

# KAIVOKSEN MUUNTAMON SÄHKÖISTYSSUUNNITELMA

Niskala Mikko

Opinnäytetyö

Sähkö- ja automaatiotekniikka  
Insinööri (AMK)

2026

Sähkö- ja automaatiotekniikka  
Insinööri (AMK)

---

<b>Tekijä</b>	Mikko Niskala	<b>Vuosi</b>	2026
<b>Ohjaaja</b>	Ins. (YAMK) Tuomas Kariniemi		
<b>Toimeksiantaja</b>	Outokumpu Crome Oy		
<b>Työn nimi</b>	Kaivoksen muuntamon sähköistysuunnitelma		
<b>Sivumäärä</b>	92 + 29		

---

Opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä sähköistysuunnitelma Kemin kaivoksella sijaitsevalle jakelumuuntamolle sen keskijännitejakelusta ja kaapeloinnista. Opinnäytetyön toimeksiantajana oli Outokumpu Chrome Oy.

Työssä esiteltiin teollisuuden keskijänniteverkon rakennetta, muuntajien toimintaa, verkossa ilmeneviä vikatilanteita, kojeistojen toimintaa ja laskettiin oikosulkuvirtoja. Muuntamon sähkösyötön suunnittelussa selvitettiin kaapelijärjestelmän kuormitettavuus ja syötettävän kojeiston kestoisuus. Jännitteenalenemaa laskettiin myös muuntajassa ja kaapeleissa.

Työn tuloksena saatiin muuntamon asennus- ja kaapelointisuunnitelma sekä laskentoja kaapeloinnin ja kojeiston kestävydestä. Opinnäytetyön tuloksia käytetään hyväksi työn toteutuksessa.

Electrical and Automation Engineering  
Bachelor of Engineering

---

<b>Author</b>	Mikko Niskala	<b>Year</b>	2026
<b>Supervisor</b>	Tuomas Kariniemi, M.Eng.		
<b>Commissioned by</b>	Outokumpu Chrome Oy		
<b>Title</b>	Electrification Plan for the Mine Transformer Station		
<b>Number of pages</b>	92 + 29		

---

The aim of the thesis was to make electrification plan for the distribution transformer station, its medium voltage distribution and cabling, located in Kemi mine. The thesis commissioner was Outokumpu Chrome Oy.

The thesis presented structure of the industrial medium voltage network, the operation of transformers, the network's fault situations, the operation of switchgear, and calculated short circuit currents. In the design of the transformers power supply, the load capacity of the cable system and the supplied switchgear durability were determined. Voltage drop was also calculated in the transformer and cables.

The work results were installation and cabling plan for the transformer station, as well as calculations of cabling and switchgear durability. The results of the thesis will be utilized in the implementation of the work.

Keywords

medium voltage network, transformer, short circuit

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	7
2	OUTOKUMPU CHROME OY .....	8
3	SÄHKÖVERKKO .....	9
3.1	Suomen sähköverkko .....	9
3.2	Keskijänniteverkko.....	11
3.3	Verkon maadoitustavat.....	11
3.4	Jakeluverkon suunnittelu .....	13
4	MUUNTAJA .....	14
4.1	Muuntajan toiminta .....	14
4.2	Muuntajan ominaisuuksia .....	17
4.3	Muuntajan nimellisarvot.....	20
5	OIKOSULKU.....	24
5.1	Oikosulkutyypit .....	24
5.1.1	3-vaiheinen oikosulku .....	24
5.1.2	Epäsymmetriset oikosulut.....	25
5.1.3	Oikosulkuvirran luonne .....	26
6	OIKOSULKUVIRTOJEN LASKENTA .....	27
6.1.1	Theveninin menetelmä .....	27
6.1.2	Komponenttien mitoituslaskenta.....	28
6.1.3	Laskeminen ominaisoikosulkutehoilla.....	33
6.1.4	Kiskostot ja kaapelit.....	34
7	KOJEISTOT.....	36
7.1	SF6 eristeaineena .....	36
7.2	Keskijännitekojeistot .....	37
7.3	Keskijännite GIS-rakenne.....	41
7.4	Keskijännite GIS-liitynnät.....	46
7.5	Pienjännitekojeistot.....	47
8	MITTAMUUNTAJAT JA RELESUOJAUS.....	49
8.1	Virtamuuntajat .....	49
8.2	Jännitemuuntajat .....	50

