettava huomioon kaasuvuodon, valokaarivian tai onnettomuuden yhteydessä. Suomen oloissa on otettava huomioon myös SF₆-kaasun nes-

teytyminen alhaisissa lämpötiloissa. Nesteytymiseen vaikuttaa kaasunpaine. Muuntamokojeistoissa käytetään yleensä niin pientä kaasunpainetta, että käyttölämpötilat saadaan alhaiseksi. (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva 2015, 112-113.)

Koska keskijännitekojeisto kytketään osaksi jakeluverkkoa, on sen sähköisten ominaisuuksien oltava verkkoyhtiön vaatimusten mukaisia. Taulukossa 4 on esitetty sähköisiä mitoitusarvoja, jotka soveltuvat yleisesti käytettäväksi koko Suomen alueella.

TAULUKKO 4. Keskijännitekojeistojen sähköisiä mitoitusarvoja (Energiateollisuus Ry 2016, 18)

Jännitetasot	10 kV jakeluverkko	20 kV jakeluverkko
Suurin käyttöjännite	12 kV	24 kV
Koejännitteet		
salamasyöksyjännite h-arvo 1,2/50µs	75 kV	125 kV
vaihtojännitteellä tehollisarvo 1 min	28 kV	50 kV
Oikosulkukestoisuus		
terminen virtakestoisuus 1s	20 kA	16 kA
dynaaminen virtakestoisuus	50 kA	40 kA
Varokekuormanerotin ja kiskosto		
Varokekuormanerotimen suurin sulakekoko	100 A	63 A
Kuormanerotimen ja kiskoston nimellisvirta	630 A	630 A
Muuntamon sisäinen suurjännitekaapeli sulakkeiden takana	35 Cu	35 Cu

5.1 Erottimet

Erottimen tarkoituksena on muodostaa turvallinen avausväli erotettavan virtapiirin ja muun laitteiston välille, jotta laitteiston osakokonaisuus saadaan jännitteettömäksi esimerkiksi huoltoa varten. Erottimen avausvälin on oltava luotettava, minkä vuoksi avausvälin on oltava näkyvä tai erotin on varustettava luotettavalla mekaanisella asennonosoituksella. Erottimia ei ole tarkoitettu kuormitetun virtapiirin avaamiseen tai sulkemiseen, joten niiltä ei vaadita katkaisu- tai sulkemiskykyä. Erottimen on suljettuna kyettävä johtamaan virtapiirin kuormitus- ja oikosulkuvirrat. (Elovaara & Haarla 2011, 192.)

Muuntamokojeistoissa käytetään erottimien sijasta kuormanerotimia, jotka kykenevät erottimen tehtävien lisäksi sulkemaan- ja katkaisemaan ilmoitetun nimellisvirran suuruisen kuormitusvirran. Kuorma-

nerotin on varustettu jousilaitteistolla, jolloin avaus- ja sulkemistapahtuman nopeus on käyttäjästä riippumaton. Erotinta avattaessa sen pääkoskettimet avautuvat ensin ja muutaman millisekunnin jälkeen katkaisukoskettimet. Kaasueristeisissä kojeistoissa ja kytkinlaitteissa katkaisukoskettimien välille syntyvän valokaaren sammutukseen käytetään SF₆-kaasua. Kuormanerotin sisältää lisäksi maadoituserottimen, jolla voidaan maadoittaa kuormanerottimeen liitetty jännitteetön kaapelilähtö tai kiskosto. Kuormanerottimeessa on kolme asentoa: suljettu, avoin tai maadoitettu. Maadoituserottimen toiminta on luokitettu mekaanisesti siten, että jännitteisen kaapelin tai kiskoston maadoittaminen ei ole mahdollista. Maadoitusveitset on kuitenkin mitoitettu niin, että ne kestävät myös niillä aiheutetun oikosulun. Kuormanerotin yhteydessä on jokaisella vaiheella jännitteenilmaisimet, joista voidaan todeta jännitteettömyys erotinta käytettäessä. (Elovaara & Haarla 2011, 195; Monni 2018, 37-38.)

Varokekuormanerotimia käytetään jakelumuuntajien suojaamiseen sekä kojeiston pääkytkimenä. Varokekuormanerotin on täydennetty kuormanerotin, johon on lisätty sulakepitimet ja vapaalaukaisulaitteisto. Sulakkeessa oleva laukaisunasta ja erottimen laukaisulaitteisto aiheuttavat erottimen kolminapaisen avautumisen yhden tai useamman sulakkeen toimiessa, jotta muuntaja ei jää verkkoon vajaanapaisesti kytkettynä. Varokekuormanerottimeessa on maadoitusveitset sulakkeen kummallakin puolella, jotta varokkeen vaihtaminen on turvallista. Jos varokekuormanerotin rakenne on sellainen, että sulakkeen vaihto on turvallista muuten, riittää myös toisen puolen maadoittaminen. (Elovaara & Haarla 2011, 196; Roine ym. 2018, 13.) Kuvassa 2 on esitetty ilmaeristeisen kennokojeiston SF₆-eristeinen varokekuormanerotin sulakkeineen.



KUVA 2. Ilmaeristeisen kojeiston SF₆-eristeinen varokekuormanerotin (Finn Electric Oy 2017a, 2)

5.2 Katkaisijat

Katkaisijat ovat kojeita, joita käytetään virtapiirin avaamisen ja sulkemiseen. Katkaisijan on kyettävä sulkemaan ja avaamaan vaurioitumatta piirissä kulkeva oikosulkuvirta, joka on moninkertainen katkaisijan mitoitusvirtaan verrattuna. Tyypillinen automaattinen katkaisijan avautuminen on ylivirran vaikutuksesta ylikuormitus-, oikosulku-, tai maasulkutilanteessa. Avautumiskäskyn katkaisijalle antaa tällöin virtapiiriin mittamuuntajien avulla kytketty suojarle. (Elovaara & Haarla 2011, 162.)

Virtapiirin katkaisutilanteessa virta ei katkea heti koskettimien avautuessa, vaan virtapiiri pysyy suljetuna koskettimien välille syntyvän valokaaren välityksellä. Valokaarella on oleellinen osa virran katkaisussa. Suuren virran aikana valokaaren johtavuus on hyvä, mikä sallii koskettimien avaamisen niin etäälle toisistaan, että avausväli kestää täyden jännitteen valokaaren sammuttua. Virran nollakohdassa valokaaren resistanssi kasvaa nopeasti samalla kun valokaarta jäähdytetään sopivasti. Muutos johteesta eristeeksi tapahtuu vaihtovirralla tällöin virran nollakohdassa. (Elovaara & Haarla 2011, 163.)

Katkaisukammiossa käytettävä väliaine osallistuu sekä valokaaren sammuttamiseen että jännitteisten osien eristämiseen katkaisijan muista osista. Katkaisijat jaotellaan katkaisukammiossa käytettävän väliaineen mukaan. Uusissa keskijännitekojeistoissa käytetään SF₆-katkaisijoita tai tyhjiökatkaisijoita. Tyhjiökatkaisijat ovat keskijännitteellä yleisempiä. SF₆-katkaisijassa valokaaren sammuminen tapahtuu virran nollakohdassa SF₆-kaasun virratessa sammutuskammioon. Tyhjiökatkaisijassa katkaisukoskettimet ovat sijoitettuna tyhjiösäiliöön. Tyhjiön hyvän jännitelujuuden vuoksi valokaari sammuu virran nollakohdassa itsestään. (Elovaara & Haarla 2011, 163-182.)

5.3 Suojareleet

Vikatapauksessa on vikaantunut verkon osa erotettava muusta sähkölaitteistosta, jotta se ei aiheuta vaaraa eikä oikosulkuvirta tuhoa laitteita. Suojauksen on toimittava selektiivisesti, jotta mahdollisimman pieni osa verkosta joutuu pois käytöstä. Suojausjärjestelmä koostuu katkaisijoista, suojarleista ja mittamuuntajista. Katkaisijoiden ohjaamiseen käytetään suojarleitä, jotka liitetään suojattavaan virtapiiriin mittamuuntajien avulla, jolloin puhutaan toisioreleistä. (Elovaara & Haarla 2011, 335.)

Suojauksen toteutus ja mitattavat suureet määräytyvät suojattavan kohteen mukaan. Kun suojareleen tarkkailema suure ylittää tai alittaa releeseen asetellun arvon, rele havahtuu. Asetellun toiminta-ajan kullua rele antaa katkaisijalle ohjaussignaalin. Jos mittausarvo on palautunut takaisin asetellun arvon rajoihin ennen toiminta-ajan kulumista, suojarele palautuu takaisin normaalitilaan. Jakelumuuntamon kojeistossa tavallisin mitattava suure on ylivirta, jolla katkaisijan jälkeinen sähkölaitteisto suojataan ylikuormitukselta ja oikosululta. (Elovaara & Haarla 2011, 344.)

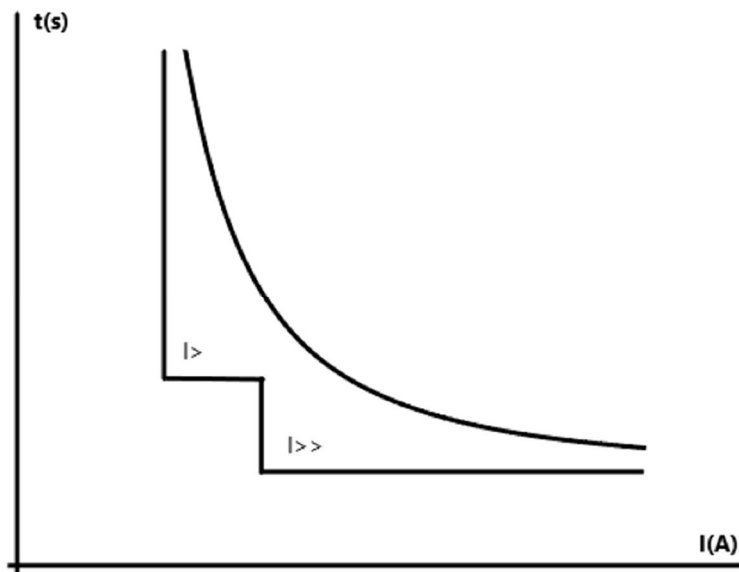
5.4 Pääkytkin ja suojaus

Yhden muuntajan muuntamossa voidaan käyttää pääkytkimenä muuntajan oikosulkusuojana toimivaa varokekuormanerotinta, kun muuntajan teho on korkeintaan 1600 kVA. Suurin sallittu sulake on silloin 20 kV:n jännitteellä 63 A (TAULUKKO 5). Muuntajan suojaamiseksi ylikuormitukselta ja lämpenemiseltä varokekuormanerotin varustetaan laukaisulaitteella. Muuntajan lämpötilanmittausreleeseen asetettun lämpötilan ylityttyä ohjataan varokekuormanerotin auki. (Roine ym. 2018, 13.)

TAULUKKO 5. Ohjeellinen muuntajaa suojaavan sulakkeen valinta (Roine ym. 2018, 13)

Muuntaja kVA	200	315	500	800	1000	1250	1600
Jännite 10 kV	25	40	63	63	100	100	100
Jännite 20 kV	16	25	25	40	63	63	63

Liittymistehon ollessa suurempi kuin 1600 kVA tai usean muuntajan tapauksessa on pääkytkinlaitteena käytettävä katkaisijaa. Katkaisijan ohjaamisessa käytettävän suojareleen ylivirtasuojaus asetellaan vakioaikaiseksi kaksiportaiseksi, jossa on hidastettu laukaisu ja pikalaukaisu (KUVIO 7). Vaihtoehtoisesti voidaan myös käyttää käänteisaikarelettä, jos se täyttää verkonhaltijan vaatimukset. Verkonhaltija ilmoittaa asetteluarvoille suurimmat mahdolliset aika- ja virta-arvot, jotta suojaus on selektiivinen syöttävän verkon suuntaan. Lisäksi katkaisijan suojauksen tulisi olla selektiivinen myös sen jälkeisten suojalaitteiden suuntaan, jotta vikatilanteessa lähimpänä vikaa oleva suojalaite toimii ensin. (Oulun Energia 2020, 7.)



KUVIO 7. Laukaisuaika virran funktiona kaksiporaisessa vakio- ja käänteisaikaisessa hidastuksessa

Virta-asetteluja määriteltäessä hidastetun laukaisun virta-arvo tulee olla suurempi kuin katkaisijan suojaamien jakelumuuntajien nimellisvirta yhteensä, muuntajien ylikuormitettavuus huomioiden. Pikalaukaisun virta-asettelun tulee olla suurempi kuin muuntajien aiheuttama kytkentävirtasysäys, joka on noin kymmenen kertaa muuntajien yhteen laskettu nimellisvirta. (Oulun Energia 2020, 8.)

Jos liittymispisteen jälkeisessä verkossa on keskijännitemaakaapelointia ja alamuuntamoita, pitää pääkatkaisijan suojariele varustaa lisäksi suunnatulla maasulkusuojauksella. Maasulkusuojaus toteutetaan summavirtamittauksella ja tuomalla nolajännite suojarielelle jännitemittauksen avokolmiokäämistä. Nollavirtamittauksen asettelu tulee olla isompi kuin oman verkon tuottama maasulkuvirta mutta pienempi kuin verkonhaltijan syöttämä maasulkuvirta. Verkonhaltija määrittää maasulkusuojauksen tarpeellisuuden ja arvioi asettelut tapauskohtaisesti. (Oulun Energia 2020, 8.)

Katkaisijan suojarieleinä voidaan käyttää kuormitusvirrasta virtamuuntajien kautta toimintaenergiansa saavia releitä tai apusähköjärjestelmän tarvitsevia releitä. Apusähköjärjestelmänä voidaan käyttää akustoja tai UPS-laitetta. Käytettäessä erillistä apusähköjärjestelmää releen syöttöön tulee sen kunnossapitoon kiinnittää erityistä huomiota ja mahdolliset hälytykset tulee viedä kiinteistön valvontajärjestelmään. (Oulun Energia 2020, 7.)

5.5 Liittymiskennot

Jakeluverkkoyhtiön rengasverkon liittymiskaapelit kytketään kojeiston liittymiskennoihin. Liittymiskennoja on yleensä kaksi, mutta verkon rakenteellisista syistä liittymiskennoja voi olla useampiakin. Liittymiskennojen kytkinlaitteiden käyttöoikeus on vain verkonhaltijan edustajalla.

Liittymiskennot varustetaan kuormanerottimilla, joissa on maadoituserottimet jännitteettömien liittymiskaapeleiden maadoittamiseen. Liittymiskennoissa on myös jännitteenilmaisimet jokaisella vaiheella. Verkonhaltijasta riippuen kuormanerottimet voidaan varustaa moottoriohjaimilla, jolloin verkonhaltija voi tehdä kytkentätoimenpiteitä käyttökeskuksesta käsin. Tällöin myös liittymiskennojen kytkinlaitteiden ja muiden kojeiden tilatiedot viedään muuntamoon asennettavalle kaukokäyttökeskukselle. Lisäksi liittymiskennoihin voidaan asentaa oikosulunilmaisimet, jolloin verkon vikojen paikallistaminen tiettyyn kaapelilähtöön on yksinkertaista. (Roine yms. 2018, 12.)

5.6 Mittauskenno

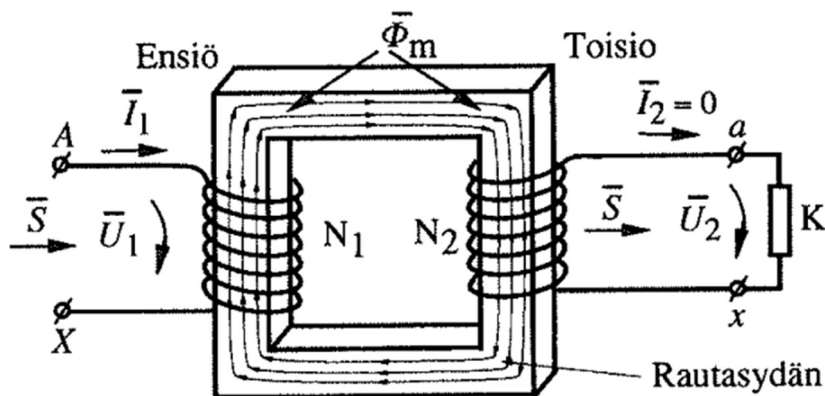
Kuluttajamuuntamoissa käytettävän sähköenergian mittaus suoritetaan kojeiston mittauskennossa olevien virta- ja jännitemuuntajien kautta (KUVIO 5 ja 6) ennen muuntajaa, jolloin muuntajan häviöiden kuluttama sähkö tulee huomioiduksi. Mittauskennot ovat rakenteensa vuoksi ilmaeristeisiä, vaikka muut kojeiston kennot olisivatkin SF₆-eristeisiä. Mittauskenno varustetaan maadoituserottimella tai siirrettävillä maadoitusvälineillä mittamuuntajien huoltotoimenpiteitä varten. Jännitemuuntajat sijoitetaan virran kulkusuunnassa ennen virtamuuntajia. Verkkoyhtiön sähkömittari sijoitetaan muuntajatilaan erilliseen mittauskoteloon, liitteessä 1 esitetyn mittauspiirikaavion mukaan. Kojelistossa olevien mittamuuntajien toisiopiirin johtimet kaapeloidaan toisiotilan riviliittimiltä mittauskotelolle.

6 MUUNTAJAT

Muuntaja on sähkölaite, jonka avulla vaihtojännitteen tasoa voidaan muuttaa helposti. Muuntajat ovat toimintavarmoja sekä edullisia, eivätkä ne sisällä liikkuvia ja elektronisia osia. Muuntajan toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon, joten se ei toimi tasasähköllä. 1900-luvun alussa tämä aiheutti sen, että vaihtosähkö syrjäytti tasasähkön lähes kokonaan. Muuntajien hyvistä ominaisuuksista johtuen tasasähköjärjestelmiä käytetään sähkön siirrossa ja jakelussa paljon vähemmän kuin vaihtosähköjärjestelmiä. (Korpinen 1998b, 1.) Muuntajat jaetaan tehtävänsä puolesta eri ryhmiin. Tässä insinöörityössä käsitellään jakelu- ja mittamuuntajia sekä niiden ominaisuuksia.

6.1 Muuntajan toimintaperiaate

Kuviossa 8 on esitetty yksinkertaisen häviöttömän muuntajan toimintaperiaate, jossa on saman rautasydämen ympärillä ovat toisistaan eristetyt ensiö- ja toisiokäämi. Kun ensiökäämiin kytketään jännite, U_1 käämiin läpi kulkeva sähkövirta I_1 synnyttää rautasydämeen muuttuvan magneettivuon Φ_m . Rautasydämen muuttuva magneettivuo indusoi toisiokäämiin sen kierrosmäärää vastaavan jännitteen U_2 . Kytettäessä toisiopiiriin kuormitus K alkaa toisiopiirissä kulkea sähkövirta I_2 , joka aiheuttaa rautasydämeen ylimääräisen magnetomotorisen voiman, joka pyrkii muuttamaan rautasydämen magneettivuota. Tällöin ensiökäämiin läpi kulkeva virta I_1 suurenee, jolloin toisiokäämiin aiheuttama magnetomotorinen voima kumoutuu ja rautasydämen magneettivuo Φ_m säilyy muuttumattomana. (Aura & Tonteri 2002, 270-272.)



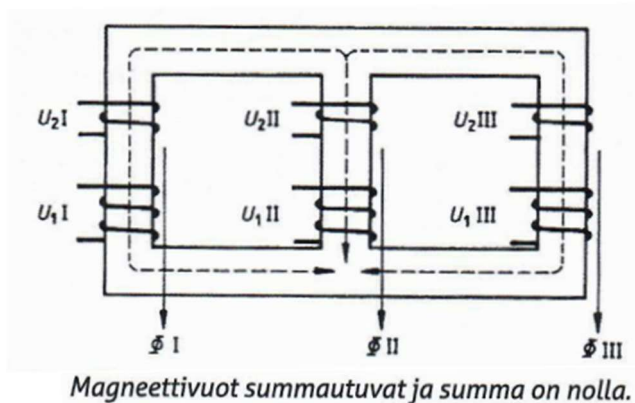
KUVIO 8. Häviötön 1-vaihemuuntaja (Aura & Tonteri 2002, 269)

6.2 Muuntajan häviöt

Ideaalista muuntajasta poiketen todellisessa muuntajassa syntyy häviöitä eikä teho siirry ensiö- ja toisiokäämin välillä muuttumattomana. Muuntajassa syntyvät häviöt voidaan jakaa kuormitus- ja tyhjäkäyntihäviöihin. Tyhjäkäynti- eli rautahäviöt ovat hystereesi- ja pyörrevirtahäviöitä, jotka aiheutuvat magneettivuon vaihtelusta rautasydämessä. Rautasydämen magneettivuo ei myös kokonaan läpäise toisiokäämiä, vaan osa vuosta kulkee hajavuona käämin ohi aiheuttaen hajareaktanssia. Tyhjäkäyntihäviöt ovat riippuvaisia käyttöjännitteestä ja pysyvät vakioina kuormituksesta riippumatta. Kuormitusvirran kulkiessa käämien läpi syntyy käämien resistansseissa lämpöhäviöitä, jolloin puhutaan kuormitushäviöistä. Kuormitushäviöt ovat riippuvaisia käämien läpi kulkevasta virrasta. Häviöt on ilmoitettu muuntajan teknisissä tiedoissa ja arvokilvessä. Tyhjäkäyntihäviöt ilmoitetaan kirjaimilla P_0 ja kuormitushäviöt nimelliskuormalla kirjaimilla P_k . (Korpinen 1998b, 9.)

6.3 Kolmivaihemuuntaja

Kolmivaiheisessa muuntajassa on jokaiselle vaiheelle omat käämityksensä. Tavallisessa kolmivaihemuuntajassa on kolme rautasydäntä ja rautasydämet on yhdistetty ylä- ja alaikeellä. Jokaisella vaiheella on omat ylä- ja alajännitekäämit, jotka on sijoitettu saman rautasydämen pylvään ympärille sisäkkäin (KUVIO 9). Yleensä pienjännitekäämi on lähempänä rautasydäntä helpommin toteutettavan eristyksen vuoksi. Koska kolmivaihejärjestelmässä jännitteet ja virrat ovat 120 asteen vaihesiirrossa keskenään, myös eri vaiheiden magneettivuot ovat keskenään 120 asteen vaihesiirrossa ja niiden vektorisumma on 0. Tästä johtuen eri pylväillä olevien vaihekäämien synnyttämät magneettivuot eivät häiritse toisiaan. (Monni 2018, 48.)



KUVIO 9. Kolmivaihemuuntajan rautasydän ja käämit (Monni 2018, 48)

6.4 Kolmivaiheisten jakelumuuntajien kytkentäryhmät

Muuntajan kytkentäryhmällä tarkoitetaan sitä, miten kolmivaihemuuntajan käämitysten päät on kytketty toisiinsa nähden. Suomessa käytetään jakelumuuntajissa ryhmän 11 kytkentöjä (KUVIO 10). 30-50 kVA:n pienissä muuntajissa käytetään Yzn 11 -kytkentää, jolloin ensiöpuoli on kytketty tähteen (Y) ja toisio hakatähteen (z). Toisiopuolella on lisäksi tuotu tähtipiste muuntajan kannelle (n). Kytkennän etuna on, että mahdollinen suuri yksivaiheinen kuormitus jakaantuu kahdelle ensiövaiheelle. Suuremmilla jakelumuuntajilla käytetään Dyn 11 -kytkentää, jossa ensiöpuoli on kytketty kolmioon (D) ja toisio tähteen (y). Lisäksi toisiopuolella on tähtipiste (n) tuotu muuntajan kannelle. Numerolla 11 tarkoitetaan ylä- ja alajännitteen välille muodostuvaa vaihe-eroa. (Monni 2018, 54.)

Kytkentä	Osoitinpiirros	Kytkentäkaavio
Dyn11		
Yzn11		

KUVIO 10. Jakelumuuntajien kytkentäryhmät (Monni 2018, 54)

6.5 Jakelumuuntajien rinnankäyttö

Saman kytkentäryhmän muuntajia, joiden ylä- ja alajännitekäämien nimellisjännitteet ovat samat, voidaan kytkeä rinnan syöttämään yhtä kohdetta. Muuntajien nimellistehojen suhde saa olla korkeintaan 2:1. Kuormituksen tasaisen jakaantumisen vuoksi muuntajien oikosulkuimpedanssien ero saisi olla korkeintaan 10%. Tällöin muuntajien yhteen lasketut nimellistehot muodostavat suurimman sallitun kuormitustehon. Kytkettäessä rinnan muuntajia, joiden oikosulkuimpedanssit poikkeavat enemmän, pienemmän oikosulkuimpedanssin omaava muuntaja kuormittuu aikaisemmin nimellistehoonsa ja voi ylikuormittua. Käytännössä helpoin on kytkeä saman valmistajan samanlaiset muuntajat rinnan. (Aura & Tonteri 1986, 73-75.)

6.6 Jakelumuuntajien jännitteensäätö

Jakelumuuntajan alajännitettä voidaan säätää muuttamalla ensiökäämin muuntosuhdetta. Jakelumuuntajissa säätö tehdään väliottokytkimellä, jolla muutetaan muuntajan yläjännitekäämien kierroslukua. Öljyeristeisissä muuntajissa muuntajan kannella on pyöritettävä ohjain, josta säätö saadaan tehtyä. Kuivamuuntajissa säätö tehdään käämien kyljessä olevilla pulttikiinnitteisillä liuskoilla. Muuntajien jännitteensäätö väliottokytkimillä on sallittua ainoastaan jännitteettömänä. Säätöasentoja on yleensä viisi $\pm 2,5+2,5\%$. (Aura & Tonteri 1986, 54.) Säätötarvetta voidaan arvioida seuraavalla kaavalla:

$$\text{Säätötarve \%} = \left(\frac{U_M}{U_N} - 1 \right) \times 100 \quad 2)$$

jossa U_M on mitattu jännite (V)

U_N on nimellisjännite (V)

6.7 Jakelumuuntajat

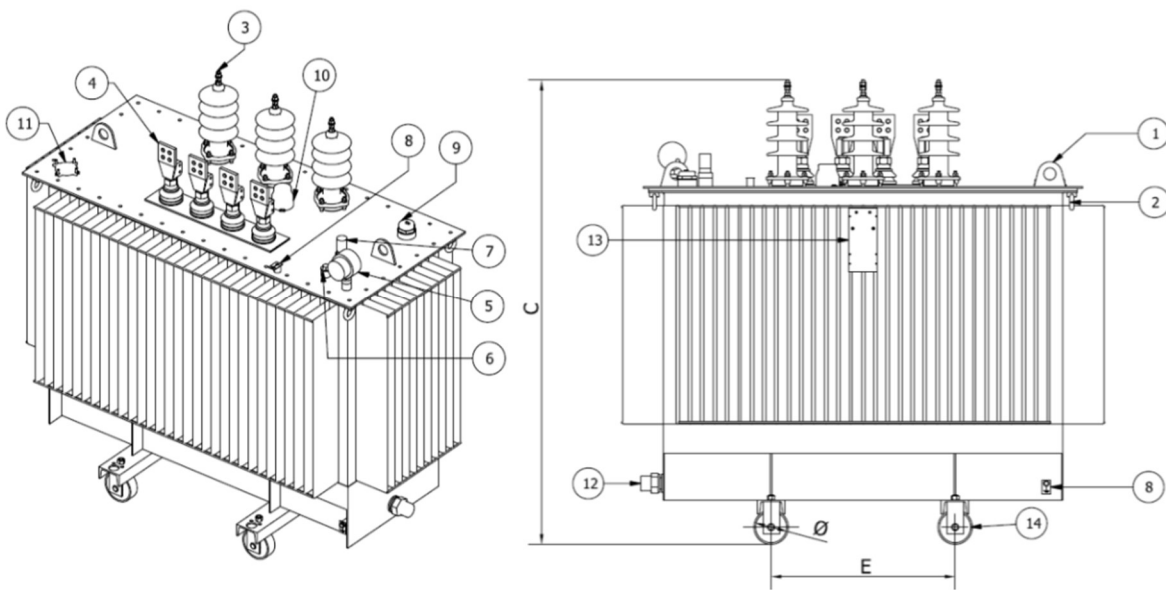
Kiinteistömuuntamoissa käytettävät jakelumuuntajat voidaan jakaa niiden jäähdytystapansa mukaan öljy- ja kuivamuuntajiin. Kummallakin tyypillä on omat hyvät ja huonot puolensa. Öljymuuntajat ovat parempia jäähdytyksen ja kuormitettavuuden kannalta sekä niiden saatavuus on muuntajan vioittuessa parempi. Ne ovat myös edullisempia kuin kuivamuuntajat. Kuivamuuntajissa käytetään eristeaineena öljyn sijasta valuhartsia ja ne ovat huomattavasti paloturvallisempia kuin öljymuuntajat. Saastumisriskiä öljyvuodon seurauksena ei ole ja huollon tarve on vähäisempi. (Roine ym. 2018, 8-9.)

6.7.1 Öljymuuntajat

Öljyeristeisessä jakelumuuntajassa sen rautasydän ja käämit on sijoitettu öljyllä täytettyyn metallista valmistettuun säiliöön. Muuntajaöljy toimii ylä- ja alajännitekäämien välisenä eristeaineena sekä jäähdytysväliaineena. Muuntaja voi olla joko paisuntasäiliöllä varustettu tai hermeettisesti suljettu. Hermeettisesti suljettu muuntaja on täynnä öljyä ja sen jäähdytysrivat ovat elastisia ja ne mukautuvat käytön aikana tapahtuviin öljyn tilavuuden muutoksiin. Suljetun rakenteen vuoksi öljy vanhenee hitaammin kuin paisuntasäiliöllä varustetuissa muuntajissa. (Monni 2018, 52.)

Muuntajan kuormituksen seuraamiseksi se voidaan varustaa öljynlämpömittarilla. Mittarissa voi olla tarpeen mukaan koskettimia, joilla voidaan antaa hälytys tai laukaista muuntajaa suojaava varokeuorinanerotin auki.

Kiinteistömuuntamoon asennettavan öljyeristeen muuntajan yläjännitepuolen kaapelit voidaan liittää muuntajaan kosketussuojatuilla pistokepäätteillä ja pienjänniteliittimet kosketussuojata, jolloin erillistä suojakoteloä tai häkkiä muuntajalle ei tarvitse olla lainkaan.



KUVA 3. Hermeettisesti suljettu öljyeristeen jakelumuuntaja (Finn Electric Oy 2017b)

Kuvassa 3 on esitetty hermeettisesti suljetun öljyeristeen jakelumuuntajan osia. Muuntajassa on kuljetusta varten nostolenkit (1), sidontalenkit (2) ja pyörät (14). Muuntajan yläjännite- (3) ja alajännitepuolen liittimet läpivienteineen sijaitsevat muuntajan kannella. Muuntajan kuormituksen seuraamista varten kannella on kosketinlämpömittari (5) ja erillistä lämpömittaria varten tasku (6). Muuntajan öljymäärä on todettavissa öljynkorkeuden osoittimesta (7) ja huoltoa varten öljylle on tyhjennys- (12) sekä täyttöaukko (12). Muuntajan alajännitepuolen jännitteen säätäminen suoritetaan kannella olevalla väliottokytkimellä (10). Muuntajan maadoitukset kytketään alaosassa ja kannella sijaitseviin liittimiin (8).

6.7.2 Kuivamuuntajat

Kuivamuuntajissa käämien eristeaineena käytetään yleensä valuhartsia. Tämän vuoksi kuivamuuntajat soveltuvat hyvin kiinteistömuuntamoihin niiden paloturvallisuuden vuoksi, sillä ne ovat itsestään sammuttavia. Öljyttömän rakenteen vuoksi paloturvallisuus on hyvä ja ympäristön saastumisvaara on minimaalinen. Muuntajan jäähdytys toimii luonnollisella ilmankierrolla käämien läpi. Suurilla tehoilla jäähdytystä voidaan tehostaa muuntajan alle sijoitetuilla jäähdytyspuhaltimilla. Käämien sisälle on sijoitettu lämpötilanmittausanturit, joilla valvotaan käämien lämpötilaa. Rautasydän voidaan lisäksi varustaa neljännellä mittausanturilla. Anturit liitetään erilliseen suojarieleeseen, johon asetellaan hälytys- ja varokeuormanerottimen laukaisuarvot. Suojarelettä voidaan käyttää ohjaamaan myös erillisiä muuntajan alle sijoitettavia jäähdytyspuhaltimia. (Aura & Tonteri 2002, 288; Finn Electric Oy 2019, 8-9.)



KUVA 4. Valuhartsieristeinen muuntaja (Finn Electric Oy 2019)

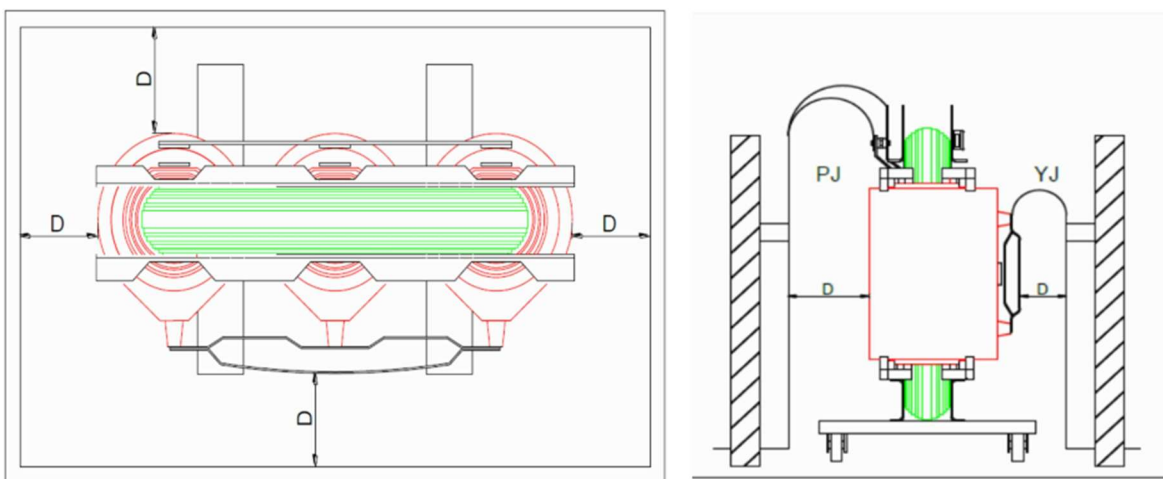
Kuvassa 4 on esitetty valuhartsieristeinen kuivamuuntaja osineen. Käämien sisällä olevien lämpötilanmittausantureiden johdotukset on päätetty koteloon (1) josta ne viedään lämpötilanmittausreleelle. Yläjännitepuolen liittimet ovat yläjännitekäämit kolmioon yhdistävien kiskojen päissä (5). Alajännitekäämien jännitteen säätäminen on tehtävissä siirtämällä yläjännitekäämien kierroslukua muuttavaa metalli-

levyä (6). Alajännitepuolen liittimet sijaitsevat muuntajan vastakkaisella puolella yläosassa (3). Muuntajan maadoitus kytketään puristuspalkissa olevaan pisteeseen (7). Muuntaja nostaminen on sallittua vain yläpalkissa olevista nostopisteistä (4). Tekniset tiedot ilmoitetaan tyyppikilvessä (2).

Valuhartsieristeisen muuntajan sijoituksessa ja käytössä on huomioitava, että ulommaisena olevan keskijännitekäämin pinta ei ole kosketussuojattu, vaan sitä on pidettävä jännitteisenä osana. Taulukossa 6 on esitetty valuhartsieristeisen muuntajan jännitteisten osien vähimmäissuojaetäisyydet muihin rakenteisiin. Suojaetäisyyksien täytyminen on huomioitava myös muuntajan ylä- ja alajännitepuolen kaapeloinnissa (KUVIO 11). Sijoitettaessa muuntaja keskijännitekojeiston kanssa samaan tilaan se voidaan varustaa erillisellä suojakotelolla, jolloin suojaetäisyydet ja kosketussuojaus täyttyvät automaattisesti, kotelointiluokan on tällöin oltava vähintään IP2X. Verkkoseinää käytettäessä taulukon 6 eristysväliin ”D” lisätään 100 mm, seinän ollessa IPXXB -kotelointiluokan täyttävä. Seinän tulee olla kiinteästi asennettu, jotta mahdollista siirtymistä ei tapahdu. Verkkoseinän korkeus pitää olla vähintään 2000mm. Puomiasteilla suojaaminen ei ole sallittua. (SFS 6001 2018, 54, 68.)

TAULUKKO 6. Suositeltavat eristysvälit käyttöjännitteen mukaan (Finn Electric Oy 2019)

Maksimi jännite Um (kV)	Eristystaso (kV)		Eristysväli (mm) ”D”
	Jännitekestoisuus	Syöksyjännitekestoisuus	
3,6	10	20-40	60-60
7,2	20	40-60	70-90
12	28	60-75	100-120
17,5	38	75-95	130-160
24	50	95-125	170-220
36	70	145-170	270-320

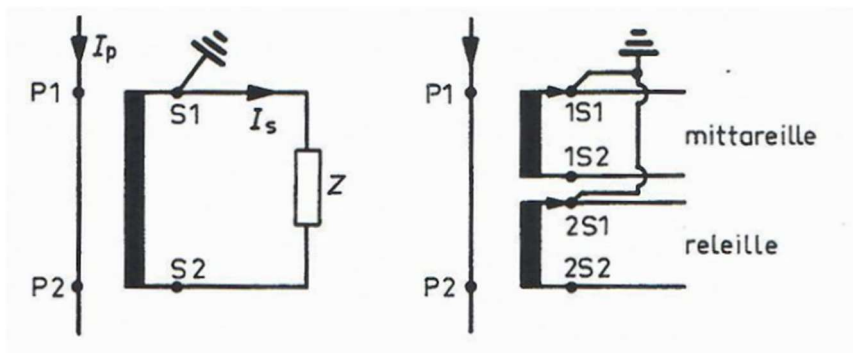


KUVIO 11. Valuhartsieristeisen muuntajan vaatimat suojaetäisyydet (Finn Electric Oy 2019)

6.8 Virtamuuntajat

Virtamuuntajat ovat erikoisrakenteisia muuntajia, joiden tarkoituksena on muuttaa mitattavan ensiöpiirin suuri virta kyseisen piirin mittauksessa tai suojauksessa käytettäville laitteille sopivaksi sekä eristää ensiö- ja toisiopiirit galvaanisesti toisistaan (ABB 2000b, 1). Virtamuuntaja eroaa perinteisestä muuntajasta siten, että ensiökäämin läpi kulkeva virta I_p määrittää toisiopiirissä kulkevan virran I_s (KUVIO 12), toisin kuin normaalissa muuntajassa ensiövirran suuruuden määrittää toisiokäämiin kytketyn kuormituksen ottama virta.

Virtamuuntajan toisiokäämin liittimet on pidettävä oikosuljettuina, jos niihin ei ole kytkettynä mittalaitteita. Normaalitylanteessa toisiopiiri on lähes oikosuljettuna, jolloin liittimien välinen jännite on pieni. Jos verkkoon kytketyn virtamuuntajan toisiopiiri avataan, voi jännite nousta hyvin suureksi, kilovolteihin asti. Toisiopiiri on myös maadoitettava toisesta navastaan, jotta eristysvian seurauksena ensiöpiirin jännite ei pääse toisiopiiriin. Ensiöpiirin navat merkitään P-kirjaimella ja toisiopiirin navat S-kirjaimella (KUVIO 12). (Elovaara & Haarla 2011, 214.)



KUVIO 12. Virtamuuntajan merkinnät (Elovaara & Haarla 2011, 214)

Virtamuuntajat jaetaan niiden käytön perusteella suojaus- tai mittausvirtamuuntajiksi. Samaa virtamuuntajaa voi käyttää myös molempiin tarkoituksiin, sekä suojaukseen että mittaukseen. Tällöin virtamuuntajassa on omat rautasydämet suojaukselle ja mittaukselle. Ensiökäämi on yhteinen, mutta jokaisella rautasydämellä on oma toisiopiirinsä. (Korpinen 1998b, 4.)

Virtamuuntajien valinnassa tärkeimpiä arvoja ovat mitoitusensiövirta, mitoitusensiövirta, mitoitus- taakka, tarkkuusluokka ja mittarivarmuuskerroin tai tarkkuusraja-kerroin. Lisäksi on huomioitava käyttöjännite, taajuus, eristystaso, terminen ja dynaaminen virrankestoisuus. (ABB 2000b, 1.) Virtamuuntajien tulisi vastata mahdollisimman hyvin sen todellista käyttöaluetta, jolloin virtamuuntajalla mitattavan

virran tulisi olla 5...120 % virtamuuntajan mitoitusensiövirrasta. Energiateollisuus Ry:n suositus energianmittauksessa käytettävien virtamuuntajien toisiovirran arvoksi on 5 A ja tarkkuusluokaksi 0.2 S. (Energiateollisuus Ry 2016b, 21.)

Virtamuuntajan tarkkuusluokka määräytyy suurimpien sallittujen virta- ja kulmavirheiden mukaan (TAULUKKO 7). Suojausvirtamuuntajissa on tarkkuusluokkaa kuvaavan numeron jälkeen kirjain P. Kulmavirheellä tarkoitetaan ensiö- ja toisiovirran ajallista vaihesiirtokulmaa, joka on positiivinen, jos toisiovirta on ensiövirran edellä. Virtavirhe on toisiopiirin virran ja toisiopuolelle redusoidun ensiövirran ero prosentteina. Virtavirhe voidaan määrittää seuraavalla yhtälöllä:

$$\frac{K_N \times I_S - I_P}{I_P} \times 100\% \quad (3)$$

jossa K_N on nimellismuuntosuhde
 I_P on todellinen ensiövirta ja
 I_S on todellinen toisiovirta, kun ensiökäänin virta on I_P .

(ABB 2000b, 2.)

TAULUKKO 7. Virtamuuntajien tarkkuusluokat (Elovaara & Haarla 2011, 202; ABB 2000b, 2)

Luokka	± % Virtavirhe, kun I_n %						± min Kulmavirhe, kun I_n %				
	1 %	5 %	20 %	50 %	100 %	120 %	1 %	5 %	20 %	100 %	120 %
0.1		0,4	0,2		0,1	0,1		15	8	5	5
0.2		0,75	0,35		0,2	0,2		30	15	10	10
0.2S	0,75	0,35	0,2		0,2	0,2	30	15	10	10	10
0.5		1,5	0,75		0,5	0,5		90	45	30	30
0.5S	1,5	0,75	0,5		0,5	0,5	90	45	30	30	30
1		3	1,5		1	1		180	90	60	60
3				3		3					
5				5		5					
5P					1						
10P					3						

Jotta virtamuuntajat pysyvät ilmoitetussa tarkkuusluokassaan, toisiopiirissä olevat laitteet ja johtimet täytyy olla valittu siten, että ne muodostavat taakan, joka on 25...100 % mittamuuntajien toision mitoitustaakasta. Toisiopiirin taakka muodostuu siihen kytkettyjen johtimien ja niiden liitosten sekä laitteiden muodostamasta kuormituksesta. Taakka ilmoitetaan näennäistehona (VA). Mittarin taakka selviää mittarin teknisistä tiedoista ja liitosten taakkana voidaan käyttää arvoa 0,075 VA. Johtimien taakka voidaan laskea seuraavan kaavan avulla:

$$S = I_{SN}^2 \times \rho \times \frac{l}{A} \quad (4)$$

jossa S on johtimen taakka (VA)
 I_{SN} on nimellistoisiovirta (A)
 ρ on kuparijohtimen ominaisvastus (0,0175 $\Omega/\text{mm}^2/\text{m}$)
 l on johtimen pituus (m) ja
 A on johtimen poikkipinta (mm^2).

(Energiateollisuus Ry 2016b, 44)

Mittaustarkoituksiin tehdyille virtamuuntajille ilmaistaan mittarivarmuuskerroin F_S . Kun nimellinen ensiövirran kerrotaan mittarivarmuuskertoimella, saadaan ensiövirran arvo, jolla virtamuuntajan yhdistetty mittausvirhe on vähintään 10 %. Arvo kuvaa sitä, kuinka hyvin virtamuuntaja suojaaa siihen kytkettyjä mittalaitteita kyllästymällä ylivirran vaikutuksesta. Kertoimen arvoja ei ole standardisoitu, mutta yleisesti tavallisia arvoja ovat 5 ja 10. (ABB 2000b, 2.)

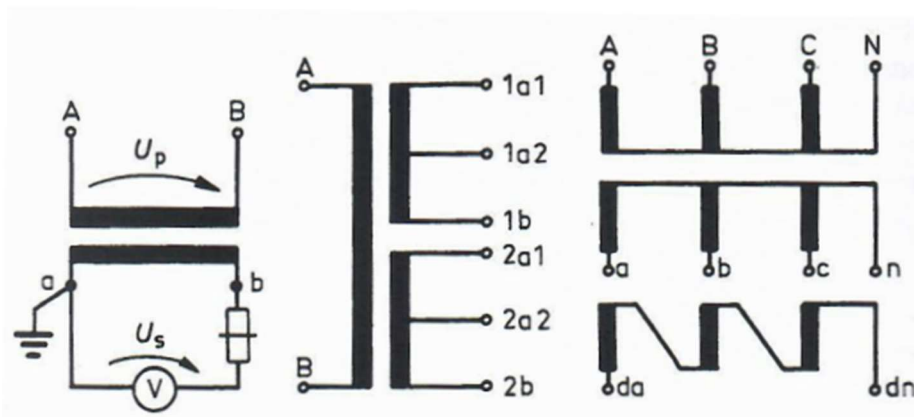
Suojaustarkoituksiin tehdyille virtamuuntajille ilmoitetaan mittarivarmuuskertoimen F_S sijaan tarkkuusrajakerroin F_A , joka on mitoitustarkkuusrajavirran ja mitoitusedensiövirran suhde. Tarkkuusrajavirralla tarkoitetaan ensiövirran arvoa, jolla virtamuuntajan yhdistetty virhe on enintään 5 % luokassa 5P ja enintään 10 % luokassa 10P. Mittarivarmuuskerroin ilmoitetaan tarkkuusluokan jälkeen, esimerkiksi 5P10. (ABB 2000b, 2.)

6.9 Jännitemuuntajat

Jännitemuuntajia käytetään muuntamaan mitattavan ensiöpiirin suurjännite toisiopiiriin kytketyille laitteille sopivaksi. Jännitemuuntajat voidaan jakaa virtamuuntajien tapaan niiden käytön perusteella suojaus- ja mittaustarkoituksiin. Jännitemuuntajan toimintaperiaate vastaa normaalin muuntajan toimintaa, joka on lähes tyhjäkäynnillä. Virtamuuntajien tapaan jännitemuuntajassa voi olla useampia toisiokäämejä: käämi jännitemittaukseen, suojauskäämi sekä suojaukseen että mittaukseen ja avokolmiokäämi. (Aura & Tonteri 2002, 293-294; Elovaara & Haarla 2011, 215.)

Kuviossa 13 on esitetty jännitemuuntajien periaatetta ja niiden liittimiä. Ensiökäämin liittimet merkitään isoilla kirjaimilla ja toisiokäämin liittimet pienillä kirjaimilla. Tunnuksilla N ja n tarkoitetaan liittimiä, jotka kytketään kolmivaiheyrhmän tähtipisteeksi. Liittimet da ja dn ovat avokolmiokäämille. Kuvassa näkyy myös jännitemuuntajan suojaus varokkeella ja maadoitus. Avokolmiokäämiä voidaan käyttää esimerkiksi keskijänniteverkossa maasulkutilanteiden ilmaisemiseen, jolloin da- ja dn-liittimien välistä mitataan verkon tähtipisteen jännitettä. (Elovaara & Haarla 2011, 220.)

Keskijännitetehonmittauksessa käytetään kuviossa 13 näkyvää oikeanpuolimmaista kytkentää, jossa kolme yksivaiheista jännitemuuntajaa kytketään tähteen ja tähtipisteet N ja n maadoitetaan. Kippivärähtelynvaimennusvastus kytketään avokolmiokäämiin ja sähkömittarille lähtevät vaiheet a, b ja c liittimiin. Jännitemuuntajan merkintä on tällöin $20000\text{ V}:\sqrt{3} / 100\text{ V}:\sqrt{3} / 100\text{ V}:3$. Keskijännitetehonmittauksen piirikaavio on esitetty liitteessä 1. Energiateollisuus Ry:n mukaan mittauksessa käytetään jännitemuuntajia, joiden tarkkuusluokka on 0.2 ja toisiojännite 58 V (Energiateollisuus Ry 2016b, 21).



KUVIO 13. Jännitemuuntajien merkintöjä (Elovaara & Haarla 2011, 220)

Jännitemuuntajien valinnassa tärkeimpiä arvoja ovat mitoitusensiöjännite, mitoitusjännitekerroin, mitoitustoisiojännite, mitoitustaakka ja tarkkuusluokka. Jos jännitemuuntaja kytketään 3-vaiheisessa verkossa vaiheiden väliin, ensiöjännite ilmoitetaan pääjännitteenä, esimerkiksi 20000 V, ja toisiojännitteenä on silloin 100V. Jos jännitemuuntaja kytketään vaiheen ja tähtipisteen tai maan väliin, ilmoitetaan ensiöjännite vaihejännitteenä, esimerkiksi $20000 \text{ V}:\sqrt{3}$, jolloin toisiojännite on $100 \text{ V}:\sqrt{3}$. Avokolmiokäämien jännitteenä on $100 \text{ V}:3$. (ABB 2000b, 7.)