8.3	Relesuojaus.....	51
8.4	Reletyypit.....	53
9	KATKAISIJAT .....	55
9.1	Katkaisijoiden ominaisuuksia.....	55
9.2	SF6-katkaisija.....	56
9.3	Tyhjiökatkaisija .....	57
9.4	Ilmakatkaisija .....	59
10	VOIMAKAAPELIT .....	60
10.1	Kaapelien ominaisuudet ja rakenne.....	60
10.2	Kaapelin valinta .....	64
10.3	Kaapelivarusteet.....	65
11	400 MUUNTAMON TYÖSUUNNITELMA.....	69
11.1	Lähtötietoa.....	69
11.2	Puistomuuntamo.....	70
11.3	Muuntamon sijoitus.....	74
11.4	Kaapelireitti muuntamon keskijännitesyötölle .....	75
11.5	Kojeiston oikosulkukestoisuuden määrittäminen .....	76
11.6	Kaapeleiden kuormitettavuudet ja releasettelu .....	77
11.7	Jännitteenalenema .....	78
11.8	Muuntamon syötön kytkennät.....	79
11.8.1	Uusi keskus ja kaapeleiden käännöt .....	82
11.8.2	Ryhmäjohdon pisin matka .....	82
11.9	Keskijänniteosan ja pienjänniteosan käyttöönottotarkastus.....	83
11.9.1	Keskijänniteosa .....	83
11.9.2	Pienjänniteosa .....	84
11.9.3	Varmennustarkastus.....	86
12	KUSTANNUSLASKELMAT .....	87
13	POHDINTA.....	88
	LÄHTEET.....	89
	LIITTEET .....	92

## KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

GIS	Gas Insulated Switchgear (kaasueristeinen kojeisto)
SELV	Safety Extra-Low Voltage
PELV	Protective Extra-Low Voltage

## 1 JOHDANTO

Kemin kaivoksessa 400 tasolla sähköjen riittämättömyys on ollut pitkään ongelma ja tällä työllä haetaan ratkaisua siihen. Opinnäytetyössä suunnitellaan keskijännitesyöttö tulevalle jakelumuuntamolle ja todetaan kojeiston kestoisuus.

Muuntamon syöttö toteutetaan säteittäisenä, jossa on myös muita mahdollisia syöttösuuntia. Kaapelivaurioiden syntyessä voidaan toisen syöttösuunnan kautta saada sähkötkä takaisin kohteeseen.

Työhön kuuluu kaapelireittien suunnittelu syöttöpaikasta, kaapelipituuksien määrittäminen laskentoja varten, kaapeleiden valinta muuntamon sähkönsyöttöä varten ja kojeiston oikosulkukestoisuuden toteaminen laskennallisesti.

Työssä käytetään materiaalina laajaa sähkötekniikan alan kirjallisuutta ja sähkötekniisiä standardeja yhdessä sähkövoimatekniikan koulutuksessa saadun opin ja oman ammatillisen kokemuksen tukena.

## 2 OUTOKUMPU CHROME OY

Elijärven kaivos, jota kutsutaan nimellä Kemin kaivos, on Outokumpu Oyj:n tytäryhtiön Outokumpu Chrome Oy:n omistama kaivos, jonka sijainti on Kemin kaupungin pohjoispuolella Keminmaan kunnan alueella Elijärvellä. Outokummun Kemin kaivos on EU-alueen ainoa toimiva kromikaivos. (Wikipedia 2025.)

Kemin kaivos on Suomen suurin maanalainen kaivos ja sen vuotuinen malmituotantokapasiteetti on noin 2,7 miljoonaa tonnia. Kaivos kuuluu Outokummun omistamaan integroituun ferrokromin ja ruostumattoman teräksen tuotantoketjuun Kemi-Tornion alueella. (Wikipedia 2025.)