Mitoitusjännitekertoimen ja ensiöjännitteen tulolla ilmoitetaan suurin ensiöjännite (TAULUKKO 8), jolla jännitemuuntajaa voidaan käyttää tietty aika. Kertoimen suuruus riippuu verkon maadoituksesta ja siitä, miten muuntajan ensiökäämi on kytketty verkkoon. (ABB 2000b, 7.)

TAULUKKO 8. Mitoitusjännitekertoimen arvoja (ABB 2000, 7)

Mitoitus-jännitekerroin	Aika	Ensiön kytkentätapa ja verkon maadoitus
1,2	Jatkuva	Vaiheiden välissä kaikissa verkoissa. Muuntajan tähtipisteen ja maan välissä kaikissa verkoissa
1,2	Jatkuva	Vaiheen ja maan välissä tehollisesti maadoitetuissa verkoissa
1,5	30s	
1,2	Jatkuva	Vaiheen ja maan välissä ei-tehollisesti maadoitetussa verkossa, jossa on automaattinen maasulun laukaisu
1,9	30s	
1,2	Jatkuva	Vaiheen ja maan välissä maasta erotetussa tai sammutetussa verkossa, jossa ei ole automaattista maasulun laukaisua.
1,9	8h	

Virtamuuntajien tapaan jännitemuuntajille on annettu tarkkuusluokat, jotka määritellään jännite- ja kulmavirheiden mukaan (TAULUKKO 9). Jännitemuuntajan tulee pysyä tarkkuusluokassaan jännitteen ollessa 80...120 % mitoitusarvosta ja taakan tulee olla 25...100 % nimellisestä arvosta. Suojausjännitemuuntajien pitää lisäksi täyttää jonkin mittaustarkkuusluokan lisäksi luokkien 3P tai 6P vaatimukset. Luokissa 3P ja 6P virherajat eivät saa ylittyä mitoitusjännitekertoimen mukaisella jännitteellä ja alhaisimmillaan 5 % jännitteellä nimellisestä. Tämän vuoksi suojausjännitemuuntajia voidaan käyttää myös mittaukseen. Avokolmiokäämin tarvitsee täyttää vain luokan 3P tai 6P vaatimukset. Pelkän kippivärähtelyvastuksen kytkentää varten avokolmiokäämin ei tarvitse täyttää tarkkuusluokkia. (Elovaara & Haarla 2011, 216.)

TAULUKKO 9. Jännitemuuntajien tarkkuusvaatimukset (Elovaara & Haarla 2011, 216)

Luokka	Jännitevirhe %	Kulmavirhe minuutteina
0,1	0,1	5
0,2	0,2	10
0,5	0,5	20
1	1,0	40
3	3,0	-
3P	3,0	120
6P	6,0	240

Kippivärähtelyllä tarkoitetaan yksinapaisesti maadoitetun induktiivisen jännitemuuntajan ja verkon kapasitanssien välille syntyvää resonanssivärähtelyä. Värähtely voi alkaa äkillisesti esimerkiksi verkon kytkentätoimenpiteen seurauksena ja se lakkaa kuormituksen lisääntyessä. Värähtely voi aiheuttaa yllilyöntejä ja se johtaa helposti jännitemuuntajan tuhoutumiseen termisen ylikuormituksen vuoksi. Kippivärähtelyn vaimentamiseksi paras ratkaisu on avokolmioon kytkettävä vaimennusvastus (KUVIO 14). Suositus vaimennustehoksi 12 ja 24 kV:n jännitemuuntajilla on 450 W, jolloin avokolmiokäämin jännitteellä 100 V:3 vaimennusvastuksen arvo on 22 Ω . (ABB 2000, 12.)



KUVIO 14. Värähtelynvaimennusvastus (ABB 2000b, 12)

7 KESKIJÄNNITEKAAPELIT JA NIIDEN VARUSTEET

Keskijännitekaapelin rakenneosia ovat johdin, johdinsuoja, johdineristys, hohtosuoja, kosketussuoja ja ulkoiset suojakerrokset kuten vaippa. Johdin-, hohto- ja kosketussuojia käytetään vain keski- ja suurjännitekaapeleissa. Kaapelien johtimet ovat kuparia tai alumiinia. Johtimet tehdään pyörölangasta pyöreään muotoon tiivistämällä johtimen pintakentänvoimakkuuden minimoimiseksi ja osittaispurkausten vähentämiseksi. Johtimen pinnalla oleva johdinsuoja on valmistettu puolijohtavasta materiaalista ja sen tarkoituksena on tasata johtimen pinnan epätasaisuudet ja samalla pienentää kentänvoimakkuushuippuja. Johdineristys on johdinsuojan ja hohtosuojan välissä oleva eristys, joka antaa kaapelille tarvittavan jännitekestoisuuden. Lisäksi sen on siirrettävä mahdollisimman tehokkaasti johtimessa syntyvä lämpö pois kaapelista. Hohtosuojan tarkoituksena on yhdessä johdinsuojan kanssa rajata johtimen aiheuttama sähkökenttä kahden sylinteripinnan väliin. Hohtosuoja valmistetaan johtavista metallinauhoista tai puolijohtavasta materiaalista. Viimeisenä rakenneosana ennen ulkovaippaa on kosketussuoja, joka toimii varaus- ja vikavirtojen kulkutienä, häiriösuojana ja turvallisuustekijänä. Kosketussuoja valmistetaan aina johtavasta metallista. Kosketussuoja voi olla kaapelin rakenteesta riippuen jokaiselle vaiheelle oma tai yhteinen, jossa kaapelin kolme vaihetta on sijoitettu saman ulkovaipan sisälle. (Elovaara & Haarla 2011, 307-311.)

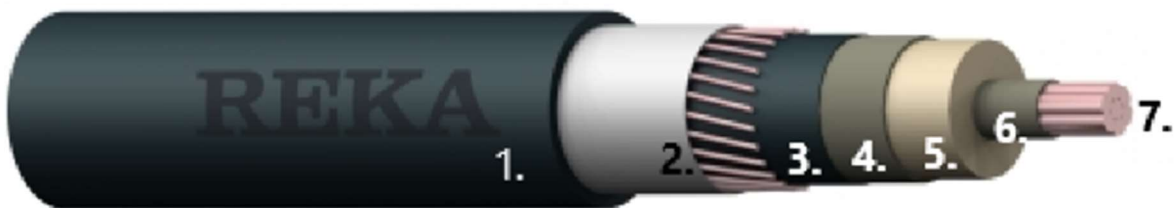
7.1 Muuntamoiden kaapeloinnit

Suomessa keskijänniteverkon maakaapeloinnissa yleisin kaapelityyppi on AHXAMK-W ”Wiski” -tyyppin kaapeli. Kuvassa 5 on esitetty AHXAMK-W -kaapelin poikkileikkaus ja sen osat. AHXAMK-W on alumiinijohtiminen (7), hohtosuojattu (4), PEX-eristeinen (5), PE-vaippainen (1) vesitiivis 3-johdinkaapeli. Kaapelin johtimet on kerrattu kuparisen keskusköyden (8) ympärille ja kosketussuojana toimii alumiinilaminaattikerros (2). Kosketussuojan alapuolella on vesitiivistys kerros (3). Johtimen (7) pinnalla olevan johdinsuojan tarkoituksena on tasata johtimen pinnan epätasaisuudet. Poikkipinta voi olla renkasverkossa esimerkiksi 3x240AL+70CU. Kaapelia voidaan käyttää myös kiinteistön sisäisessä kaapeloinnissa ja kojeistojen liitântäkaapeleina, esimerkiksi mittauskennon yhdistämisessä katkaisijakennoon.



KUVA 5. AHXAMK-W kaapelin rakenne (REKA 2021a)

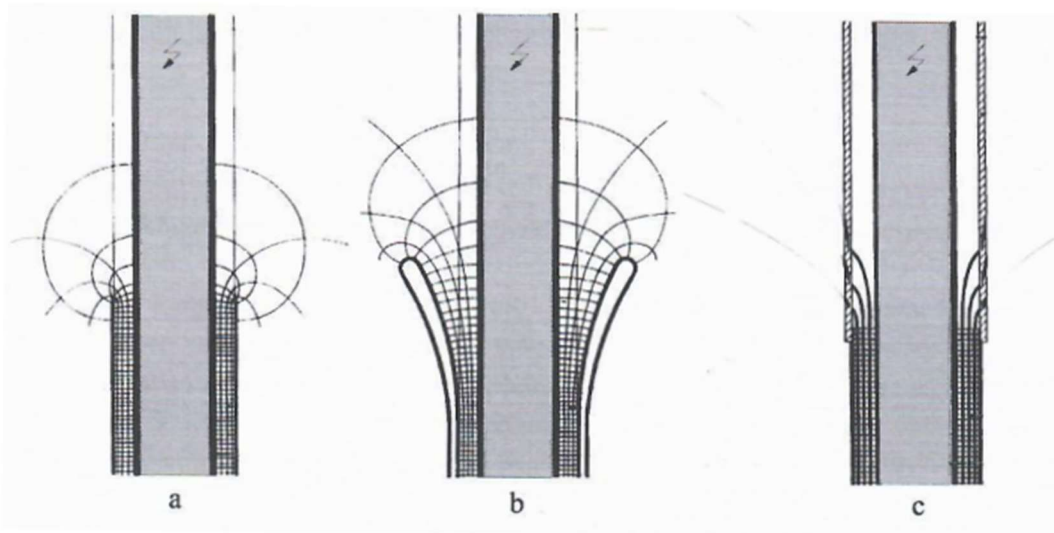
Varokekuormanerotimella suojatuissa kojeiston muuntajalähdöissä on yleisesti käytössä HXCMK 1x35CU/16CU -yksijohdinkaapeli. HXCMK on kuparijohtiminen (7), hohtosuojattu (4), PEX-eristeinen (5) ja PVC-vaippainen kaapeli (1). Kaapelin kosketussuojana on kerros kuparilankoja ja kuparinauhassidos (2). Kaapelissa on AHXAMK-W:n tapaan vesitiivistys (3) ja johdinsuoja (6). Kaapeli on helppo asentaa sen hyvien taivutusominaisuuksien vuoksi. Kaapelit on pyrittävä niputtamaan kolmioon aina kun se on mahdollista muuntamon aiheuttaman magneettikenttien pienentämiseksi (Roine ym. 2018, 16).



KUVA 6. HXCMK kaapelin rakenne, jossa 3. vesitiivistys, , 6. johdinsuoja (REKA 2021b)

7.2 Kaapelipäätteet ja jatkokset

Liitettäessä keskijännitekaapeleita muuntajiin ja kojeistoihin kaapeleissa käytetään päätteitä. Suurjännite aiheuttaa kaapelin päätte- ja jatkosrakenteelle erityisvaatimuksia. Kun kaapelin eristyksen päältä poistetaan pois puolijohtava hohtosuojakerros, syntyy jännitteisessä johtimessa hohtosuojan reunaan voimakas sähkökenttä (KUVA 7a). Jos tätä sähkökentän voimakkuutta ei pääterakenteessa heikennetä, tämä kohta sähkökentän vaikutuksesta kuumenee ja tietyn ajan kuluttua tuhoaa kaapelipäätteen tai jatkoksen. Jatkosrakenteessa erona on, että sähkökenttä jatkuu kaapelijatkoksen jälkeen, jolloin jatkosrakenteen tulee mukailla kaapelin rakennetta mahdollisimman hyvin. (Monni 2008, 127-128.)

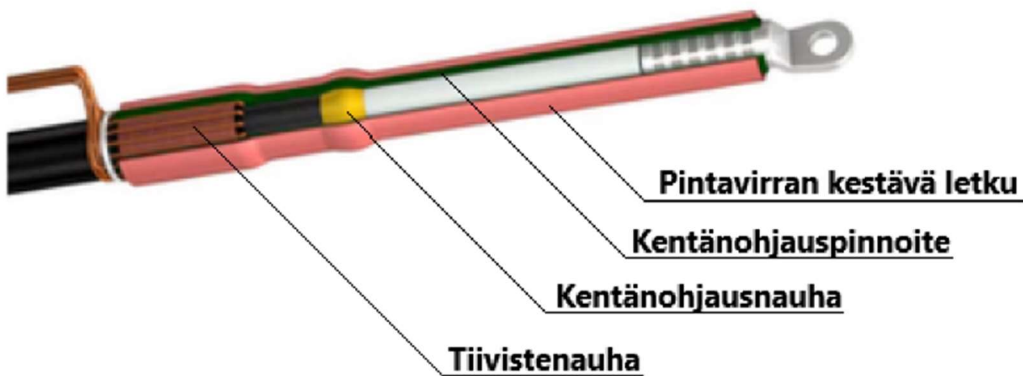


KUVA 7. Sähkökentän jakautuminen kaapelipäätteessä (Aro yms. 2015, 160)

Kentänohjauksella ohjataan sähkökenttä laajemmalle alueelle, jolloin voimakasta sähkökenttää pienelle alueelle ei pääse syntymään. Kuvan 7 b-kohdassa on esitetty geometrinen kentänohjaus, jossa hohtosuojan päälle asetetaan puolijohtava kartiomainen elektrodi. Tätä kentänohjaustyyppiä käytetään päälle työnnettävissä päätteissä, esimerkiksi pistokepäätteissä. Kuvan 7 c-kohdassa on esitetty permittiivisyyksien eroon tai resistiiviskapasitiiviseen ohjaukseen perustuva kentänohjaus, jossa eristekerroksen päälle asetetaan kentänohjauspinnoite tai letku. (Monni 2008, 128-129; Aro yms. 2015, 161.)

7.2.1 Kutistemuovi- ja kylmäkutistemuovipäätteet

Kutistemuovipäätteen rungon muodostaa pintavirran kestävä kutistemuoviletku, jonka sisäpintaan on tehty kentänohjauspinnoite tai kentänohjaus suoritetaan erillisellä kaapelieristeen päälle tulevalla letkulla tai nauhalla (KUVA 8). Runkoletku kutistetaan maadoitusliittimen päälle kutistetun johtavan letkun päälle. Kaapelirakenteen perusteella käytetään erilaisia tiivistemassoja ja -teippejä päätteen asennusohjeiden mukaisesti. Ulkopäätteen pintavirtaa kestävä letku on pitempi kuin sisäpäätteessä ja ulkopäätteeseen asetetaan laippoja pintavirtakestoisuuden parantamiseksi. Muuten sisä- ja ulkopäätteen rakenne on samanlainen. (Monni 2018, 129.)



KUVA 8. Kutistemuovipäätteen rakenne (mukaiillen TE Connectivity 2013, 20)

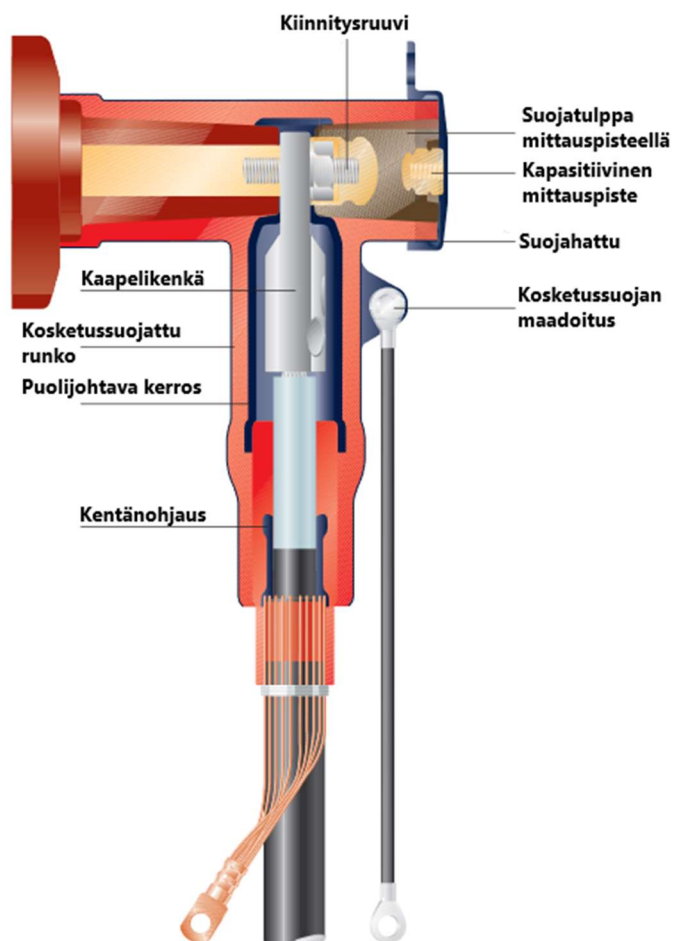
Kylmäkutistemuovipäätteen runkona on kutistemuovipäätteen tavoin pintavirtaa kestävä letku ja sen sisäpuoli on päällystetty kentänohjauspinnoitteella. Kylmäkutistemuovipäätteen asennuksessa ei kuitenkaan tarvita lämmittämistä, vaan päate vedetään liukastusaineen avulla asennusohjeen mukaisesti valmistellun kaapelin ja maadoitusliittimen päälle. Malli soveltuu asennettavaksi erityisen hyvin paikkoihin, joissa ei ole mahdollisuutta tehdä tulitöitä. (Monni 2018, 130.)

7.2.2 Pistokepääte

Kolmas päätetyyppi on pistokemallinen päate. Pistokepäätteiden käyttö on yleistynyt SF₆-kojeistojen myötä, pienempien vaadittavien ilmväliden vuoksi. Pistokepääte voi olla eristetty tai kosketussuojattu.

Kosketussuojatun päätteen koskettaminen jännitteisenä on turvallista. Eristetyssä päätteessä ei ole kosketussuojatun päätteen tavoin johtavaa pintakerrosta, joka on yhdistetty maapotentiaaliin, minkä vuoksi päätte ei ole kosketusturvallinen jännitteisenä. (Monni 2018, 130.)

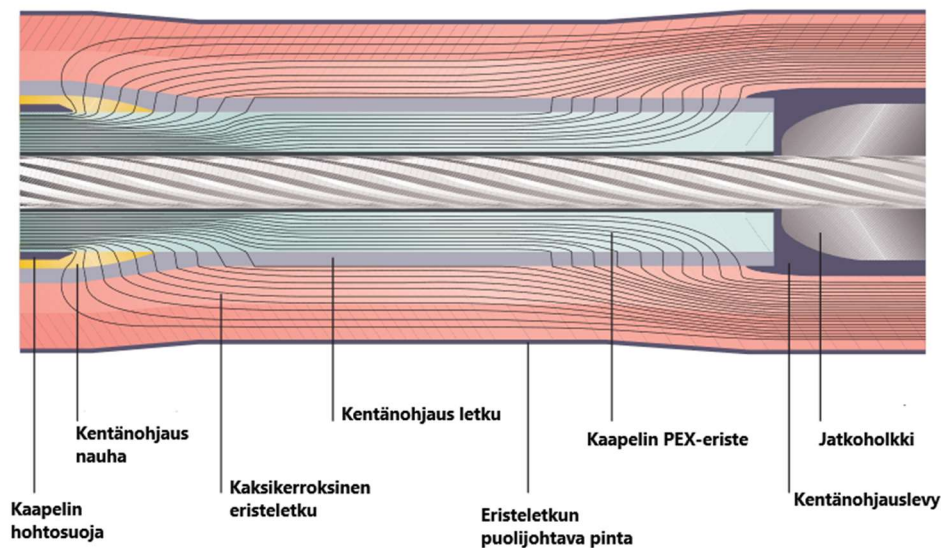
Pistokepäätteet on jaoteltu eri luokkiin niiden nimellisvirran, jännitteen ja oikosulkukestoisuuden mukaan. Lisäksi erona on päätteen kiinnitystapa ja läpivientieristimen koko. Tyypin A 250 A ja tyypin B 400 A päätteissä on liukukosketin, jolla päätte kytketään läpivientieristimeen. Tyypin C1 630 A päätteet liitetään pultiliitoksella. Pistokepäätteitä on saatavilla kulma- tai suoraliitos mallisina. Kuvassa 9 on kulmamallinen tyypin C1 630 A kosketussuojattu pistokepäätte, joita käytetään esimerkiksi liitettäessä rengasverkon kaapeleita RMU-kojeistoihin. (TE Connectivity 2013, 46-52.)



KUVA 9. 630 A C1 -tyypin kulmapistokepäätte (mukaillen TE Connectivity 2013, 48)

7.2.3 Kaapelijatkos

Jatkosrakenne eroaa pääterakenteesta siinä, että hohtosuoja ja sähkökenttä jatkuvat kaapelista toiseen. Tämän vuoksi kaapelijatkoksen on mahdollisimman hyvin vastattava yhtenäisen kaapelin rakennetta. Johtimet jatketaan puristettavilla tai momenttiruuveilla olevilla jatkosholkeilla. Jatkosholkkien ja johtimien eristeen päälle tulevat kentänohjaus-, eristys- ja suojausletkut. Kosketussuoja jatketaan tinatulla kupariverkolla kaapelista toiseen. Ulommaiseksi tulee kutisteletku, joka estää veden pääsemisen jatkoksen sisälle. Kuvassa 10 on esitetty sähkökentän jakautuminen yksijohdinkaapelin jatkoksen kohdalla. Kuvan jatkoksen päälle tulisi vielä kosketussuojan jatkona toimiva verkko ja ulomainen suojaletku. (Monni 2018, 131.)



KUVA 10. Sähkökentän jakautuminen kaapelijatkoksen kohdalla (mukaiillen TE Connectivity 2013, 17)

8 MAADOITUKSET

Rakennettaessa kuluttajamuuntamo rakennuksen sisälle, jossa suurjännitelaitteisto syöttää pienjänniteasennuksia, kaikki suur- ja pienjännitejärjestelmien suoja- ja järjestelmämaadoitukset on kytkettävä yhteiseen maadoitusjärjestelmään. Maasulkutilanteessa, jossa keskijänniteverkon maasulkuvirta kulkee muuntamon maadoitusjärjestelmän impedanssin kautta maahan, aiheutuu maadoitusjärjestelmässä potentiaalinen nousu, jota kutsutaan maadoitusjännitteeksi. Yhdistettyä maadoitusta käytettäessä, maasulkuvirran aiheuttama maadoitusjännite esiintyy myös pienjännitejärjestelmien maadoitusjärjestelmissä. Henkilöturvallisuuden takaamiseksi maadoitusjärjestelmän impedanssi on määriteltävä sallitun maadoitusjännitteen ja verkon maasulkuvirran mukaan:

$$Z_E = \frac{U_E}{I_{EF}} \quad 5)$$

jossa Z_E on maadoitusjärjestelmän impedanssi (Ω)

U_E on maadoitusjännite (V) ja

I_{EF} on maasulkuvirta (A).

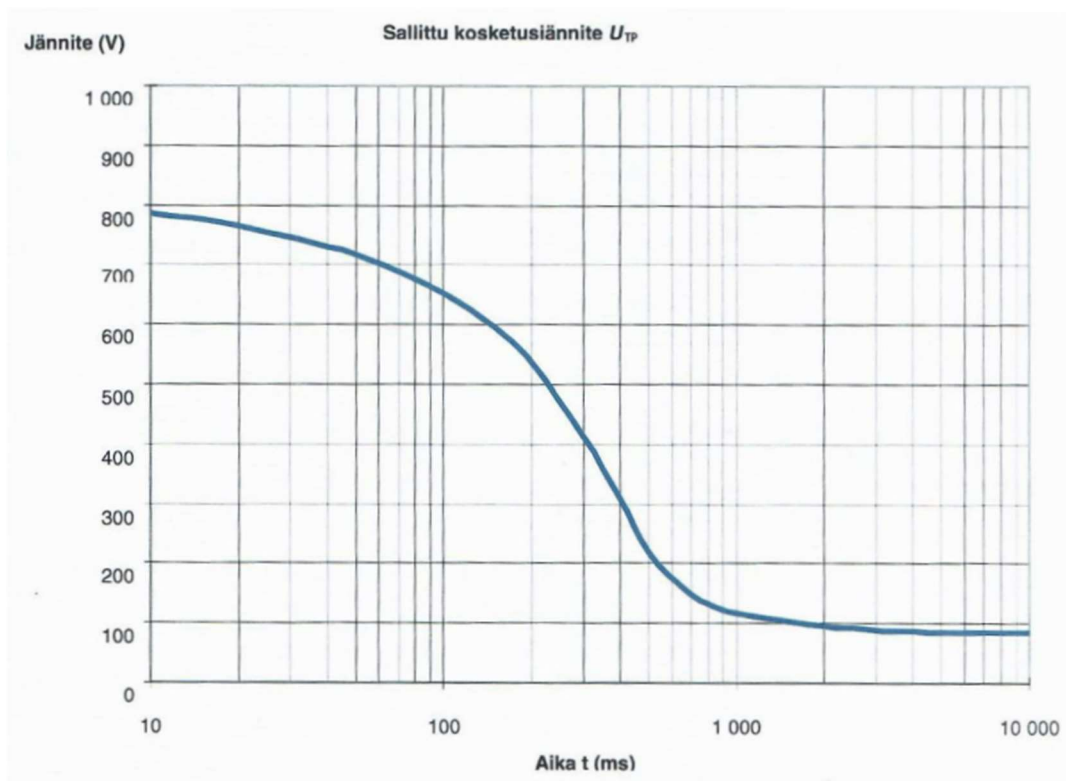
(Tiainen, Nurmi, Koivisto Ylinen & Kauppila 2019, 154; Tiainen 2017, 154; SFS 6001 2018, 129.)