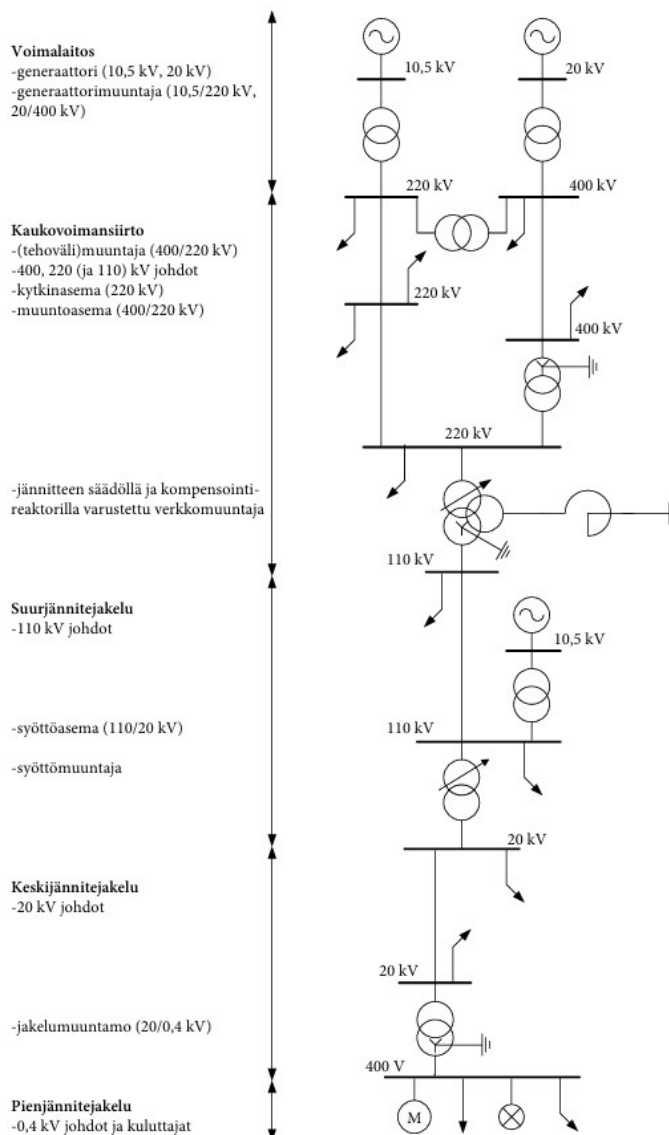
Maailman johtavana vastuullisena ruostumattoman teräksen tuottajana Outokumpu on päivittänyt Kemin kaivoksen malmivaroja ja mineraalivarantoja koskevat arviot, joiden mukaan malmivarat ovat kasvaneet noin 95 % aiempiin arvioihin verrattuna. Kasvu perustuu uusiin maanalaisiin kairauksiin, jotka osoittavat kromimalmin runsaan esiintymisen ja pidentävät kaivoksen arvioitua käyttöikää merkittävästi. Malmivarojen kokonaismäärä on merkittävästi aiempia arvioita suurempi, noin 62,5 miljoonaa tonnia verrattuna aiempaan noin 32,1 miljoonaan tonniin. Nykyisten mineraalivarantojen määrä on puolestaan noin 64,9 miljoonaa tonnia. (Outokumpu 2025.)

Malmivarat tarkoittavat luonnonvaroja, joiden määrä on varmistettu timanttikairauksiin perustuvien geologisten- ja teknisten tietojen avulla. Mineraalivaranot puolestaan ovat tunnistettuja luonnonvaroja, joiden geologinen- ja taloudellinen luotettavuus on alhaisempi, ja jotka edellyttävät lisätutkimuksia ennen luokitte-  
telua malmivaroiksi (Outokumpu 2025). Osaltaan tämä opinnäytetyö liittyy malmivarojen lisääntymiseen ja niiden tarkempaan kartoittamiseen, jota varten sähköistyssuunnitelma on tarpeellinen.

### 3 SÄHKÖVERKKO

#### 3.1 Suomen sähköverkko

Suomessa kaikki kuluttajat ja voimalaitokset on kytkeytyneenä samaan verkkoon (kuvio 1), jossa on lähes sataprosenttisesti kaikki taloudet. Sähkövoimajärjestelmän etuja on, että voimansiirtoa voidaan tehdä hyvällä hyötysuhteella. Siirtoetäisyyksien ollessa pitkiä voidaan tuotanto toteuttaa taloudellisesti järkevimmällä tavalla ja käyttövarmuus lisääntyy. (Elovaara & Haarla 2011b, 54.)



Kuvio 1. Sähkönjakelujärjestelmä (Elovaara & Haarla 2011b, 55)

Hyvään hyötysuhteeseen pyrkiminen edellyttää siirto- ja jakeluhäviöiden minimoimista. Koska virtalämpöhäviöt ovat verrannollisia virran neliöön ( $RI^2$ ) ja siirrettävä teho jännitteen ja virran tuloon ( $UI$ ), suurten tehojen ja pitkien siirtomatkojen yhteydessä käytetään korkeampia siirtojännitteitä häviöiden pienentämiseksi. Vaikka korkeampi jännite lisää laitteistokustannuksia, se pienentää häviöitä ja niistä aiheutuvia kustannuksia sekä voi vähentää tarvittavien siirtojohtojen määrää. Näin ollen tiettyä siirtotehoa ja -etäisyyttä kohden on olemassa optimaalinen siirtojännite. (Elovaara & Haarla 2011b, 54.)