Osa syntyvästä maadoitusjännitteestä U_E esiintyy kosketusjännitteenä U_{TP} ja askeljännitteenä U_A . Kosketusjännitteellä tarkoitetaan kahden samanaikaisesti kosketeltavissa olevan osan tai kohdan välistä jännitettä ja vastaavasti askeljännitteellä kahden askelpituudella olevan maan pinnan pisteen välistä jännitettä. SFS-standardissa 6001 esitetään enimmäisarvot maadoitusjännitteelle sallitun kosketusjännitteen mukaan. Kosketusjännitearvojen täytyessä myös askeljännitteet ovat turvallisella tasolla. Yhdistettyä pien- ja suurjännitejärjestelmien maadoitusta saadaan käyttää TN-järjestelmissä seuraavissa tapauksissa:

- Kun muuntamo syöttää yhtä rakennusta, jonka pienjännitejärjestelmä on maadoitettu ainoastaan yhdessä paikassa pääkeskuksella, maadoitusjännite U_E saa olla korkeintaan yhtä suuri kuin kosketusjännite U_{TP} . Maadoitusjännitteen U_E sallittu arvo on luettavissa suoraan kuvion 15 käyrältä.

- Kun muuntamon syöttämä pienjännitejärjestelmä on maadoitettu useammassa kuin yhdessä paikassa, maadoitusjännitteen arvo saa olla $U_E \leq 2 \times U_{TP}$. Tilanne on tyypillinen jakeluverkon muuntamolla, jossa jokaisessa pienjänniteliittymässä on maadoituselektrodi ja pienjännitejakeluverkossa 200m välein.
- Muuntamo liittyy laajaan maadoitusjärjestelmään.

(Tiainen yms. 2019, 51-55; SFS 6001 2018, 91.)



KUVIO 15. Sallittu kosketusjännite poiskytkentäajan mukaan (SFS 6001 2018, 97)

Huonoilla maadoitusolosuhteilla maadoitusjännitteen U_E arvo voi olla suurempi, jos toteutetaan SFS-standardin 6001 liitteessä E annetut erityistoimenpiteet. Taajamissa saavutetaan yleensä taso $U_E \leq 2 \times U_{TP}$ tai asennus liittyy laajaan maadoitusjärjestelmään. Kuluttajamuuntamoita suunniteltaessa kannattaa varmistaa verkkoyhtiöltä vaadituista maadoitusjärjestelmistä ja maadoitusresistanssin arvoista. (Tiainen yms. 2019, 55; SFS 6001 2018, 91.)

8.1 Laaja maadoitusjärjestelmä

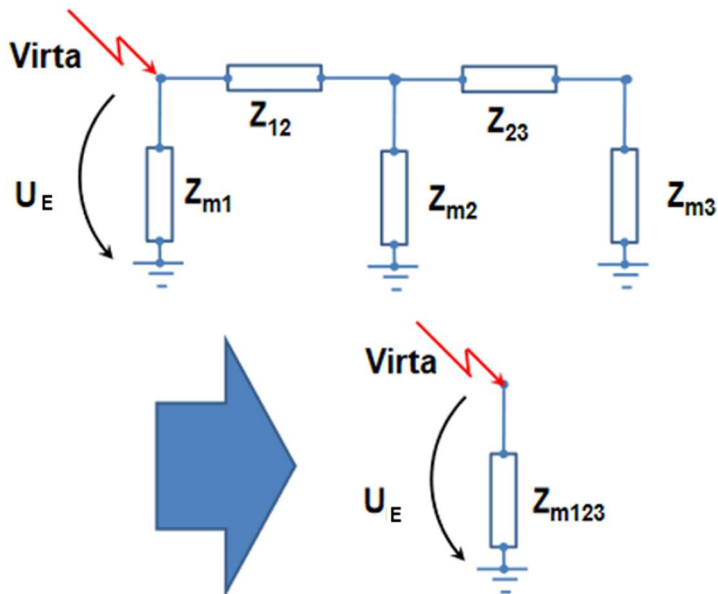
Laajalla maadoitusjärjestelmällä tarkoitetaan tilannetta, jossa muuntamo kytkeytyy keskijännitekaapelien keskusköysien ja muiden mahdollisten maadoitusjohtimien välityksellä muiden muuntamoiden maadoitukseen ja muuntamoilta lähtevien pienjännitekaapeleiden PEN-johtimien välityksellä edelleen muihin paikallisiin maadoitusjärjestelmiin. Maadoitusjärjestelmä muodostaa silloin verkkomaisen järjestelmän, jolloin vikatilanteessa maasulkuvirta jakautuu siten, että paikallisen maadoitusjärjestelmän potentiaalinen nousu pienenee. Tyypillisesti kaupunkien keskustoissa ja suurilla teollisuusalueilla on paikalla laaja maadoitusjärjestelmä. Tiedot laajasta maadoitusjärjestelmästä on saatavissa verkkoyhtiöltä. On huomattava, että laajan maadoitusjärjestelmän on oltava tarpeeksi verkkomainen ja yhdistyksiä muihin muuntopiireihin on oltava tietyin välein enemmän kuin kaksi. Esimerkiksi maaseudulla ketjutetut maakaapeloidut muuntamot eivät muodosta laajaa maadoitusjärjestelmää. (Tiainen yms. 2019, 52; SFS 6001 2018, 136.)

Rakennettaessa uutta muuntamo laajan maadoitusjärjestelmän alueelle ei muuntamon maadoituselektrodin maadoitusresistanssia tarvitse mitata. Ennen käyttöönottoa on kuitenkin varmistettava mittauksin muuntamon luotettava liittyminen laajaan maadoitusjärjestelmään. Mittausjohtimena voidaan käyttää esimerkiksi asennetun keskijännitekaapelin keskusköyttä tai vaihejohdinta, jonka avulla voidaan sarjmittauksella todeta, missä kunnossa muut yhteydet laajaan maadoitusjärjestelmään ovat. (Tiainen yms. 2019, 70.)

8.2 Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä

SFS-standardin 6001 2018 uudistuksen myötä maadoitusjärjestelmiin lisättiin yhdistetyn maadoitusjärjestelmän määrite. Tyypillisiä yhteen liitettyjä maadoitusjärjestelmiä ovat taajamien ja maaseudun maakaapeloidun keskijänniteverkon jakelumuuntamot, joiden maadoitusjärjestelmät ovat yhteydessä toisiinsa ketju- tai silmukkamaisesti. Maadoitukset eivät kuitenkaan muodosta riittävää verkkomaisuutta, jolloin laajan maadoitusjärjestelmän ehdot eivät täyty. Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä muodostuu, kun maakaapeloidun verkon muuntamoiden maadoitusjärjestelmät kytkeytyvät toisiinsa keskijännitekaapelien kosketussuojien, keskusköysien ja kaapeleiden rinnalle asennettujen maadoituselektrodien kautta. Yhteen liitettyjen muuntamoiden maadoituselektrodien maadoitusresistanssien ja muuntamoiden yhdistysjohtimien impedanssien perusteella voidaan muodostaa resaltoiva maadoitusimpedanssi, jossa maadoitusjärjestelmän vaikutusta tarkastellaan kokonaisuutena. Resaltoiva maadoitusimpedanssi on

huomattavasti pienempi kuin yksittäisen muuntamon maadoituselektrodin maadoitusresistanssi, jolloin ketjussa olevan muuntamon maadoitusresistanssin vaadittavan arvon ei tarvitse olla yhtä pieni kuin kokonaan erillään olevan yksittäisen muuntamon. (Tiainen yms. 2019, 71-72; SFS 6001 2018, 145.) Kuviossa 16 on esimerkki kolmen muuntamon resultoivasta maadoitusimpedanssista.



KUVIO 16. Resultoiva maadoitusimpedanssi (mukaillen Mäkinen 2016, 17)

Kuvasta voidaan johtaa seuraava kaava, jossa lasketaan ensimmäisen muuntamon Z_{M123} resultoiva maadoitusimpedanssi, jossa on huomioitu myös yhdysjohtimien vaikutukset:

$$Z_{M123} = \left(\frac{1}{Z_{M1}} + \left(\frac{1}{Z_{12} + Z_{M2}} \right) + \left(\frac{1}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{M3}} \right) \right)^{-1} \quad 6)$$

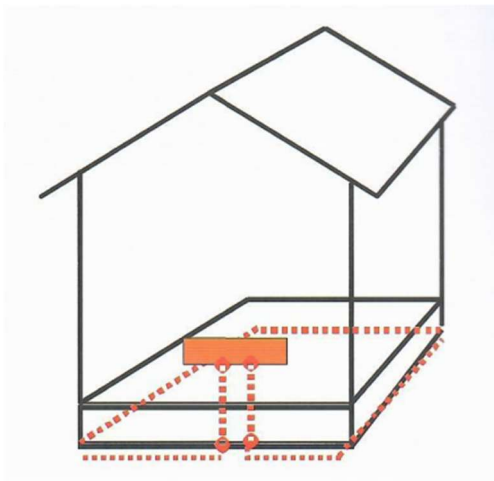
jossa Z_{M123} on muodostettu resultoiva maadoitusimpedanssi (Ω)
 Z_{M1-M3} on muuntamoiden maadoituselektrodien maadoitusresistanssit (Ω)
 Z_{12} on muuntamon 1 ja välisien yhdistysjohtimien impedanssi ja
 Z_{23} on muuntamon 2 ja 3 välisien yhdistysjohtimien impedanssi (Salo 2020, 21).

Rakennettaessa uusi muuntamo, joka kytkeytyy yhteen liitettyyn maadoitusjärjestelmään, voidaan muuntamon maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssi mitata käännepestemenetelmällä ennen käyt-

töönottoa, jolloin muuntamoiden välisten maadoitusjärjestelmien yhdistysjohtimien on oltava irti. Yhdistysjohtimien ollessa kiinni käännepestemenetelmä antaa epäluotettavan tuloksen maadoitusjärjestelmän laajuuden vuoksi. Jos maadoitusresistanssin mittaus ei ole kohtuullisilla mittausjärjestelyillä mahdollista ja tiedossa on muuntamon sijaintipaikan maaperän resistiivisyys, voidaan maadoitusresistanssin arvo laskea rakennetun maadoituselektrodin rakennetietojen mukaan. Maadoituselektrodin toteutus suunnitelmien mukaan on dokumentoitava valokuvaamalla. (SFS 6001 2018, 127-128, 145.)

8.3 Kiinteistömuuntamon maadoituselektrodi

Suomessa maadoituselektrodien rakentamiseen käytetään yleisesti kuparista maadoitusköyttä. SFS-standardin 6001 velvoittavan liitteen C taulukon mukaan suurjännitteellä tulee maadoituselektrodin rakentamiseen käyttää poikkipinnaltaan vähintään 25mm^2 :n kupariköyttä, joka takaa riittävän mekaanisen lujuuden sekä korroosionkestävyyden (SFS 6001 2018, 108). Maadoituselektrodit rakennetaan yleisesti upottamalla ne vaakaan kaapeliojiin tai rakennuksen perustuksien alle. Pystyelektrodeja kannattaa käyttää, jos maaperä on huonosti johtavaa ja tiedetään, että maan resistiivisyys on syvemmillä parempi. Rakennettaessa kiinteistömuuntamolle maadoituselektrodia on ensisijaisena vaihtoehtona rakentaa perustusmaadoituselektrodi (KUVIO 17), jossa kupariköysi sijoitetaan rakennusten perustusten alle. Tällöin saadaan mahdollisimman hyvä potentiaalintasausvaikutus rakennuksessa olevien johtavien rakenteiden välille sekä pienennettyä keskijänniteverkon maasulkutilanteessa aiheuttamaa kosketusjännitevaaraa. Jotta elektrodilla olisi mahdollisimman johtava yhteys maahan, on se sijoitettava kaivuutöiden jälkeen heti perusmaan pohjalle, ennen perustuksien alle tulevien täyttöjen tekemistä. Täyttömateriaalien johtavuus on huono, jolloin maadoitusresistanssi jää liian suureksi. (Tiainen 2017, 312-313.)

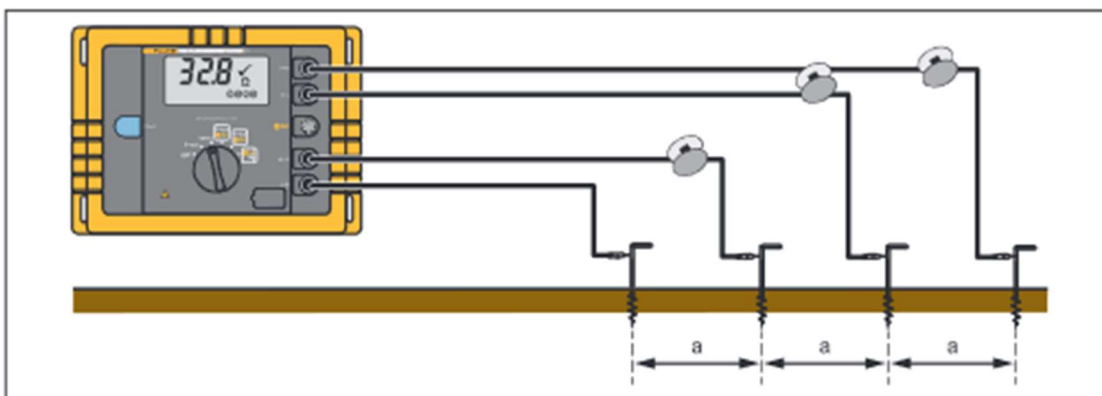


KUVIO 17. Perustusmaadoituselektrodi (Tiainen 2017, 312)

Maadoituselektrodin mitoittamiseen ja laajuuteen vaikuttaa merkittävästi maaperän ominaisresistanssi. Elektrodi tulisi pyrkiä sijoittamaan mahdollisimman johtavaan maahan, jotta vaadittava pituus saadaan mahdollisimman lyhyeksi. Taulukossa 10 on esitetty maan ominaisresistanssien arvoja. Tieto maaperän rakenteesta saadaan esimerkiksi rakennuspaikalle tehdyn maaperätutkimuksen perusteella. Maaperän resistiivisyys voidaan myös mitata käyttäen Wenner-menetelmää. Mittauksessa neljä maadoitussauvaa asetetaan saman välimatkan toisistaan (KUVIO 18). Testeri tuottaa tunnetun virran kahden ulomman sauvan läpi, ja jännitepotentiaalnin häviö mitataan kahden sisemmän maadoitussauvan väliltä. (Tiainen yms. 2019, 136.)

TAULUKKO 10. Maaperän ominaisresistanssien arvoja (Tiainen yms. 2019, 136)

Aine	Keskimääräinen Ωm	Vaihteluvälit Ωm
Savi	40	25–70
Saven sekainen hiekka	100	40–300
Lieju, turve, multa	150	50–250
Hiekka, hieta	2 000	1 000–3 000
Moreenisora	3 000	1 000–10 000
Harjusora	15 000	3 000–30 000
Graniittikallio	20 000	10 000–50 000
Järvi- ja jokivesi	250	100–400
Merivesi (Suomenlahti)	2,5	1–5



KUVIO 18. Maaperän resistiivisyyden mittaus (FLUKE, 24)

Mittarin antaman maadoitusresistanssin perusteella voidaan laskea maaperän resistiivisyys seuraavalla kaavalla:

$$\rho_E = 2 \times \pi \times a \times R_E$$

7)

jossa ρ_E on maaperän resistiivisyys 0-pisteessä, syvyydessä $3 \times a / 4$ (Ωm)

a on mittauselektrodin etäisyys toisesta ja

R_E on mittarin ilmoittama maadoitusresistanssi arvo (Ω).

Maadoituselektrodin tarvittavaa laajuutta voidaan tämän jälkeen arvioida taulukossa 11 annetuilla kaavoilla. Maadoitusresistanssin arvo on kääntäen verrannollinen maadoituksen laajuuteen verrattuna. Vaikuttavin tekijä on maadoituselektrodin laajuus, ei niinkään sen poikkipinta-ala. Taulukon 11 tiedoissa pinnalle asennetulla elektrodilla tarkoitetaan maaperän rakennekerroksien väliin asennettua elektrodiä, jonka toinen puoli ainoastaan koskettaa maaperää, jonka resistiivisyyden arvoa käytetään.

TAULUKKO 11. Maadoituselektrodin maadoitusresistanssin laskentakaavoja (SFS 6001 2018, 148.)

Elektrodin laatu	Kaava	Huomautukset
Pallo pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{\pi D}$	
Levy pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{2D}$	$s \ll D$
Pystysuora tanko tai putki pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36 \times d}$	$d \ll L$
Pystysuora tanko tai putki upotettuna	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36 \times d} \times \frac{2h+L}{4h+L}$	$d \ll L$
Vaakasuora johdin pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{\pi L} \ln \frac{2L}{1,36 \times d}$	$d \ll L$
Vaakasuora johdin upotettuna	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{1,85 \times h \times d}$	$d \ll 4h$
Ruudukko	$R_E = \frac{\rho_E}{2D} + \frac{\rho_E}{L}$	

L Elektrodin pituus (m)

D Pallon, levyn tai ruudukon halkaisija (m)

d Johtimen halkaisija tai puolet nauhan leveydestä (m)

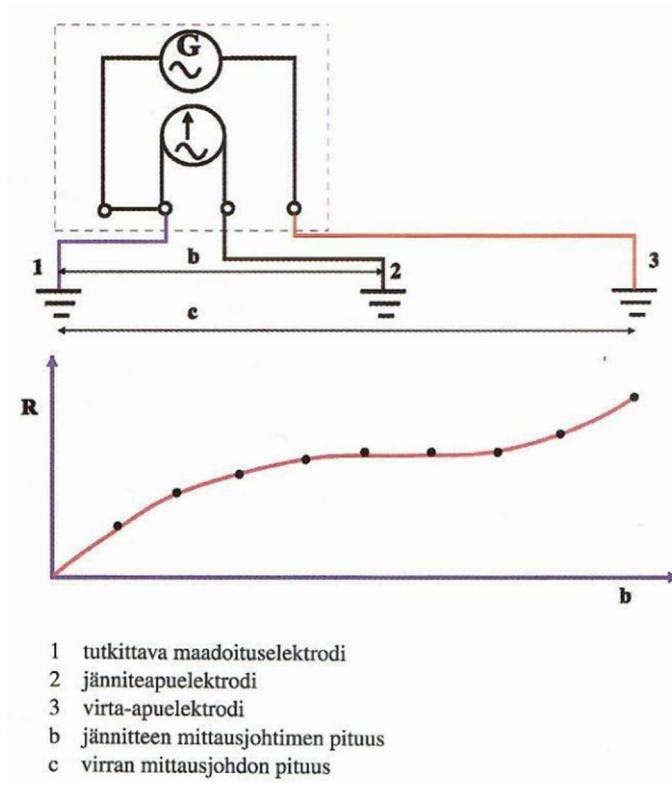
s Levyn paksuus (m)

ρ_E Maaperän resistiivisyys (Ωm)

h Elektrodin upotussyvyys (m)

8.3.1 Maadoituselektrodin maadoitusresistanssin mittaus käännepistemethodella

Muuntamon maadoituselektrodin maadoitusresistanssi voidaan mitata ennen käyttöönottoa käännepistemethodella käyttäen. Mitattavan maadoituselektrodin on oltava mittauksen ajan erillään muista muuntamoon liittyvistä maadoitusjärjestelmistä, jotta mittaus antaa luotettavan tuloksen. Menetelmässä mitataan suoraan resistanssiarvoja. Mittauskytkentä on esitetty kuviossa 19. Mittarin virtalähde syöttää mitausvirran mitattavaan maadoituselektrodiin (1). Maadoituselektrodista virta kulkee maaperän kautta virta-apuelektrodiin (3). Mitattavan maadoituselektrodin ja jänniteapuelektrodin välille syntyy potentiaaliero, jonka perusteella mittalaite ilmoittaa resistanssin arvon. Mittaus suoritetaan niin, että jänniteapuelektrodi (2) siirretään mittauspisteen (1) ja virta-apuelektrodin (3) välillä ja jokaisessa pisteessä mitataan resistanssi. Mittaustuloksista muodostetaan resistanssikäyrä jänniteapuelektrodin etäisyyden (b) funktiona. Virta-apuelektrodin etäisyydeksi mitattavasta elektrodista riittää yleensä 200m. (Tiainen yms. 2019, 149-150.)



KUVIO 19. Maadoituselektrodin mittaus käännepistemethodella (Tiainen yms. 2019, 149)

Resistanssikäyrän perusteella määritetään maadoituselektrodin maadoitusresistanssi. Arvo on luettavissa käyrälle muodostuneesta vaakasuorasta osuudesta. Jos käyrällä ei ole vaakasuoraa osaa mutta on

selvä käännealue, voidaan arvo lukea tästä kohtaa. Maadoitusresistanssin arvo voidaan myös ottaa mitauskohdasta, joka on 60 % mittauspisteen ja virta-alueelektrodin välisestä pituudesta. (Tiainen yms. 2019, 150.)

8.3.2 Maadoituselektrodin, -johtimien ja suojamaadoitusjohtimien kuormitettavuus

Maadoituselektrodin ja maadoitusjohtimien tulee kestää keskijänniteverkon maasulkuvirta tai kaksoismaasulkuvirta. Maasulkuvirta on keskijänniteverkoissa pieni, tyypillisesti 5...200 A. Kaksoismaasulun aikana kaapeliverkossa virta voi kuitenkin nousta jopa 10 kA:n lukemiin, jolloin se aiheuttaa ylivirtalaukaisun syöttävän verkon puolella tavallisesti alle 1 sekunnin aikana. Vaikka SFS-standardin 6001 mukaan alle 1 sekunnin kestäviä kaksoismaasulkuja ei tarvitse ottaa mitoituksessa huomioon, on muuntamon maadoitusjohtimien ja keskijännitteelle alttiiden osien suojamaadoitusjohtimien poikkipintana päädytty käyttämään vähintään 50mm²:n kuparijohtimia kaksoismaasulun aiheuttaman suuren virran vuoksi. On sattunut tilanteita kaksoismaasulun aikana, jolloin ohuita johtimia on palanut poikki. Johtimina kannattaisi käyttää mahdollisuuksien mukaan paljaita kupariköysiä, joille sallitaan 300 °C:n loppulämpötila. Eristettyjä kevi -johtimia käytettäessä loppulämpötilaksi sallitaan 160 °C, jolloin voi olla tarpeen käyttää poikkipinnaltaan paksumpia johtimia. Alle 5 sekuntia kestäväillä vikavirroilla sallittu virran tiheys johtimessa laukaisuajan funktiona voidaan määrittää kaavan 8 mukaan. (Tiainen yms. 2019, 59-62.)

$$A = \frac{I}{K} \sqrt{\frac{t}{\ln \frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}}} \quad 8)$$

jossa

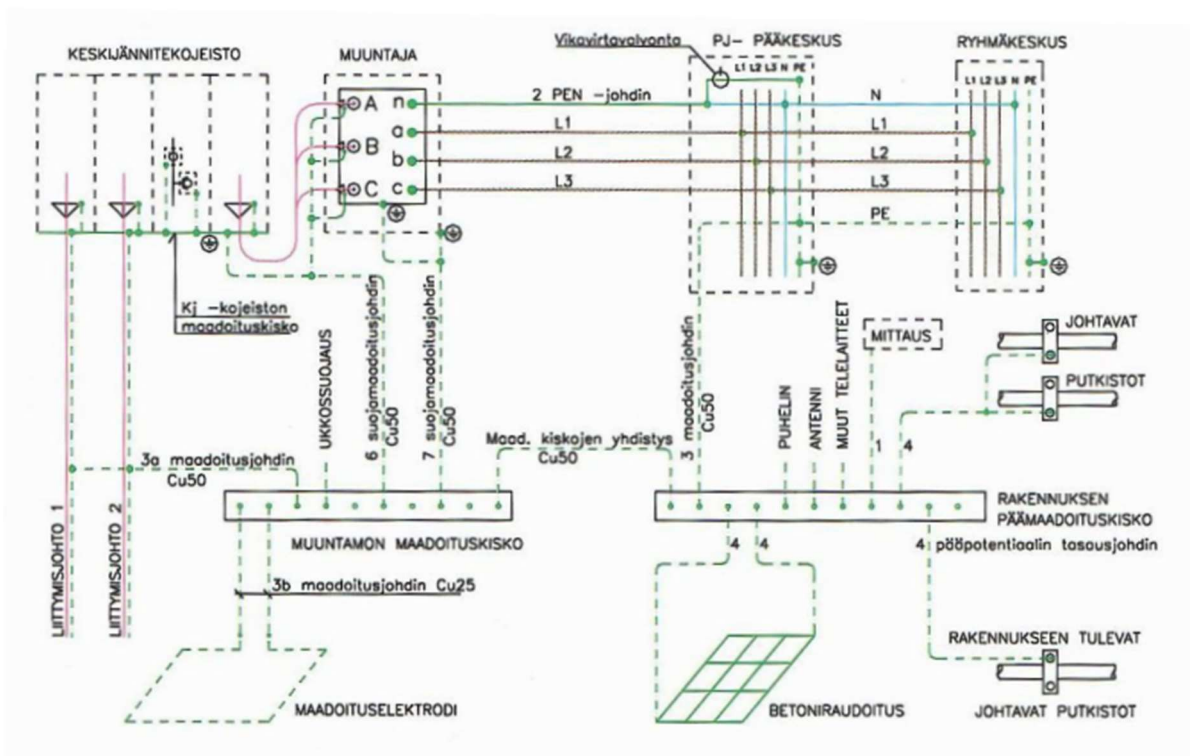
- A on poikkipinta-ala (mm²)
- I on johtimen virran tehollisarvo (A)
- t on vikavirran kesto aika (s)
- K on virrallisen osan materiaalista riippuva vakio
- β on virrallisen osan resistanssin lämpötilakertoimen käänteisarvo lämpötilassa 0°C
- θ_i on alkulämpötila, joka on yleensä 20°C ja
- θ_f on loppulämpötila, paljaat johtimet 300°C ja eristetyt 160°C.

TAULUKKO 12. Materiaalivakiot (Tiainen yms. 2019, 60)

Materiaali	β [°C]	K [$A \times \sqrt{s} / mm^2$]
Kupari	234,5	226
Alumiini	228	148
Teräs	202	78

8.4 Kuluttajamuuntamon maadoitukset

Muuntajatiloihin asennetaan muuntamon maadoituskisko, johon kytketään kaikki muuntamotilan maadoitus-, potentiaalintasaus- ja suojamaadoitusjohtimet. Keskijännitekaapelien keskusköydet yhdistetään kojeiston maadoituskiskon lisäksi erillisellä maadoitusjohtimella muuntamon maadoituskiskoon. Muuntajan yhdistyskaapelien päätteet maadoitetaan kummastakin päästä. Kuviossa 20 esitettyjen maadoitus- ja suojamaadoitusjohtimien lisäksi muuntamon maadoituskiskoon yhdistetään kaikki muuntamotilojen johtavat osat, kuten verkkoseinät, ovet, kaapelihyllyt ja ilmastointikanavat. Maadoituskiskoon liitetyt johtimet merkitään nippusidekiinnitteillä merkintätaskuilla, jotta niiden tunnistaminen myöhemmin on helppoa.



KUVIO 20. Esimerkki sähkökäyttäjän muuntamon maadoituskaaviosta (Tiainen yms. 2019, 65)

Rakennuksen päämaadoituskisko asennetaan pienjännitepääkeskuksen yhteyteen ja se yhdistetään muuntamon maadoituskiskoon yhdistysjohtimella. PEN-johtimen jakaminen PE- ja N-johtimeksi tehdään pienjännitepääkeskuksessa, jolloin muuntajan n-napaa ei saa jakeluverkon muuntamoiden tapaan yhdistää muuntajan kuoren maadoitukseen. Kytkeä muodostaisi nollavirralla rinnakkaisen kulkureitin PEN-johtimen lisäksi maadoitusjärjestelmän kautta muuntajan n-napaan. Nollavirran kulkeminen rakennuksen maadoitusjärjestelmissä aiheuttaisi voimakkaita hajamagneettikenttiä ja sähkömagneettisia häiriöitä. (Tiainen yms. 2019, 64-66.)

9 KIINTEISTÖMUUNTAMON RAKENTAMINEN

Opinnäytetyön aikana toteutettiin Ouluun rakennettuun Oulun Keskuspesula Oy:n uudisrakennukseen kiinteistömuuntamo, jolla rakennus liittyy Oulun Energian 20 kV jakeluverkkoon. Kohteen tasaamattomaksi huipputehoksi sähkösuunnittelija oli laskenut 1560 kW ja muuntajan tehoksi oli valittu 1600 kVA. Kohteen sähkösuunnittelusta vastasi Ramboll Finland Oy Oulun toimisto.

Muuntajaprojektin osalta toimin omalta osaltani kohteen sähköurakoitsijan Vihannin Sähkö Ky:n palveluksessa. Tehtävänäni oli hoitaa muuntamon rakentamisprojektin kulku ja opastaa asentajia työmaalla. Osallistuin työmaalla myös muuntamon asennustöihin ja käyttöönottotarkastuksiin. Muuntamon asennustyöt suoritettiin pääosin yrityksen omaa työvoimaa käyttäen, mutta kiskosillan sekä muuntajan kytkentä kojeistoon ja käyttöönottotarkastukset suoritettiin yhteistyössä kojeistotoimittajan edustajien kanssa.

9.1 Valmistelevat työt

Projektin alkuvaiheessa työmaalla suoritettiin muuntamoon liittyen lähinnä liittymiskaapeleiden putkituksia tontin rajalta muuntamolle ja maadoituselektrodin asennusta rakennuksen alle ennen perustusten tekoa. Liittymiskaapelien putkitukset asennettiin tontin rajalle tien viereen, jossa kulkee verkonhaltijan rengasverkko. Verkonhaltijan kanssa sovittiin, että he asentavat liittymiskaapelit putkiin myöhemmässä vaiheessa, lähempänä käyttöönottoajankohtaa. Varmistin tilaajalta vielä, että liittymissopimus on varmasti tehty hyvissä ajoin.

Muuntamon suurimpiin hankintoihin kuuluvat muuntaja, keskijännitekojeisto, kiskosilta ja pienjännitepääkeskus. Muuntamon sähkölaitteista oli jo pyydetty tarjouslaskentavaiheessa tarjouksia eri toimittajilta. Päädyimme tilaamaan keskijännitekojeiston, kiskosillan ja kaikki pienjännitekeskukset samalta toimittajalta. Tällä saavutettiin huomattavaa etua, koska erityisesti kiskosilta ja pääkeskus olisivat varmasti yhteensopivia. Lisäksi kojeistot ja keskukset valmistetaan Suomessa, jolloin toimitusajat ovat nopeita ja mahdollisissa ongelmatilanteissa teknisen tuen saaminen helppoa.

Kojeistotoimittajan suunnittelija laati muuntamosta pohjapiirustuksen, johon asennettavat laitteet oli sijoiteltu. Näin voitiin varmistua siitä, että kaikki laitteet varmasti mahtuvat paikoilleen. Keskijännitekojeiston kokoonpanopiirustusten ja piirikaavioiden valmistumisen jälkeen välitin ne verkonhaltijalle ja tilaajalle hyväksyttäväksi. Hankittavan muuntajan tiedot ilmoitin myös verkonhaltijalle. Kiskosillan mitoittamiseksi hankittavan muuntajan mittapiirustus oli toimitettava suunnittelijalle.

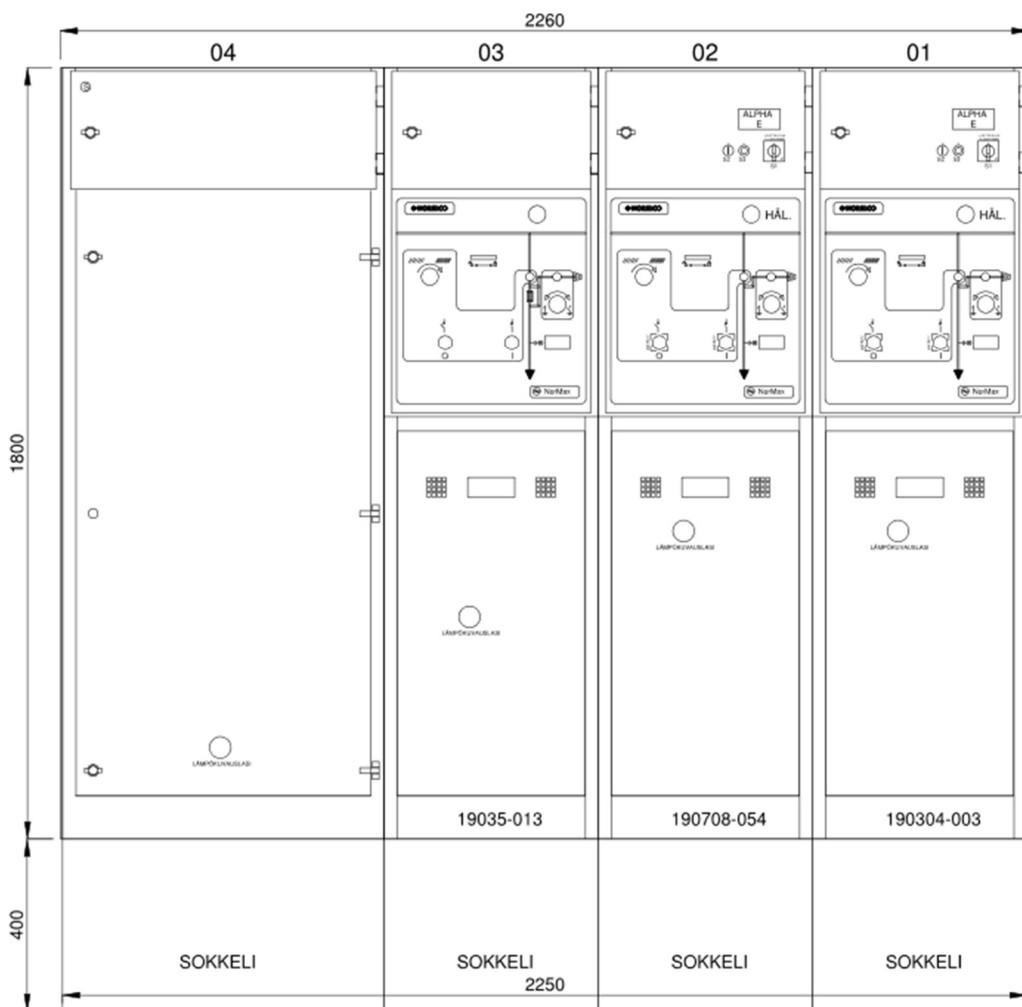
Kojeiston hyväksyttäminen verkonhaltijalla on erityisen tärkeää, koska kojeisto liittyy osaksi verkonhaltijan jakeluverkkoa ja kojeistossa on verkonhaltijan käyttöoikeudelle kuuluvia kytkinlaitteita. Verkonhaltija myös vastaa keskijänniteverkon suojauksesta ja energian mittauksesta. Tässä tapauksessa kojeiston energian mittauksessa käytettävät mittamuuntajat kuuluivat kojeistotoimitukseen, jolloin verkonhaltijan tuli tarkistaa niiden sopivuus. Varmistin vielä lisäksi verkonhaltijalta, että varokekuormanerotimen käyttäminen kojeiston pääkytkimenä on sallittua, kun kohteessa on yksi 1600 kVA:n muuntaja.

Muuntamon sähkölaitteiden hyväksymisen jälkeen sovin kojeistovalmistajan kanssa toimitusaikataulut laitteille yleisen rakentamisaikataulun pohjalta. Muuntamotiloihin liittyvät rakennustekniset työvaiheet voitiin sen jälkeen sovittaa yhteen muuntamon sähköasennustöiden kanssa. Laitteistojen oikea-aikaiseen toimitukseen tulee kiinnittää huomiota. Pahimmassa tapauksessa muuntamon asennusten myöhästyessä koko kohteen valmistuminen voisi siirtyä.

Hankittava kojeistotyyppi olisi hyvä valita ennen muuntajatilojen lattioiden tekemistä, jotta liittymiskaapelointeja varten kojeiston alle tulevan kaapelisyvennyksen paikka ja mitat voidaan tarkistaa kojeistotyyppille soveltuvaksi. Syvennyksen koko ja kojeiston kiinnityspisteet vaihtelevat valmistajan mukaan. Kohteessa kojeiston suunnittelu tehtiin hyvissä ajoin ja lattiasyvennyksen paikka voitiin tarkistaa ennen sen valmistumista. Lattiasyvennystä jouduttiin hieman suurentamaan alkuperäisestä, koska kojeiston liittymiskennot olivat lähellä kaapelikuilun reunaa, josta liittymiskaapelien putket tulivat sisään. Liittymiskaapeleilla tuli mahtua tekemään lenkki kuilussa kojeiston alla, jotta kaapelien vaaditut taivutussäteet täytyisivät niitä asennettaessa liittymiskennoihin. Kohteen liittymiskaapeleina ovat AHXAMK-W 3x185+35 -kaapelit, joiden pienin taivutussäde on 950 mm ja kertataivutuksella 650 mm (REKA 2021a). Kojeiston mittapiirustusten perusteella voitiin lisäksi määrittää syvennykseen kojeiston alle tulevien teräspalkkien sijainti. Liitteessä 2 on esitetty muuntamon laitteiden sijoittelu ylhäältäpäin kuvattuna.

9.2 Keskijännitekojeisto

Keskijännitekojeistona kohteessa on Norelcon valmistama Normax -tyypin kennokoteloitu modulaarinen kojeisto. Kojeiston kaapelipäätetilat sekä yläosassa oleva kiskotila ovat ilmaeristeisiä ja kuormanerotin SF₆-kaasueristeisiä. Kojeiston kennot ja kennojen osat on erotettu teräslevyrakentein toisistaan. Kojeiston päällä on ilmaeristeinen kokoojakiskotila ja toisiotila, johon sijoitetaan valvontareleet ja muut pienjännitteiset ohjauskojeet ja riviliittimet. Kojeiston alaosassa on ilmaeristeinen kaapelipäätetila, johon voidaan liittyä tavallisilla sisäpäätteillä. SF₆-eristeinen kuormanerotin on sijoitettu kokoojakiskotilan ja kaapelipäätetilan väliin. Kojeiston rakenne mahdollistaa pelkän kojeen tai kentän vaihtamisen koko kojeiston sijaan. Virheellisten käyttötoimenpiteiden välttämiseksi kaikki vaaralliset ja kielletyt ohjaustoimenpiteet on estetty mekaanisilla lukituksilla. Kaapelipäätetilan oven avaaminen on mekaanisesti estetty kennon ollessa jännitteinen. (Norelco 2021.)



KUVA 11. Kohteeseen asennetun kojeiston kansikuva

Kuvassa 11 on esitetty kohteeseen asennetun kojeiston kansikuva. Kuvassa 1 kojeisto on asennettuna paikoilleen. Asennetussa kojeistossa on 4 kennoa. Muuntamon pääkaavio on samankaltainen kuviossa 4 esitetyn kanssa, erona on kojeiston kaasutilojen rajaukset ja ohjauskaapeloinnit. Rengasverkon kaapelit kytkeytyvät kennoihin 01 ja 02, joiden kautta muuntamo liittyy Oulun Energian jakeluverkkoon. Kennojen kuormanerottimien käyttöoikeus on ainoastaan verkkoyhtiöllä, ja ne ovat lukitut käytön estämiseksi. Kuormanerottimet on varustettu käsiohjauksen lisäksi moottoriohjaimilla ja potentiaalivapailla kosketintiedoilla, kaukokäyttöä varten. SF₆-kaasun alhaisesta paineesta saadaan myös välitettyä hälytys eteenpäin.

Kaukokäyttöön liittyen liittymiskaapeleiden jokaiseen vaiheeseen on asennettu oikosulkuindikaattorit, joilla voidaan vikatilanteessa paikallistaa, kummassa muuntamolta lähtevässä kaapelissa on maakaapeliverkon teknisen vian tai kaivuutyön aiheuttama oikosulku. Indikaattorien potentiaalivapaan koskettimen tieto viedään kaukokäytön ala-asemalle ja edelleen välitetyn tiedon perusteella verkkoyhtiön käyttökeskuksessa voidaan rajata vika rengasverkon tiettyyn kaapeliväliin käyttämällä käyttökeskuksesta kojeistojen kuormanerottimia. Sähköt saadaan tällöin palautettua mahdollisimman nopeasti asiakkaille takaisin kytkemällä viallinen johtoväli jännitteettömäksi.

Kennoissa 03 on varokekuormanerotin, joka toimii kojeiston pääkytkimenä ja muuntajan oikosulkusuojana. Kun kohteessa on vain yksi muuntaja, on sallittua käyttää varokekuormanerotinta pääkytkimenä katkaisijan sijaan, jolloin kojeiston rakenne saadaan yksinkertaisemmaksi. Kaikki kojeiston varoke- ja kuormanerottimet ovat kolmiasentoisia: auki, kiinni tai maadoitettu. Liittymiskennojen maadoituserottimilla maadoitetaan jännitteettömäksi kytketty kaapelilähtö. Suurjännitesulakkeen turvallisen asettamisen vuoksi varokekuormanerotinkennossa on maadoituserottimet sulakekohtioiden kummallakin puolella.

Suurimpana erona jakeluverkonhaltijan muuntamoon nähden kohteessa energianmittaus on toteutettu sähkön käyttäjän muuntamon normaaliin tapaan keskijännitepuolella, ennen muuntajaa. Jos mittaus olisi pienjännitepuolella jakeluverkkoyhtiön tapaan, sähkön käyttäjän muuntajan aiheuttamat häviöt jäisivät huomioimatta energian mittauksessa. Mittauksessa käytettävät virta- ja jännitemuuntajat on sijoitettu 04-kennoon. Kenno on yhdistetty varokekuormanerotimen lähtöön kuvion 4 tapaan kaapeleilla. Muuntajalle lähtevät kaapelit oli mahdollista kytkeä kennoon joko ylä- tai alakautta. Kaapelit vietiin alakautta kojeiston sokkelin kautta suoraan muuntajakotelon sisälle EMC-häiriöiden vähentämiseksi.

Kuvassa 12 esitetty kojeiston mittauskenno on ilmaeristeinen ja työmaadoittaminen huoltoon varten tehdään siirrettävillä maadoitusköysillä maadoituspisteisiin (3). Mittauskytkentä on liitteen 1 mukainen. Virtamuuntajissa (2) on toisiokäämeissä väliotto, jolloin muuntosuhteeksi voidaan valita 50 tai 100 A / 5 A kuormituksen mukaan. Virtamuuntajien tarkkuusluokka on 0.2 S. Jännitemuuntajien (1) ensiökäämi on kytketty vaiheiden ja maan väliin ja toisiopuolella on mittaus- ja avokolmiokäämi. Tällöin muuntosuhde on $20000 \text{ V}:\sqrt{3} / 100 \text{ V}:\sqrt{3} / 100 \text{ V}:3$. Tarkkuusluokka jännitemuuntajilla on 0.2. Jännitemuuntajien kippivärähtelynvaimennusvastus on kytketty avokolmiokäämiin. Varokekuormanerotinkennolta tulevat kaapelit (4) kytkeytyvät kiskostoihin ennen jännitemuuntajia ja virtamuuntajien jälkeen kaapelit (5) jatkuvat muuntajan yläjännitekäämien kohtioihin.



KUVA 12. Mittauskenno

9.3 Muuntaja

Muuntajaksi kohteeseen hankittiin Finn Electricin maahantuoma Imefyn valmistama valuhartsieristeinen kuivamuuntaja, teholtaan 1600kVA. Muuntaja on Dyn11 -kytkentäinen, jolloin yläjännitekäämit on

kytketty kolmioon ja alajännitekäämit tähteen. Muuntajan käämit on valmistettu alumiinista ja valettu tyhjiössä epoksihartsin sisään, jonka ansiosta muuntajan paloluokka on F1. Luokan F1 muuntajissa palon syttymistä on rajoitettu ja palon pitää sammua itsestään sekä savukaasuja saa päästä ympäristöön vain minimaalisesti palon aikana. Tämän ominaisuuden vuoksi muuntaja sopii erityisen hyvin sisätiloihin asennettavaksi. Muuntaja on koteloitu metallikuorisella kotelolla, jolla saavutetaan suojausluokka IP31. Kosketussuojaus ja vaadittavat ilmavälit täyttyvät, kun muuntaja on jo tehtaalla asennettu suojakotelon sisälle. Metallinen suojakotelo myös vähentää muuntajan aiheuttamia EMC-häiriöitä. Kotelon uonona puolesta muuntajan jäähtymisen kannalta on, että ilmankierto käämien läpi huononee. Kuvassa 13 asennettu muuntaja suojakotelo avattuna asennusta varten.



KUVA 13. Asennettu valuhartsieristeinen muuntaja suojakotelo avattuna

Kuivamuuntajien lämpötilanvalvontaan tulee kiinnittää huomiota, koska jäähditys perustuu luonnollisen ilmankiertoon käämien läpi. Tämän vuoksi muuntajassa on vakiona käämien sisälle asennetut PT100-lämpötilanmittaus anturit, jotka kaapeloidaan muuntajan rungossa olevalta koteloilta lämpötilanvalvontareleelle. Lämpötilanvalvontarele on sijoitettu kohteessa pienjännitepääkeskuksen syöttökenttään. Ylikuormitustilanteessa, jossa muuntajan käämien lämpötila nousee liian korkeaksi, suojarle antaa ohjauspulssin keskijännitekojeiston varokekuormanerotin laukaisukelalle, minkä seurauksena erotin avautuu ja kytkee muuntajan jännitteettömäksi.

TAULUKKO 13. Asennetun muuntajan teknisiä tietoja

Nimellisteho	1600 kVA
Yläjännite	20500 V
Alajännite	410 V
Taajuus	50 Hz
Käämien kytkentä	Dyn 11
Tyhjäkäyntihäviöt Po	2,2 kW
Kuormitushäviöt Pk	13 kW
Nimellisvirta yläjännite	45,06 A
Nimellisvirta alajännite	2253,1 A
Oikosulkujännite Uk 120°C	6,2 %
Paino	4400 kg
Lämpöluokka	F 100 K

9.4 Kiskosilta ja pienjännitepääkeskus

Pienjännitepääkeskus on sijoitettu kohteessa muuntamon viereiseen tilaan. Eri tilaan sijoittaminen on perusteltua, koska keskus sisältää huomattavan määrän kiinteistön käyttöön tarkoitettuja lähtöjä, jolloin keskuksen käyttötoimenpiteiden suorittamisessa paikalla ei tarvitse olla kohteen käytönjohtaja. Keskus on Norelcon valmistama Norpower 5000 -mallinen kennokeskus, joka on nimellisvirraltaan 2500 A. Keskuksen pääkytkimenä on ilmakatkaisija. Huollon ajaksi keskuksen jännitteettömät kiskostot voidaan työmaadoittaa syöttökennossa olevalla maadoituskytkimellä. Pääkatkaisija ja maadoituskytkin on sähköisesti lukittu keskenään, jotta maadoituskytkimellä ei voida aiheuttaa oikosulkua. Maadoituskytkimen ja muuntajan lämpötilanvalvonnan ohjausjännite on UPS-varmennettu, jolloin ne toimivat myös muuntajan ollessa jännitteettömänä. Keskuksen syöttökenttä osineen on esitetty kuvassa 14.

Pääkeskuksen syöttökentän ja muuntajan välinen liitäntä on tehty suuren kuormitusvirran ja oikosulkukestoisuuden vuoksi kaapeleiden sijaan kiskostoilla. Kiskosilta on ilmaeristeinen ja metallikoteloitu sen aiheuttamien EMC-häiriöiden vuoksi. Kiskosillan metallikotelo yhdistyy pääkeskukseen ja muuntajakoteloon muodostaen kosketussuojatun rakenteen koko matkalta. Yhdistys muuntajan alajänniteliittimiin tehdään kuvassa 14 näkyvällä joustavalla liitoksella, jotta muuntajan rautasydämessä syntyvä värinä ei aiheuttaisi sillan alumiinikiskoissa ja eristimissä rasituksia. Koska muuntajatilaa on palo-osastoinniltaan oma tila, on kiskosillan läpiviennin seinässä täytettävä palo-osastointivaatimukset. Ilmaeristeisen kiskosillan sisälle oli jo tehtaalla asennettu palokatko seinän kohdalle, jolloin työmaalla tehtäväksi jäi ainoastaan ulkopuolisen palokatkon tekeminen.