Siirtoverkossa johdot rakennetaan yleisesti rengas- ja silmukkamaiseksi. Tällä tavalla parannetaan verkon käyttövarmuutta, sillä syöttöasemilla on useampia syöttöreittejä. Silmukoidussa verkossa on myös vähemmän häviöitä verrattuna säteittäisverkkoon. (Elovaara & Haarla 2011b, 57.)

Kun on kyseessä suurimmat siirtojännitteet (Suomessa 400 kV ja 220 kV) johtorenkaat pidetään yleisesti suljettuina jännitteenalenen ja tehohäviöiden alentamiseksi sekä käyttövarmuuden parantamiseksi. Suojareleistys on kuitenkin huomattavasti kalliimpi toteuttaa rengaskäytössä kuin säteittäiskäytössä. Muuntajien kautta rinnakkaisesti kytketty alempijännitteinen johto voi ylikuormittua, jos suurempijännitteiset johdot poistuvat käytöstä tai vikaantuvat. Näiden takia suurjännitteisten jakeluverkkojen (110/20 kV) johtorenkaat pidetään auki normaalitilassa ja rengasmuotoa käytetään pääasiassa verkon kytkentämuutoksiin ja viaretsintään. (Elovaara & Haarla 2011b, 57.)

Sähkönjakelujärjestelmän tehtävänä on siirtää voimajärjestelmästä tulevan tai jakeluverkossa olevien voimalaitosten tuottama sähkö sen loppukäyttäjille. Sähkönjakelujärjestelmän osiin kuuluu alueverkko 110 kV ja 45 kV, sähköasemat 110/20 kV sekä 45/20 kV, keskijänniteverkko 20 kV, jakelumuuntamot 20/0,69/0,4 kV sekä myös pienjänniteverkko 0,69/0,4 kV. (Lakervi & Partanen 2008, 11.)

### 3.2 Keskijänniteverkko

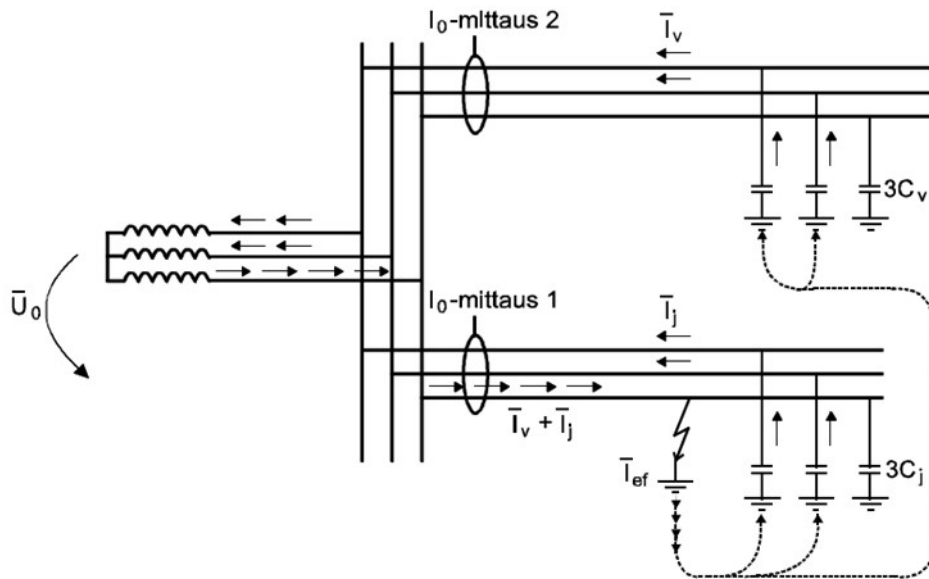
Keskijänniteverkossa jännitetaso Suomessa yleisesti on 20 kV, joissakin kaupungeissa käytetään myös 10 kV:n jännitettä. Keskijänniteverkko on joko maasta erotettu tai sammutettu sammutuskuristinta käyttäen. Sähköasemalta lähtevän keskijännitejohtolähdön suojana on katkaisija ja siihen liitetty ylivirtarele, maasulkurele sekä jälleenkytkentäreleet. (Lakervi & Partanen 2008, 125.)