KUVA 14. Pääkeskuksen syöttökenttä

Pääkeskuksen pääkytkimenä toimii ilmakatkaisija (1). Lisäksi syöttökenttään on sijoitettu muuntajan lämpötilanvalvontayksikkö (2) ja verkkoanalysaattori (3). Huollon ajaksi pääkeskuksen jännitteettömät kiskostot ovat maadoitettavissa maadoituskytkimellä (4).

9.5 Keskijännitelaitteiston asennukset

Ennen muuntajan ja kojeiston saapumista työmaalle oli niiden kuljettaminen muuntajatiloihin suunniteltava hyvin, jotta ne saataisiin mahdollisimman vaivattomasti kuljetettua paikalleen. Muuntajan suuren painon vuoksi työmaalle oli varattava kalustoa, jotta muuntaja saatiin sitä kuljettavasta kuorma-autosta pois. Muuntajan kuljetuksessa oli huomioitava valmistajan ohjeet, sillä ohjeiden mukaan nostaminen oli sallittua vain yläpalkin nostokorvakkeista suojakotelon katon poistamisen jälkeen. Sisätiloissa muuntajan kuljetuksessa apuna voitiin käyttää sen alla olevia pyöriä ja alapalkissa olevia vetoaukkoja. Muuntajaan nostaminen trukilla tai vastaavalla ei ollut sallittua. Muuntajatiloihin muuntaja oli asennettava ensin paikoilleen, joten muuntajan toimitus oli sovittu ennen kojeiston toimittamista työmaalle. Sijoitettaessa muuntajaa lopulliselle paikalleen oli huomioitava laitteista aikaisemmin laadittu tarkka mittapiirustus, jotta kiskosilta voitaisiin asentaa myöhemmin ongelmitta paikalleen. Muuntajan liikkumisen estämiseksi pyörien alle sijoitettiin toimituksessa mukana olleet vierintäesteet sekä värinänvaimenninkumit, jotta rautasydämessä syntyvä värinä ei siirtyisi rakennuksen rakenteisiin.

Muuntajan asentamisen jälkeen kojeisto sijoitettiin sen viereen. Kojesto oli jaettuna kuljetuksen ajaksi kennojen 02 ja 03 väliltä kahteen osaan. Kojeston asennuksessa tuli huomioida lattian suoruus. Heittoa pituussuunnassa saa olla 3 mm ja syvyysuunnassa 2 mm. Tarvittava säätö tehtiin sokkelin alle laitettavilla teräsluskoilla. Kun vaaitus oli varmistettu, kojeiston kuljetuskatko yhdistettiin pulteilla kennon sisältä, minkä jälkeen kojeisto kiinnitettiin lattiarakenteisiin kiinni. Lopuksi vaaitus tarkastettiin vielä uudemman kerran. Lopuksi kojeiston päällä olevat pyöröalumiiniset kokoojakiskot ja kaapelitilassa koko kojeiston matkalla oleva kuparinen maadoituskisko voitiin yhdistää kuljetuskatkon kohdalta.

Kojeston paikalleen asentamisen jälkeen muuntaja ja kojeisto voitiin yhdistää keskijännitekaapeleilla toisiinsa. Varokekuormanerotimen ja mittauskennon välinen yhdistys tehtiin myös kaapeleilla kojeiston alapuolelta sokkelin kautta. Kaapelityyppinä oli yleisesti muuntajakytkennöissä käytettävä HXCMK 1x35+16. Päättinä kojeistossa voitiin käyttää sisäpäätteitä. Muuntajan yhdyskaapelit tuotiin suoraan mittauskennosta kojeiston sokkelin kautta muuntajakotelon sisälle EMC-häiriöiden vähentämiseksi.

Keskijännitekaapeleiden asennuksissa huomiota tulee kiinnittää sallittuihin taivutussäteisiin ja luotettavaan kiinnityksiin. Kaapelipäätteiden teossa on ehdottomasti noudatettava valmistajan ohjeita sekä liitetäessä päätteitä kojeisiin on liitokset kiristettävä momenttiavaimella valmistajan ilmoittamaan arvoon. Mittauskennon ja pääkytkinkennon yhdistävät kaapelit oli tehty jo tehtaalla valmiiksi, jolloin työmaalla valmistettavaksi jäi muuntajan ja mittauskennon yhdistävät kaapelit. Rengasverkon kaapeleiden päättäminen ja liittäminen liittymiskennoihin kuului verkkoyhtiölle. Kohteessa verkkoyhtiö kävi asentamassa liittymiskaapelit valmiiksi jo ennen kojeiston asentamista. Kojeston asentamisen yhteydessä kaapelit käännettiin kojeiston alla olevasta syvennyksestä liittymiskennoihin odottamaan päättämistä.

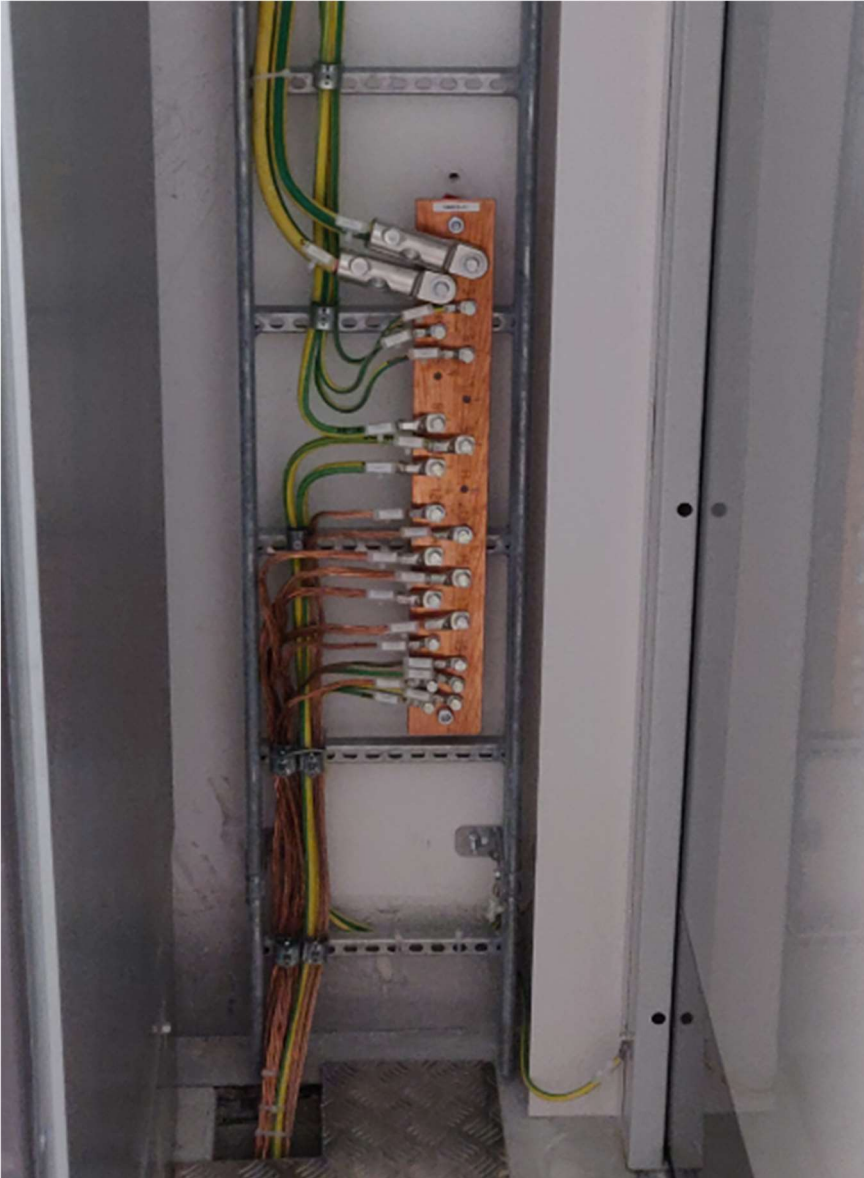
Keskijännitekaapeleiden ja lämpötila-antureiden riviliitinkotelon kaapeloinnissa muuntajakotelon sisällä oli huomioitava kuviossa 11 esitetyt suojaetäisyydet muuntajan käämeihin ja jännitteisiin osiin. Kaapeleiden kiinnityksien tulee olla luotettavia. Esimerkiksi nippusiteillä ja JAP-putkella asennettu lämpötilanvalvontayksikölle menevä kaapeli aiheuttaisi oikosulun tippuessaan keskijänniteliittimien päälle. Lämpötilanmittausantureiden johdotus asennettiin muoviputkeen ja kiinnitettiin kotelon seinään. Kaapelina käytettiin häiriösuojattua JAMAK-tyypin kaapelia.

Muita keskijännitelaitteistoon liittyviä pienjänniteasennuksia olivat muuntajan lämpötilanvalvontareleeltä keskijännitekojeistolle tulevat ohjauskaapelit varokeuormanerotin laukaisua varten sekä energiamittarin kaapeloinnit. Energiamittari on sijoitettu erilliseen koteloon muuntajatiloihin. Energianmittauksen jännitepiiri on suojattu sulakkeilla kojeiston toisiotilassa. Kaapeleina energianmittauksessa käytetään muuntamon magneettikenttien vuoksi häiriösuojattuja kaapeleita. Kohteessa kaapeloinnit tehtiin EMC-suojattua MCCMO -kaapelia käyttäen. Liittymiskenttien kaukokäyttöominaisuudet olivat tulevaisuuden varauksena, joten niitä ei vielä otettu käyttöön. Kaukokäytön ala-asemalle tuli kuitenkin varata tila muuntamosta kaapelireitteineen ja kaapeloida sille valmiiksi pienjännitesyöttö pääkeskuksesta.

9.5.1 Maadoitukset

Muuntamotiloihin asennettiin maadoituskisko, johon yhdistyvät muuntamon maadoitus-, suojamaadoitus ja potentiaalintasausjohtimet. Keskijännitekaapelien keskusköydet on liitetty liittymiskenttien maadoituskiskoon. Muuntajakotelon sisälle asennettiin oma maadoituskisko, johon liitettiin muuntajan rungon-, kotelon-, kiskosillan- ja kaapelipäätteiden suojamaadoitusjohtimet. Muuntamon maadoituskaavio vastaa pääosin kuviossa 20 esitettyä kaaviota. Käytössä on suur- ja pienjännitejärjestelmien yhteinen

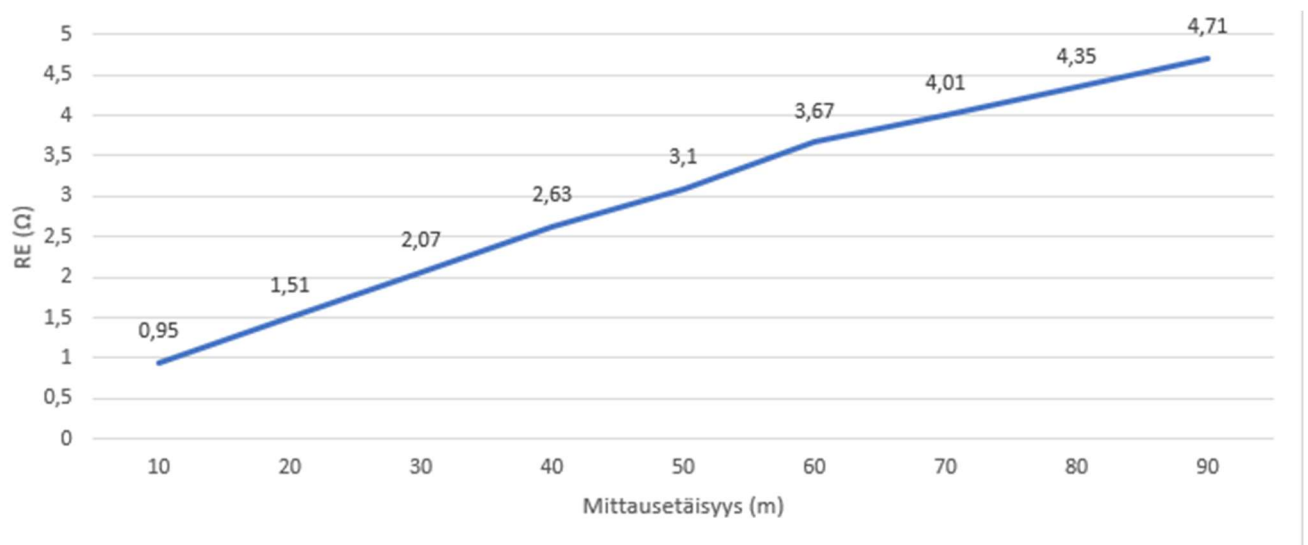
maadoitus. N-PE -yhdistys on pääkeskuksessa ennen pääkytkimenä toimivaa katkaisijaa. Katkaisija katkaisee myös nollajohtimen, joten keskuksen eristysvastusmittauksen vuoksi N-PE -yhdistystä ei tarvitse avata. Johtimien poikkipinnoissa on eroa, koska kaapelihyllyasennuksissa tulee käyttää eristettyjä johtimia paljaiden kuparijohtimien sijaan korroosiokestävyyden varmistamiseksi. Maadoitusjohtimien merkinnät tehtiin niiden kummastakin päästä tunnistettavuuden varmistamiseksi nippusidekiinnitteisiä merkintätaskuja käyttäen (KUVA 15).



KUVA 15. Muuntamon maadoituskisko

Kohteen maadoituselektrodin maadoitusresistanssi päätettiin mitata heti elektrodin asentamisen ja peittämisen jälkeen. Mittaus suoritettiin Megger DET4TC2 -maadoitusmittarilla käännepestemenetelmällä

100 metrin mittausetäisyyttä käyttäen. Resistanssiarvot mitattiin 10 metrin välein ja kirjattiin ylös. Resistanssiarvojen perusteella tehdystä kuviosta 21 voidaan huomata, että tasaista osuutta ei muodostu. 50 metrin mittausetäisyyden kohdalla käyrä kuitenkin laskee ja lähtee nousemaan uudestaan, joten maadoitusresistanssin arvon voidaan päätellä olevan noin $3,1 \dots 3,67 \Omega$, joka on vähintäänkin riittävä. Muuntamo kytketty muihin Oulun Energian maadoitusjärjestelmiin keskijännitekaapelien kosketussuojien ja keskusköysien kautta. Lisäksi liittymiskaapeleiden rinnalle on asennettu 25 mm^2 :n kupariköydet, joiden kautta muuntamo liittyy myös muihin maadoitusjärjestelmiin. Muuntamon resuloiva maadoitusimpedanssi on alle 1Ω , kun se on kytkettynä osaksi muita maadoitusjärjestelmiä.



KUVIO 21. Maadoituselektrodin mittaustulokset käännepistemethodella

9.5.2 Muuntamon muut varusteet

Muuntamo varustettiin sähkösuunnitelmissa ja ST-Kortissa 53.11 esitetyillä muuntamon käytön kannalta vaadittavilla varusteilla ja turvakilvillä. Kuvassa 16 on esitetty muuntamon varusteita. Mittauskennon työmaadoittamista varten hoitovälineet sisältävät siirrettävät maadoitusvälineet ja niiden asentamiseen tarvittavan sauvan. Liittymiskennojen ja varokekuormanerotinkennon jännitteettömyys ennen maadoittamista on todettavissa kojeistossa olevista ilmaisimista. Ennen huoltotöiden aloittamista jännitteettömyys on testattava vielä hoitovälineissä olevalla jännitteenkoettimella.

Muuntajan suojana toimivia suurjännitesulakkeita on varalle 3kpl, sillä yhden toimiessa kaikki on vaihdettava kerralla. Sulakkeiden vaihtoa varten hoitovälineet sisältävät eristävän vaihtosauvan. Sulakkeita

hankittaessa on huomioitava kojeistovalmistajan suositukset käytettävälle sulaketyypille, koska sulakkeiden toimintakäyrät vaihtelevat valmistajasta riippuen. Asennetussa kojeistossa suositeltiin käytettäväksi SIBA HHD- tai EFEN HH -sarjan sulakkeita.



KUVA 16. Muuntamon varusteita

Muuntamoon on sijoitettu kuvan varusteiden lisäksi seinälle kiinnitetyt laminoitunut maadoitus- sekä pääkaaviopiirustukset ja kansio, joka sisältää kaikkien muuntamon laitteiden käyttöohjeet ja dokumentit. Kansioon on myös koottu kaikki muuntamoon liittyvät tarkastuspöytäkirjat. Muuntamon oven ulkopuolelle on kiinnitetty SFS-standardin 6001 kohdan 8.9.2 mukainen hengenvaarasta ilmoittava kyltti ja verkohaltijan ilmoittama muuntamon tunnus.

10 MUUNTAMON KÄYTTÖNOTTO JA TARKASTUKSET

Muuntamon jännitteenkytkennän lähestyessä selvitin verkonhaltijalta liittymiskaapeloinnin toteutuksen ja kytkennän tilauksen ajankohtaa. Kytkenän tilaus tehtiin 3 viikkoa ennen toivottua jännitteenkytkentää. Tuona aikana verkonhaltija järjesteli verkon jakorajat niin, ettei muille sähkökäyttäjille aiheutuisi sähkökatkoa liitettäessä uusi muuntamo rengasverkkoon. Kohteessa verkonhaltija kävi asentamassa muuntamon ja rengasverkon liittämipaikan väliset kaapelit hyvissä ajoin jo ennen kojeiston asentamista. Liittymiskaapelit saatiin asennettua nopeasti muuntamolle asennettuja putkituksia pitkin. Asennuspaikalla ei myöskään tarvinnut tehdä katujen avaamista, koska rengasverkon kaapelit kulkivat tien vieressä nurmialueella. Päivää ennen kytkentää verkonhaltija kävi päättämässä liittymiskaapelit kojeistoon. Kaapelijatkokset liittymiskaapeleiden ja rengasverkon välille valmistuivat samana päivänä. Rengasverkon kaapelina oli tässä tapauksessa AHXAMK-W 3x185AL+35CU. Kuvassa 17 näkyvät liittymiskaapelit liitettynä sisäpäätteillä kojeiston kennoihin. Liittymiskaapeleiden ympärillä on oikosulkuilmäisimien virran mittaukseen käytettävät virtamuuntajat. Ilmaisimen laukaisu toteutuu 1000 A:n oikosulkuvirralla.



KUVA 17. AHXAMK-W 3x185AL+35CU -kaapelit liittymiskenoissa

Ennen muuntamon kytkemistä jännitteiseksi sille on suoritettava sähköturvallisuuslain 1135/2016 mukainen käyttöönottotarkastus. Suurin osa muuntamon mittauksista ja tarkastuksista tehdään jännitteettömänä. Lisäksi ennen jännitteenkytkentää oli varmistettava muuntamotiloihin liittyvien rakennusteknisten ja LVIA-töiden valmistuminen ajallaan. Jännitteenkytkemisen jälkeen muuntamotiloissa työskenteleminen on huomattavasti rajoitetumpaa, joten kaikki työt tulisi olla tehtynä ennen sitä. Muuntamon käyttöönoton jälkeen mahdollisia muuntamossa tehtäviä töitä voivat olla esimerkiksi ilmanvaihdon säätötyö tai paloilmoinjärjestelmän testaukset. Muuntamotiloissa työskenneltäessä paikalla tulee olla kohteen käytönjohtaja. Muuntamotilojen ovien pitää olla jännitteenkytkentähetkellä lopulliset ja lukot paikoillaan sekä verkonhaltijan reittiävain järjestettynä rakennuksen ulkopuolelle.

10.1 Käyttöönottotarkastus

Sähkölaitteisto saadaan ottaa käyttöön vasta, kun käyttöönottotarkastuksessa on riittävässä laajuudessa selvitetty sähkölaitteiston täyttävän sähköturvallisuuslain 1135/2016 6 momentissa luetellut asiat:

- sähkölaitteistosta ei aiheudu vaaraa kenenkään hengelle, terveydelle tai omaisuudelle
- sähkölaitteistosta ei aiheudu sähköisesti tai sähkömagneettisesti kohtuutonta häiriötä
- sähkölaitteiston toiminta ei häiriinny helposti sähköisesti tai sähkömagneettisesti.

Sähkölaitteiston rakentajan tulee laatia käyttöönottotarkastuksesta sähkölaitteiston haltijan käyttöön tarkastuspöytäkirja, josta valtioneuvoston asetuksen 1434/2016 4 momentin mukaan tulee käydä ilmi kohteen yksilöintitiedot, sähkölaitteiston rakentajan ja sähkötöiden johtajan nimi ja yhteystiedot, selvitys sähkölaitteistojen säännösten ja määräysten mukaisuudesta, sovelletut standardit, mahdollisten poikkeamien osalta sähköturvallisuuslain 34 momentin mukaisen selvityksen olemassaolo, yleiskuvaus käytetyistä tarkastusmenetelmistä sekä tarkastusten ja testausten tulokset. Tarkastuksen tekijän on allekirjoitettava tarkastuspöytäkirja tai varmennettava se muulla luotettavalla tavalla. (Ylinen 2019, 5-6.)

Käyttöönottotarkastus suoritetaan aistinvaraisilla tarkastuksilla, toiminnan testauksilla ja mittauksilla. Tarkastukset voidaan jakaa jännitteettömänä tehtäviin ja jännitteen kytkemisen jälkeisiin tarkastuksiin. Asennusten osien tarkastukset ja testit tehdään vasta kokonaisuuden tai asennuksen valmistumisen jälkeen. Tarkastuksen laajuus riippuu asennuksen tyypistä ja laajuudesta. Tavallisesti muuntamolle suoritettavia tarkastuksia ovat esimerkiksi:

- sähkölaitteiden ominais- ja mitoitusarvojen tarkastaminen käyttöolosuhteiden mukaiseksi
- jännitteisten osien sekä jännitteisten osien ja maan väliset etäisyydet
- suoja- ja hoitoetäisyyksien toteutuminen
- sähkölaitteiston ja asennusten osien aistinvaraiset tarkistukset ja toiminnan testaukset
- suojaus-, valvonta-, mittaus- ja ohjauslaitteiden asetusarvojen tarkistukset ja toiminnan testaukset sekä asetusarvojen soveltuvuus kyseisen laitteiston suojaukseen.
- merkintöjen, turvakilpien ja turvalaitteiden tarkistus
- vaadittavien työ-, suoja- ja käyttövälineiden tarkistus
- käyttö- ja huolto-ohjeiden tarkistus.

(Ylinen 2019, 12.)

10.2 Aistinvaraiset tarkastukset

Aistinvaraisella tarkastuksella todetaan, että kiinteästi asennetut sähkölaitteistot ovat niitä koskevien turvallisuusvaatimusten mukaisia, oikein asennettuja ja ehyitä. Aistinvaraista tarkastusta suoritetaan koko sähköasennustyön ajan ja osaa asennuksista ei ole mahdollistakaan tarkastaa ulkoisesti jälkeenpäin, esimerkiksi keskijännitepäättteen valmistamiseen liittyvät toimenpiteet. Jotta aistinvaraiset tarkastukset ja asennukset voidaan luotettavasti suorittaa, tulee asennushenkilöstön olla riittävän ammattitaitoista ja harjaantunutta tehtäväänsä. Hyvällä kouluttamisella voidaan välittää kokemuseräistä tietoa erityiskohteista ja vaatimuksista. (Ylinen 2019, 12.)

10.3 Jännitteettömänä tehtävät mittaukset

Suurin osa muuntamolaitteistolle tehtävistä mittauksista tehdään ennen muuntamon kytkemistä jännitteiseksi. Osa toiminnantestauksistakin on järkevää tehdä apujännitettä käyttäen ennen käyttöönottoa, jotta muuntamosta ei tarvitse katkaista jännitettä kytkennän jälkeen. Ennen mittaustöiden aloittamista on varmistettava laitteiston luotettava erotus ja todettava jännitteettömyys. Erotuslaitteet lukitaan ja merkitään käytön estämiseksi. Työmaadoituksissa on huomioitava eristysvastusmittausten suorittaminen.

10.3.1 Suojajohtimien jatkuvuusmittaukset

Testauksen tarkoituksena on selvittää, että suojajohdinpiirit ovat koko matkaltaan jatkuvia. Mittaus suoritetaan mittaamalla muuntamon maadoitettujen osien luotettava yhdistys muuntamon maadoituskiskoon. Olennaista mittauksessa on se, että jokainen suojajohdinyhteys mitataan ja että mittaus tehdään laitekohtaisesti. Hyväksyttävälle tulokselle ei ole annettu tarkkaa raja-arvoa, koska tulokseen vaikuttavat johtimen poikkipinta-ala ja pituus. Käytännössä muuntamon maadoitusjohtimet ovat niin lyhyitä ja poikkipinnat isoja, että mittaustulokset ovat kymmenien $m\Omega$ luokkaa. SFS-standardin 6000 osan 6 liitteessä 6A on esitetty kuparijohtimien tyypillisiä resistanssiarvoja pituusyksikköä kohden. Mittaustuloksien vertailua ei suoriteta suoraan taulukon arvojen kanssa, mutta sen avulla voidaan selvittää, missä suuruusluokassa mittaustulosten tulisi olla. Jos arvot poikkeavat oleellisesti toisistaan, on selvítettävä poikkeaman syy. (Tiainen 2017, 350.)

Pesulan muuntamolla suojajohtimien jatkuvuudet mitattiin muuntamon maadoituskiskojen ja johtimien ääripisteessä olevien laitteiden tai osien väliltä Fluke 1653B -asennustesteriä käyttäen. Myös muuntamotilojen maadoituskiskon ja pienjännitepääkeskuksen yhteydessä olevan rakennuksen päämaadoituskiskon yhdistyksen todettiin olevan kunnossa. Suojajohtimet ovat sen verran lyhyitä ja näkössä, että niiden eheys, liitokset ja suunnitelmien mukaisuus tuli tarkastettua samalla silmämääräisesti. Kaikki mittaustulokset kirjattiin ylös. Resistanssiarvot olivat pieniä, kymmenien $m\Omega$ luokkaa.

Muuntamon maadoituselektrodin eheys ja toimivuus oli jo tarkastettu aikaisemmin luvussa 9.5.1 esiteyllä menetelmillä. Muuntamon yhdistyminen Oulun Energian muihin maadoitusjärjestelmiin kuitenkin tuli varmistaa ennen sen käyttöönottamista.

Ennen muuntamon kytkemistä jännitteiseksi sen yhdistyminen muihin maadoitusjärjestelmiin voidaan varmistaa esimerkiksi käyttämällä apujohtimena asennetun keskijännitekaapelin vaihejohdinta tai keskusköyttä. Käytettäessä mittausjohtimena keskijännitekaapelin vaihejohdinta kaapeli työmaadoitetaan keskijännitekaapelin toisessa päässä kojeiston maadoituserottimella. Tämän jälkeen mittauksen alla olevan muuntamon kojeistosta todetaan jännitteettömyys minkä jälkeen kojeiston maadoituskiskosta irroitetaan kaapelin keskusköysi ja kosketussuojien maadoitukset jokaiselta vaiheelta sekä estetään niiden koskettaminen suojamaadoitettuihin osiin. Tämän jälkeen voidaan mitata keskijännitekaapelin vaiheen ja muuntamon maadoituskiskon väliltä sarjamittauksena yhteyden syntyminen muihin maadoitusjärjestelmiin.

10.3.2 Eristysresistanssimittaukset

Eristysresistanssimittauksessa selvitetään, että sähkölaitteiden vaihejohtimien ja maan välillä oleva eristys on riittävä. Vaikka laitteet on koestettu tehtaalla, on työmaalla suoritettavan mittauksen tarkoituksena selvittää, ettei sähkölaitteiston rakentamisen aikana ole syntynyt eristysvikaa, joka aiheuttaisi vaiheiden välisen oikosulun tai maasulun. Pesulan muuntamon käyttöönottotarkastuksessa laitetoimittajan edustaja suoritti eristysresistanssimittaukset keskijännitekojeistolle, muuntajalle, muuntamon keskijännitekaapeleille, kiskosillalle ja pienjännitepääkeskukselle. Mittauksessa käytettiin Megger MIT1025 -mittalaitetta, jonka mitta-alue ylettyy 20 TΩ:n asti. Laitteistolle suoritettiin seuraavat mittaukset:

- muuntajan ylä- ja alajännitenapojen välinen eristys jokaisella vaiheella
- muuntajan ylä- ja alajännitenapojen ja maan välinen eristys
- kojeiston vaiheiden- sekä vaiheiden ja maan väliltä
- kiskosillan vaiheiden- sekä vaiheiden ja maan väliltä
- pienjännitekeskuksen äärijohtimien ja maan väliltä, N-PE yhdistys avattuna
- pienjännitekeskuksen vaiheiden väliltä.

Mittauksissa oli huomioitava, että osa mittauksista täytyi suorittaa ennen kiskosillan ja muuntajan keskijännitekaapeleiden kytkemistä lopullisesti paikoilleen. Muuntajan käämien kautta syntyvän yhteyden vuoksi esimerkiksi muuntajan keskijännitekaapeleiden ja siihen yhteydessä olevan kojeiston osan vaiheiden välisen eristysresistanssin mittaus ei onnistu enää jälkeinpäin. Vastaavasti kiskosillan vaiheiden- sekä vaiheiden ja maan väliltä ei onnistu enää sen ollessa kytkettynä muuntajan alajännitenapoihin kiinni, jolloin yhteys maahan ja vaiheiden väliin syntyy alajännitekäämien kautta. Pienjännitekeskuksessa olevat ylijännitesuojat on erotettava tai irroitettava mittauksen ajaksi.

Mittausjännitteinä mittauksissa käytetään pienjännitekeskuksen ja kiskosillan mittauksessa 500 V:n tasajännitettä ja suurjänniteasennusten mittauksessa esimerkiksi 5 kV:n tasajännitettä tai laitevalmistajan ohjeen mukaan. Suurjänniteasennuksille ei ole esitetty pienjänniteasennusten tapaan raja-arvoja mittaustuloksille, mutta esimerkiksi muuntaja ja kojeistovalmistajien asennusohjeissa on esitetty vähimmäisarvoja mittaustuloksille. Mittaustuloksissa kannattaa kiinnittää huomioita huomaavasti toisistaan poikkeaviin tuloksiin. Pienjänniteasennuksille eristysresistanssin vähimmäisarvo käytettäessä 500 V:n mittaajännitettä on 1 MΩ.

Käytettävä testausjännite kohteessa oli kojeistolle 10 kV / 30 s ja pienjänniteasennuksille 500 V / 30 s. Muuntajan mittauksissa käytettiin mittausjännitettä 2500 V / 30 s valmistajan ohjeiden mukaan. Taulukossa 14 on esimerkki kojeiston mittaustuloksista.

TAULUKKO 14. Esimerkki kojeiston eristysresistanssin mittaustuloksista

Mittausväli	Tulos
L1-L2	2,54 TΩ
L1-L3	2,60 TΩ
L2-L3	2,03 TΩ
L1-PE	585 GΩ
L2-PE	748 GΩ
L3-PE	792 GΩ

10.3.3 Toiminnan testaukset

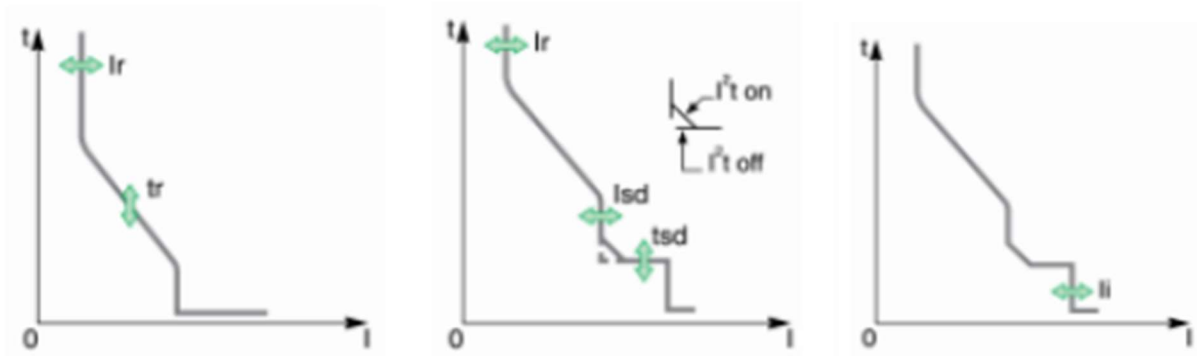
Keskijännitekojeiston pääkytkimenä on kohteessa varokekuormanerotin, jolloin keskijännitepuolella ei tarvittu katkaisijan asetteluita ja sen koestamista. Varokekuormanerotin toiminnat kuitenkin testattiin ohjaamalla erotin kiinni ja auki. Muuntajan lämpötilanvalvonnanreleen toiminta testattiin myös ennen käyttöönottoa, koska muuntajan lämpötila-anturien kytkentäkotelolle pääsy edellyttää jännitteen katkaisemista muuntajalta. Releen toiminta testattiin kytkemällä suojareleelle käyttöjännite työmaasähköistä. Samalla aseteltiin releeseen lämpötila-arvot hälytykselle ja laukaisulle. Muuntajan lämpöluokka on F 100 K, joka sallii 100 asteen nousun normaalista käyttölämpötilasta. Hälytyslämpötilaksi asetettiin 90 °C ja 120 °C lämpötilaksi, jossa varokekuormanerotin laukaistaan auki. Hälytyslämpötilan ylityttyä tai järjestelmän vioittuessa välittyy siitä tieto kiinteistön rakennusautomaatiojärjestelmään ja edelleen kiinteistöhoitajalle.

Lämpötilanvalvontareleen ilmoittamat käämien lämpötilat olivat oikein, joten kytkennät olivat kunnossa. Varokekuormanerotin laukaisu releen ohjaamana testattiin siinä olevan testaustoiminnon avulla. Samassa yhteydessä testattiin pienjännitepääkeskuksen työmaadoituskytkimen ja pääkatkaisijan välinen sähköinen lukitus. Kun pääkatkaisija oli ohjattuna kiinni, maadoituskytkimen käyttö ei ollut mahdollista, niin kuin oli tarkoituskin.

10.3.4 Pienjännitekatkaisijan asettelu

Ennen muuntamon käyttöönottamista oli pääkeskuksen pääkytkimenä toimivan pienjännitekatkaisijan asetteluarvot asetettava, jotta keskus voitaisiin kytkeä jännitteiseksi. Katkaisija on Schneider Electricin valmistama Masterpact MTZ2 2500A nimellisvirralla. Suojareleenä katkaisijassa on saman valmistajan Micrologic 5.0X, joka saa toimintavirtansa virtamuuntajien kautta kuormitusvirrasta. Asetteluarvot katkaisijaan asetettiin Schneiderin EcoStruxure Power Commission -ohjelmaa käyttäen. Ohjelma sisälsi myös automaattisen testaustoiminnon asetuille arvoille. Asetteluarvojen hakemiseen käytin Febdok-ohjelmaa.

Katkaisijan suojareleessä on kolme asetteluarvoa ylivirtasuojaukselle: ylikuormitussuojaus (I_r), hidastettu oikosulkusuojaus (I_{sd}) ja välitön oikosulkusuojaus (I_i). Kuviossa 22 on esitetty suojareleen toimintakarakteristiikat.



KUVIO 22. Suojareleen toimintakarakteristiikat

Pääkeskuksen kiskostoissa olevien oikosulkuvirta-arvojen määrittämiseksi ohjelmaan tuli syöttää keskijänniteverkon, muuntajan ja kiskosillan tiedot. Keskijänniteverkon oikosulkuvirta vaihtelee kytkentätilanteiden mukaan. Laskennassa arvoina käytettiin 1,4...9,5 kA. Tässä tapauksessa ei olisi ollut suurta merkitystä, vaikka oikosulkuvirran olisi laskenut suoraan muuntajan tiedoilla jättäen keskijänniteverkon vaikutuksen huomioimatta. Normaalitilanteessa muuntamo on sähköasemalta katsottuna ketjussa ensimmäisenä ja syöttävä sähköasema on alle kilometrin päässä. Taulukossa 15 on ohjelman laskemat oikosulkuvirran arvot ja pääkeskuksen mitoitusarvot. Arvoista nähdään, että pääkeskus kestää hyvin siihen oikosulun aikana kohdistuvat rasitukset.

TAULUKKO 15. Oikosulkuvirta-arvot ja pääkeskuksen mitoitusarvot

Febdok ohjelmalla lasketut arvot	Virta
Suurin 3 -vaiheinen oikosulkuvirta pääkeskuksen kiskoissa	38,8 kA
Pienin 2-vaiheinen oikosulkuvirta pääkeskuksen kiskoissa	21,9 kA
Sysäysoikosulkuvirta I _{pk} pääkeskuksen kiskoissa	56,8 kA
Pääkeskuksen ja katkaisijan mitoitusarvot	Virta
Keskuksen terminen oikosulun kestävyys/1s I _{cw}	50 kA
Keskuksen dynaamisen oikosulkuvirran kestävyys I _{pk}	70 kA
Pääkatkaisijan katkaisukyky	66 kA
Pääkeskuksen ja katkaisijan nimellisvirta I _n	2500 A

Pääkatkaisijan lisäksi keskuksessa on vastaavanlainen etukojekatkaisija 1600 A:n nimellisvirralla. Suurimmat sulakelähdöt ovat 1250 A gG -sulakkeilla suojattu keskuksen kiinteistöosa ja 2kpl rinnankytketyillä 500 A gG -sulakkeilla toteutettu kompensointilaitteen lähtö, joka vastaa 1000 A gG -sulakkeilla olevaa yksittäistä lähtöä. Muut lähdöt ovat pienempiä, korkeintaan 500 A gG -sulakkeilla suojattuja. Katkaisijan asetteluarvojen hakemisessa oli huomioitava suojauksen selektiivisyys, jotta lähimpänä vikaa oleva suojalaite toimisi ensin. Suurin määräävä tekijä pääkatkaisijan asettelussa olivat 1250 A gG -sulakkeet.

Katkaisijan arvojen määrittely voitiin aloittaa ylikuormitussuojauksen arvojen määrittämisellä. Muuntajan nimellisvirta alajännitepuolella on taulukon 13 mukaan 2253,1 A. Kun muuntaja on hieman ylimitoitettu eikä sitä ole tarvetta ylikuormittaa, katkaisijan ylikuormitussuojauksen virta-asetteluksi valitsin $0,9 \times I_n$, joka on 2250 A. Ylikuormitussuojauksen (tr) toiminta-aika on valittavissa väliltä 0,5...24s. Selektiivisyyden säilyttämiseksi ylikuormitussuojauksen aika-asettelussa oli käytettävä 12 sekunnin asetteluarvoa.

Hidastetun oikosulkusuojauksen virta-asettelu on valittavissa suojareleessä väliltä $0,5 \dots 10 \times I_r$. Selektiivisyyden säilyttämiseksi voidaan käyttää kuviossa 22 näkyvää I^2t , toimintoa, jolloin hidastetussa oikosulkusuojuuksessa on lisäksi käännteisaika. Suojauksen toiminta-aika on valittavissa $0,1 \dots 0,4$ sekunnin väliltä. Asetteluun valitsin ohjelmalla tehdyn vertailun perusteella pienimmät arvot, joilla selektiivisyys säilyy. Lisäksi käytössä on I^2t toiminto. Hidastetun oikosulkusuojauksen virta-asetteluksi (I_{sd}) sain $6 \times I_r$, joka on 13500 A ja aika-asetteluksi (t_{sd}) 0,2 s. Oikosulkusuojauksen välitön laukaisu oli jätettävä pois käytöstä selektiivisyyden säilyttämiseksi.

TAULUKKO 16. Pääkatkaisijan asetteluarvot

Ir	2250 A
tr	12 s
I _{sd}	13500 A
tsd	0,2s I ² t on
Ii	off

Suurjännitesulakkeiden selektiivinen toiminta pienjännitepääkatkaisijan suhteen olisi suotavaa. Kojeistossa on muuntajan suojana OEZ:n valmistamat PM45 -tyyppiset 50 A -sulakkeet. Suurjännitesulakkeiden valmistajan laukaisukäyrän perusteella 50 A -suurjännitesulake toimii 800 A ensiöpuolen virralla 0,01 s ajassa (LIITE 4). Ensiöpuolen virta on redusoitava muuntajan alajännitepuolelle seuraavalla kaavalla, jotta laukaisukäyrien vertailua voidaan suorittaa pienjännitekatkaisijan suhteen:

$$I'_1 = \left(\frac{U_{1N}}{U_{2N}} \right) \times I_1 = \left(\frac{20kV}{0,4kV} \right) \times 0,8kA = 40kA \quad 9)$$

jossa I'_1 on Yläjännitepuolen virta redusoituna alajännitepuolelle (I)

I_1 on Yläjännitepuolen virta (I)

U_{1N} on Yläjännitepuolen jännite (V) ja

U_{2N} on Alajännitepuolen jännite (V).

Vertailtaessa saadun tuloksen perusteella suurjännitesulakkeiden toimintakäyrää pääkatkaisijaan selektiivisyys toteutuu hyvin. Liitteessä 3 suurjännitesulakkeiden laukaisukäyrä sijoitettu pääkatkaisijan sekä etukojesulakkeiden kanssa samaan kaavioon.

10.4 Muuntamon kytkeminen jännitteiseksi

Jännitteettömänä tehtävien mittausten valmistuttua muuntamo voitiin kytkeä jännitteiseksi kytkentätilausessa toivottuna päivänä. Viikkoa ennen toivottua kytkentäpäivää verkonhaltijan edustaja vielä varmisti, että muuntamo olisi valmiina käyttöönotettavaksi ilmoitettuna päivänä. Kytkentäpäivänä verkonhaltijan urakoitsija kävi asentamassa sähkömittarin muuntamon mittauskoteloon ja totesi virta- ja jännitemuuntajien oikeellisuuden ja kytkennän. Liittymiskaapeliin liitokset rengasverkon kaapeleihin olivat valmistuneet edellisenä päivänä.

Kun muuntamossa todettiin kaiken olevan kunnossa ja muuntamo oli varusteineen verkonhaltijan määräysten mukainen, verkonhaltijan edustaja avasi jännitteettömien liittymiskenttien maadoituserotinimet, minkä jälkeen liittymiskaapeleihin voitiin kytkeä jännite. Kun muuntamo syötetään kahdesta suunnasta, tulee liittymiskaapeleiden vaiheistus mitata ennen liittymiskenttien kuormanerotinien sulkeamista. Liittymiskaapeleiden vaiheistus voidaan testata SF₆-eristeisissä kojeistoissa mittaamalla yleismittarilla etupaneelissa olevista jännitteilmaisimien mittauspisteistä. Kojeiston liittymiskaapeleiden jokaisessa vaiheessa on kapasitiiviset jännitemuuntajat, jotka on kytketty etupaneelissa olevaan jänniteilmaisimeen.

Mittauksessa suoritetaan jännitemittaus esimerkiksi yleismittarilla kummankin liittymiskentän ilmaisimien samojen vaiheiden väliltä. Mittaus tehdään jokaiselle vaiheelle. Kun vaiheet ovat samalla tavoin kytketty kummassakin kentässä mittarin näyttämä potentiaaliero on 0V. Mittauksen oikeellisuus todennetaan mittaamalla kenttien väliltä ristiin L1-L2, L2-L3 ja L1-L3, jolloin potentiaalieron tulisi olla huomattavasti isompi kuin 0V. Kuvassa 19 esimerkkinä vaiheistuksen mittaus kentissä olevien ilmaisimien L1 -vaiheiden väliltä, joka on kunnossa. Vaiheiden L1-L2, L2-L3 ja L1-L3 väliltä mitattuna jännitelukema oli 63V.



KUVA 18. Vaiheistuksen mittaus

Kun vaiheistuksen todettiin olevan kunnossa, verkonhaltijan edustaja ilmoitti kytkentätoimenpiteestä käyttökeskukseen ja sulki liittymiskenttien kuormanerotinimet. Tämän jälkeen muuntamo voitiin kytkeä

jännitteiseksi sulkemalla varokekuormanerotin, kun käyttökeskuksesta oli annettu siihen lupa. Jos muuntaja joudutaan kytkemään jännitteettömäksi käyttöönoton jälkeen, siitä tulee olla yhteydessä käyttökeskukseen. Muuntajan kytkeminen tulee suorittaa kuormittamattomana, joten ennen kytkentätoimenpidettä tuli varmistaa, että pääkeskuksen pääkatkaisija on auki.

Varokekuormanerotin ohjauspaneeli on esitetty kuvassa 19. Erottimen ohjaaminen kiinni suoritetaan seuraavassa järjestyksessä: tarkastetaan riittävä SF₆-kaasunpaine mittarista (1), poistetaan kennon työmaadoitus kojeiston ohjauskampea käyttäen maadoituserottimen ohjauspisteestä (2), viritetään ohjauskammella kuormanerotin jousi kääntämällä nuolen osoittamaan suuntaan (3) ja tämän jälkeen ohjataan kuormanerotin kiinni painamalla sulkemispainikkeesta (4). Erottimen ohjaaminen auki suoritetaan punaisesta painikkeesta (5). Ennen kennon maadoittamista on varmistettava, että erotin on auki ja todettava maadoitettavan lähdön jännitteettömyys jännitteenilmaisimesta (7). Maadoituserottimen ja erottimen viritysjousen käytön estämiseksi niiden edessä olevat suojalevyt on lukittavissa lukituspisteestä (6).

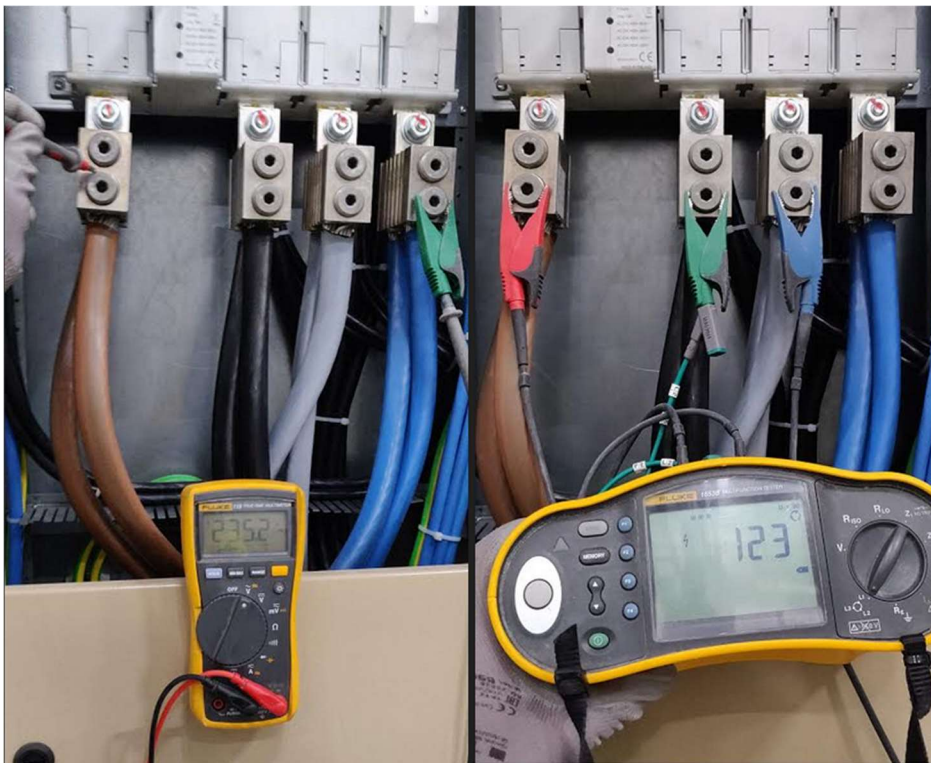


KUVA 19. Varokekuormanerotin käyttöpaneeli

Kytkentäoimenpiteiden jälkeen muuntamon ovet voitiin lukita ja suorittaa jännitteiden mittausta ja vaihejärjestyksen tarkastaminen pääkeskuksella ja lisäksi muuntamon apujänniteitä syöttävä UPS-laite piti ottaa käyttöön. Tässä vaiheessa muita rakennuksen sähköasennuksia ei otettu muuntamon lisäksi käyttöön, joten pääkeskuksen kaikki lähdöt olivat lukittu valmiiksi jo aikaisemmin käytön estämiseksi. Pääkeskus kuitenkin piti kytkeä jännitteiseksi, jotta muuntamon apujännitteet saataisiin toimintaan. Pääkeskukseen asetettiin varoituskyltit jännitteisyydestä ja kiellot lukitusten poistamisesta.

Ensimmäinen jännitteisenä tehtävä mittausta oli jännitetasojen tarkastaminen pääkeskuksesta. Jännitteet tarkastettiin pääkeskuksen syöttökentässä olevasta verkkoanalysointipistosta ja yleismittarilla mittaamalla pääkeskuksesta. Jännitetasoista mitataan pää- ja vaihejännitteet. Jännitetasot olivat kunnossa, ottaen huomioon kuormituksen alla tulevan pienen jännitteen aleneman. Jännitettä voitaisiin säätää tarvittaessa muuntajan väliottokytkimillä. Säätö on tehtävä jännitteettömänä, joten muuntajan irtikytkennästä tulee ilmoittaa käyttökeskukseen ja suoritettava tarvittavat turvallisuustoimenpiteet ennen väliottokytkimien muuttamista.

Toinen pääkeskuksella suoritettava mittausta oli kiertosuunnan tarkistus. Kiertosuunta tulee tarkistaa kaikista 3-vaiheisista sähköasennuksista, jotta voidaan varmistua vaihejohtimien oikeasta järjestyksestä. Kohteessa mittausta suoritettiin Fluke 1653B -asennustesterillä mittaamalla pääkeskuksen kiskoista.



KUVA 20. Esimerkki jännitetasojen ja vaihejärjestyksen tarkastamisesta

Kohteissa, joissa samaa pääkeskusta voidaan syöttää useammalla kuin yhdellä muuntajalla samanaikaisesti, on suoritettava kiertosuunnan lisäksi vastaavanlainen vaiheistuksen mittausta kuin keskijännitekojeiston liittymiskennoille suoritettiin. Vaiheet voivat olla ristissä, vaikka kiertosuunta olisikin mittarin mukaan oikein. Mittaus suoritetaan esimerkiksi pääkeskusten välillä varayhteytenä olevan kiskosillan avaavan katkaisijan yli mittaamalla potentiaalierot jokaiselta vaiheelta. Kohteessa ei ollut kuin yksi muuntaja ja pääkeskus, joten tätä mittausta ei siksi tarvinnut suorittaa.

10.5 Kolmannen osapuolen tarkastukset

Käyttöönoton jälkeen muuntamolle oli vielä suoritettava sähköturvallisuuslain mukainen kolmannen osapuolen varmennustarkastus, joita suorittavat TUKESin sivuilla ilmoitetut valtuutetut tarkastajat ja laitokset. Varmennustarkastus on suoritettava viimeistään 3 kuukauden kuluttua käyttöönotosta. Kun koko kohteen valmistumiseen oli kuitenkin yli 3 kuukautta aikaa muuntamon käyttöönotosta, joten varmennustarkastus rajattiin koskemaan vain muuntamoa ja muu sähkölaitteisto tarkastettiin myöhemmin sen valmistuttua.

Muuntamon varmennustarkastuksessa tarkastaja suorittaa muuntamolle aistinvaraisen tarkastuksen, jossa silmämääräisesti tarkastellaan muuntamon täyttävän sähköturvallisuusmääräykset. Varmennustarkastaja myös varmistaa, että käyttöönototarkastus on asianmukaisesti tehty ja dokumentoitu oikein. Varmennustarkastuksessa havaitut pienet puutteet tulee laittaa kuntoon kohtuullisen ajan kuluessa. Tyypillisiä puutteita ovat esimerkiksi luovutuspiirustuksissa ja merkinnöissä olevat puutteet. Kohteen muuntamossa oli varmennustarkastushetkellä vasta väliaikaiset versiot loppupiirustuksista käytettävissä, joten siitä tuli merkintä varmennustarkastuspöytäkirjoihin.

Varmennustarkastuksen jälkeen muuntamolle ja rakennuksen muulle sähkölaitteistolle suoritetaan määräaikaistarkastukset 10 vuoden välein. Määräaikaistarkastuksessa varmistetaan, että laitteiston käyttö on edelleen turvallista ja huolto- ja kunnossapito-ohjelmaa on noudatettu. Tarkastusvälillä sähkölaitteistoon tehtyjen pienien muutostöiden oikeellisuus ja tarkastuksien dokumentointi varmistetaan myös oikeelliseksi.

11 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää tilaajayritykselle muuntamon rakentamiseen liittyviä määräyksiä ja ohjeita tulevaa projektia varten. Työn tuloksena syntyikin kattava tietopaketti keskijänniteliittymällä varustetun kiinteistön pääjakelujärjestelmän toteutuksesta ja käyttöönotosta sekä liittymän hankinnassa sähköurakoitsijan vastuulle kuuluvista asioista. Etukäteen selvitetystä asioista oli hyötyä käytännön toteutuksessa ja rakentamistyöt kohteessa sujuivat ongelmitta. Lisäksi yritykseen saatiin työn myötä kokemusta ja tietoa liittyen keskijänniteasennusten toteuttamiseen. Jatkossa vastaavanlaisten projektien toteutus on mahdollista kokonaisuudessaan yrityksen omaa työvoimaa käyttäen. Koska muuntamoiden rakenne on pääpiirteittäin samanlainen, opinnäytetyö on hyödyksi vastaavanlaisten projektien toteuttamisessa ja suunnittelussa jatkossa, kun huomioidaan verkkoyhtiökohtaiset ohjeet.

Vaikka muuntamo on pieni kokonaisuus koko kiinteistön sähkölaitteiston kannalta ajateltuna, sitä koskeva ohjeistus ja määräyskokoelma on suuri. Haasteeksi teoriaosuuden koostamisessa muodostui lähdemateriaalin varsin suuri määrä. Opinnäytetyöstä muodostuikin varsin laaja, mutta sen tekeminen oli kuitenkin mielekästä. Aihe oli mielenkiintoinen ja käytännön osuus motivoi hakemaan tietoa asiasta ja kehittämään omaa osaamista. Opinnäytetyötä tehdessä erittäin monet ammattikorkeakoulussa opiskellut asiat tulivat eteen ja rakentamisprojektin aikana myös pääsi näkemään, miten teoriassa opiskeltuja asioita sovelletaan käytännössä. Opinnäytetyöstä oli paljon hyötyä myös itselleni tulevaisuuden työmahdollisuuksia ajatellen, sillä työhön kuului niin projektinhoidollisia asioita kuin suunnittelua vaativia ongelmanratkaisua tilanteitakin.

Käytännön osuuden perusteella korostui etukäteen tehdyn hyvän toteutuksen suunnittelun ja eri osapuolten kanssa tehdyn yhteistyön merkitys. Kun muuntamon rakentaminen tehtiin sähkösuunnitelmien ja verkkoyhtiön ohjeiden mukaan, välttyttiin turhilta viivästyksiltä ja jälkeempäin tehtäviltä hankalilta korjauksilta. Rakennushankkeen eri osapuolien kanssa tehty yhteistyö oli tärkeää, jotta sähkölaitteiston lisäksi muuntamoon liittyvät muut työt tulivat oikea-aikaisesti suoritetuksi ja välttyttiin jälkeempäin hankalalta työskentelyltä käytössä olevassa muuntamossa. Aikataulujen sekä toimitusaikojen tärkeys korostui, kun muuntajan toimitukseen aiheutui muutaman viikon viivästys vallitsevan koronavirustilanteen vuoksi. Käytännössä tällä ei ollut kuitenkaan vaikutusta muuntamon valmistumiseen ajallaan, koska aikatauluihin oli huomioitu mahdolliset ongelmatilanteista aiheutuvat viivästykset.

LÄHTEET

ABB. 2000a. Teknisiä tietoja ja taulukoita -käsikirja. Luku 8, Maasulkusuojaus. Saatavissa: <http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/>. Viitattu: 26.1.2021.

ABB. 2000b. Teknisiä tietoja ja taulukoita -käsikirja. Luku 10, Mittaus-, ohjaus- ja suojauslaitteistot. Saatavissa: <http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/>. Viitattu: 26.1.2021.

Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen, K. & Palva, V. 2015. Suurjännitetekniikka. Helsinki: Otatieto.

Aura, L. & Tonteri, A. 1986. Sähkömiehen käsikirja 2. Porvoo: WSOY.

Aura, L. & Tonteri, A. 2002. Teoreettinen sähkötekniikka. Vantaa: WSOY.

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Helsinki: Otatieto.

Elovaara, J. & Laiho, Y. 1999. Sähkölaitostekniikan perusteet. Helsinki: Otatieto.

Energiateollisuus Ry. 2016a. Verkostosuositus RM 3:16 Kaapeliliitännäinen verkonhaltijan muuntamo. Helsinki: Adato Energia.

Energiateollisuus Ry. 2016b. Tuntimittauksen periaatteita. Saatavissa: https://energia.fi/fi-les/1153/Tuntimittausuositus_paiv_20161012.pdf. Viitattu 26.1.2021.

Energiavirasto. 2019. Sähköverkon tekniset tunnusluvut. Excel taulukko. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/verkkotoiminnan-julkaisut>. Viitattu 23.3.2021.

Finn Electric Oy. 2017a. Öljyeristeiset jakelumuuntajat esite. Saatavissa: https://www.finnelectric.fi/wp-content/uploads/sites/2/2017/01/Esite_Finn-Electric_Oljyeristeiset-jakelumuuntajat_fi_0315.pdf. Viitattu 16.1.2021.

Finn Electric Oy. 2017b. Tehdasvalmisteiset metallikoteloidut SF₆-eristeiset keskijännitekojeistot. Saatavissa: http://media.klinkmann.fi/catalogue/content/data_fe/RB/RB_SF6-eristeinen_moduulikojeisto_0414.pdf. Viitattu 16.1.2021.

Finn Electric Oy. 2019. Imefy valuhartsieristeiset jakelumuuntajat. Asennus-, käyttö- ja huolto-ohje. Helsinki: Finn Electric Oy.

Fluke. 2014. 1623-2 GEO-maadoitusvastustesterin käyttöohjeet. Saatavissa: https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/1623-2_umeng0000.pdf. Viitattu 10.4.2021.

Korpinen, L. 1998a. Sähkövoimatekniikkaopus. 3 Sähkönsiirto- ja jakeluverkot. Oppimateriaali Leena Korpinen sivuilla. Saatavissa: http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/3sahkon_siirto_ja_jakeluverkot.pdf. Viitattu 12.1.2021.

Korpinen, L. 1998b. Sähkövoimatekniikkaopus. 9 Muuntajat ja sähkölaitteet. Oppimateriaali Leena Korpinen sivuilla. Saatavissa: http://leenakorpinen.com/archive/svt_opus/9muuntajat_ja_sahkolaitteet.pdf. Viitattu 26.1.2021.

Lakervi, E. & Partanen, J. 2009. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki: Otatieto.

Monni, M. 2018. Sähköverkkoasennukset. Helsinki: Adato Energia.

Mäkinen, A. 2016. Selvitys keskijänniteverkon maadoitusjärjestelmistä. Tampereen Teknillinen Yliopisto, Sähkötekniikan laitos. Saatavissa: <https://www.elenia.fi/files/0c63041a51828c5e9af6145e9e5dc82032e8b2f0/selvitys-keskija-nniteverkon-maadoitusja-rjestelmista-.pdf>. Viitattu 10.4.2021.

Norelco Oy. 2021. Normax kotimainen modulaarinen keskijännitekojeisto. Saatavissa: <https://norelco.fi/wp-content/uploads/2016/03/NorMax-1.pdf>. Viitattu 11.4.2021.

Oulun Energia Siirto ja Jakelu Oy. 2020. Sähköliittymän hinnoitteluperusteet ja rakentamiseen liittyvät ohjeet 1.12.2020 alkaen. Saatavissa: https://www.oulunenergia.fi/sites/default/files/attachments/sahkoliittymän_hinnoitteluperusteet_ja_rakentamiseen_liittyvat_ohjeet.pdf. Viitattu: 18.1.2021.

Reka Oy. 2021a. Kaapelivalmistajan internet sivut. Saatavissa: <https://www.reka.fi/keski-ja-suurjannitekaapelit/keskijannitekaapelit/keskijannitekaapeli-ahxamk-w-20-kv>. Viitattu 15.4.2021.

Reka Oy. 2021b. Kaapelivalmistajan internet sivut. Saatavissa: <https://www.reka.fi/keski-ja-suurjannitekaapelit/keskijannitekaapelit/keskijannitekaapeli-hxcmk-20-kv>. Viitattu 15.4.2021.

Roine, R., Ylinen, T. & Härkönen, P. 2018. ST-Kortti 53.11 Kuluttajamuuntamot. Espoo: Sähköinfo Oy.

Roine, R. & Kankainen, J. 2017. ST-Kortti 53.61 Sähkötilojen ilmanvaihto ja jäähdytys. Espoo: Sähköinfo Oy.

Salo, T. 2020. Yhteen liitettyjen maadoitusjärjestelmien laskennallinen todentaminen. Oulun Ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/334790/Salo_Tommi.pdf?sequence=2&isAllowed=y. Viitattu 10.4.2021.

Standardi SFS 6001:2018 Suurjännitesähköasennukset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto Ry.

Säköturvallisuuslaki 1135/2016. Verkkodokumentti. Saatavissa: <https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20161135?search%5Btype%5D=pika&search%5Bpika%5D=s%C3%A4hk%C3%B6turvallisuuslaki>. Viitattu: 18.1.2021.

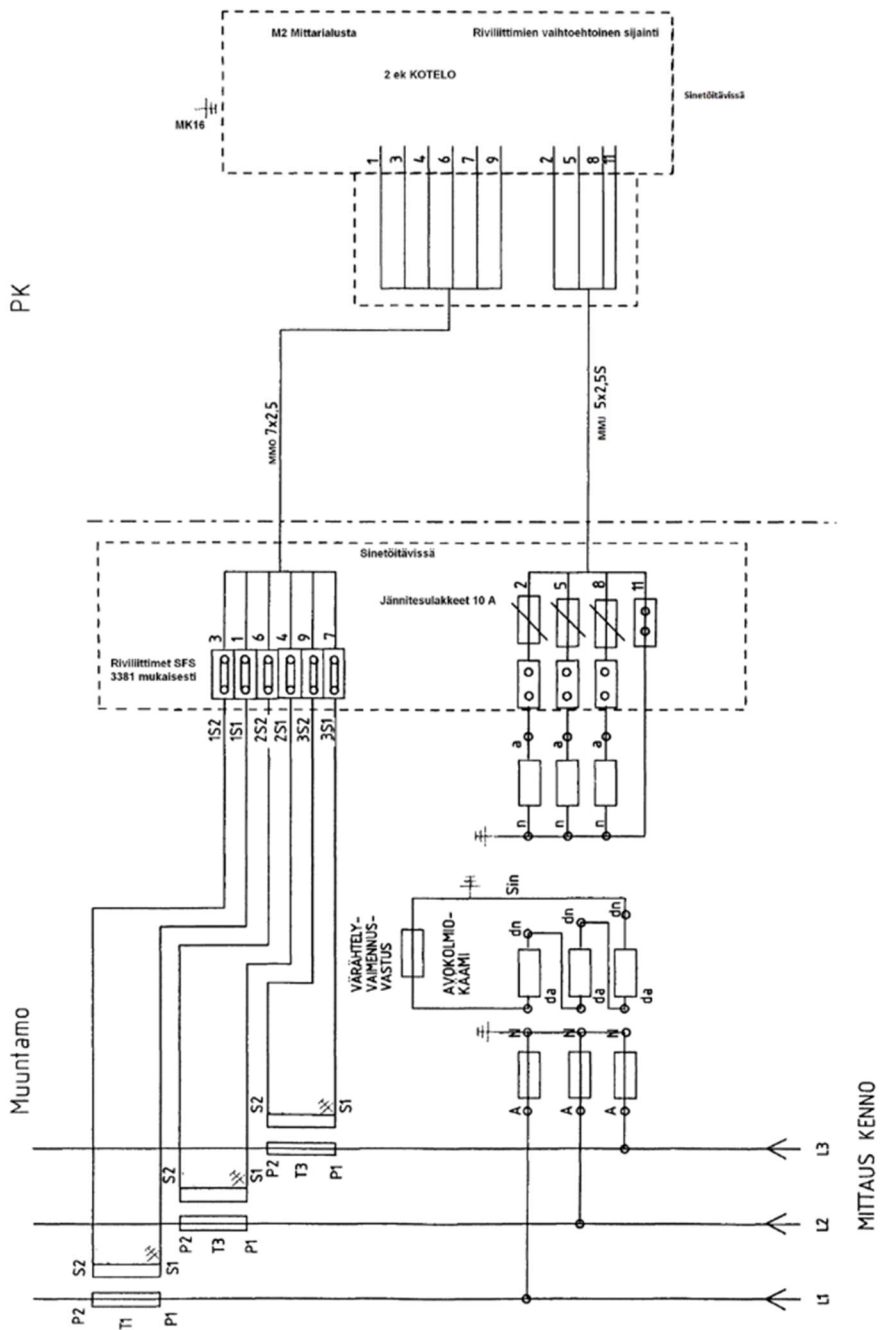
TE Connectivity. Power cable accessories. Esite. Saatavissa: <https://www.te.com/content/dam/te-com/documents/energy/global/productdocuments/Miscellaneous%20Locations/energy-epp0500-PowerCableAccessories-SouthEastEurope.pdf>. Viitattu: 17.3.2021.

Tiainen, E. 2017. D1-2017 Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. Espoo: Sähköinfo Oy.

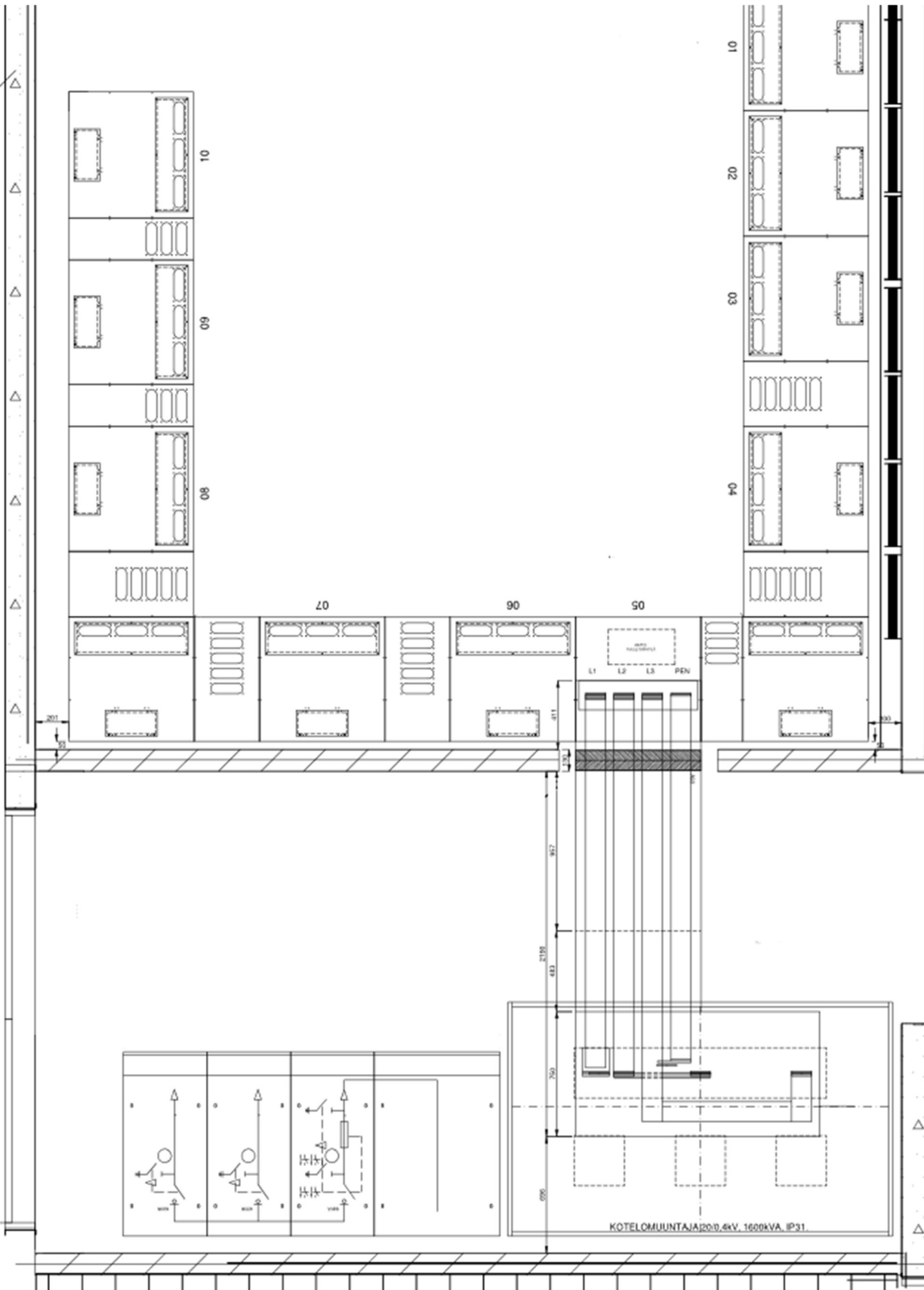
Ylinen, T. & Kauppila, J. 2019. Maadoituskirja. Espoo: Sähköinfo Oy.

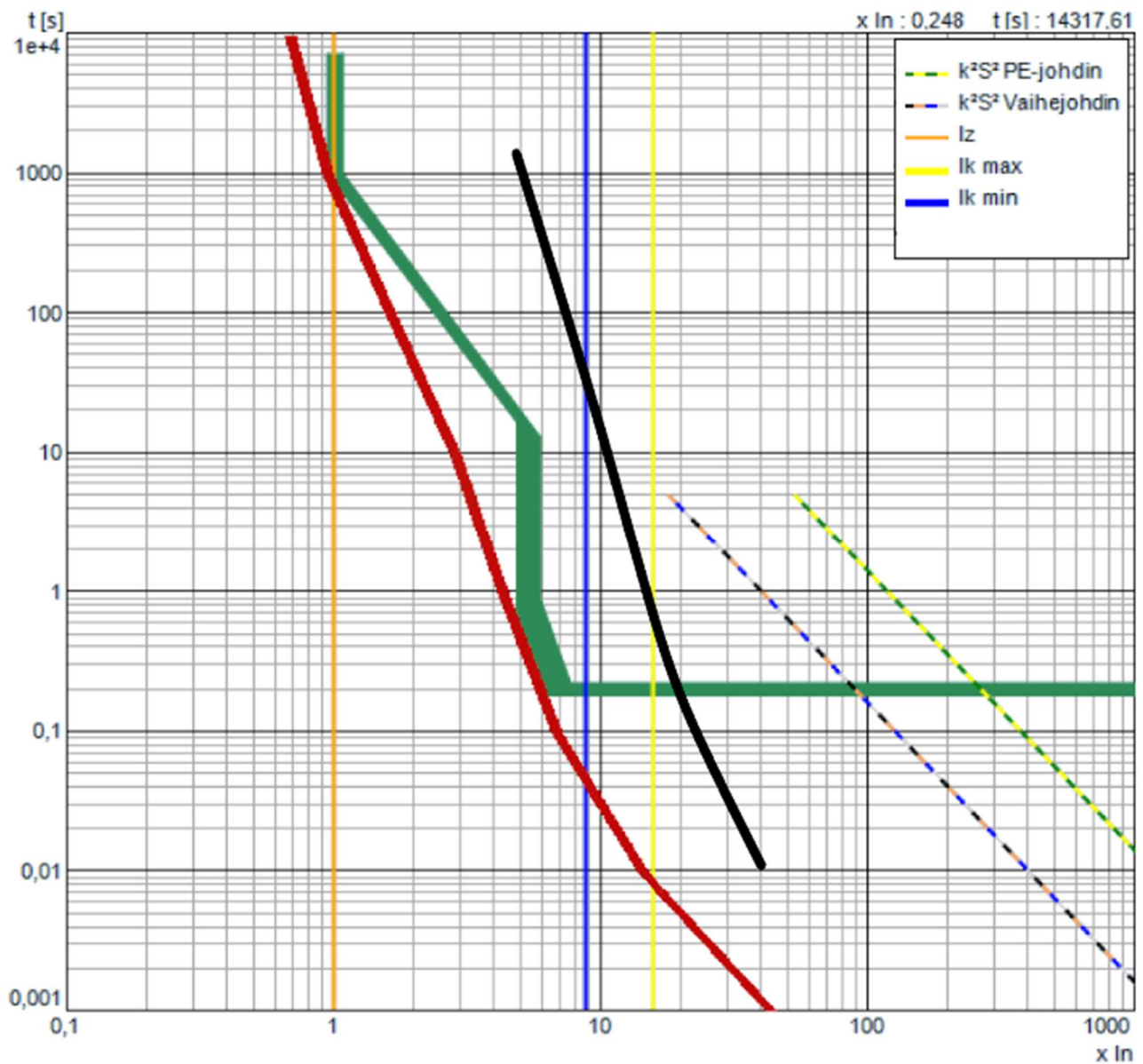
Ylinen, T. 2019. 1-20kV Suurjännitelaitteistojen käyttöönottotarkastusohjeisto. Espoo: Sähköinfo Oy.

Ympäristöministeriön asetus 848/2017. Asetus rakennusten paloturvallisuudesta. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170848>. Viitattu 15.3.2021.



LIITE 2 Sähkölaitteiston sijoittelut





Pääkatkaisija $I_r = 2250A / 12s \quad I_{sd} = 13500A / 0,2s$

Etukoje 1250A gG

Suurjännitesulake 50A

Prearcing time/current characteristic
PM45