Avojohtoverkossa ei käytetä ylivirtasuojauksia, ylivirtarele toimii oikosulkusuojana. Keskijänniteverkon käyttö säteittäisenä on yleistä, vaikka se onkin rakennettu monelta osaa silmukoiduksi. Keskijänniteverkko yhdessä 110 kV:n johtojen ja sähköasemien kanssa muodostaa toimivan jakelujärjestelmä kokonaisuuden. Verkkoa ei voida kehittää yksittäisinä paikallisina toimenpiteinä, eikä sitä voida kerralla rakentaa valmiiksi, vaan kehittämistä tehdään asteittain vuosi vuodelta. (Lakervi & Partanen 2008, 125.)

### 3.3 Verkon maadoitustavat

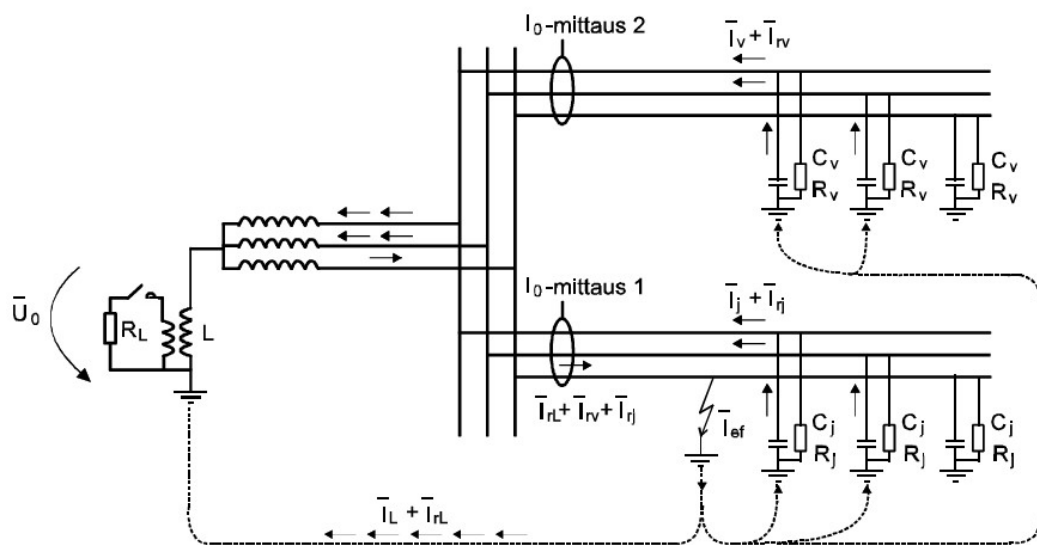
Jos kaikki tähtipisteet ovat maasta eristetyt, verkkoa kutsutaan maasta erotetuksi (kuvio 2). Tällaisen verkon nollaimpedanssi on hyvin suuri, koska se muodostuu vain johtojen maakapasitansseista  $c$ . Kapasitanssin suuruuden puolestaan määrää galvaanisesti yhteen kytketty johtopituus, ja sen impedanssi on useasti suuri. Tällaisessa verkossa maasulkuvirta jää hyvin pieneksi, usein kuormitusvirtaa pienemmäksi, eikä se häiritse normaalia käyttöä. Toisaalta maasulkua on vaikea havaita mittauksilla. (Elovaara & Laiho 2007, 84.)

Vikatilanteessa terveiden vaiheiden jännite maata vasten kohoaa lähes pääjännitteen suuruiseksi, ja tähtipisteen jännite taas vaihejännitteen suuruiseksi. Tällä on vaikutusta kyseisessä verkossa käytettävien laitteiden eristysmitoitukseen. Suomessa osa 5–52 kV:n keskijänniteverkosta on maasta erotettu. (Elovaara & Laiho 2007, 84.)



Kuvio 2. Maasta erotetun verkon yksivaiheinen maasulku ja sen kulkureitti (ABB 2000c, 5)

Tähtipisteen ja maan väliin voidaan kytkeä myös vastus tai kuristin. Kun kuristimen induktanssi mitoitetaan siten, että johtojen maakapasitanssien kautta kulkeva maasulkuvirta kumoutuu, maasulku sammuu itsestään ja verkkoa kutsutaan sammutetuksi. (Kuvio 3; Elovaara & Laiho 2007, 84.)



Kuvio 3. Maasulun sammuttaminen tähtipisteen ja maan väliin kytkettävällä ke-  
lalla (ABB 2000c, 8)

### 3.4 Jakeluverkon suunnittelu

Keski- ja pienjänniteverkkojen (20 kV ja 0,69/0,4 kV) suunnittelussa hetkellisiin tehoihin ei kiinnitetä niin paljon huomiota kuin siirtoverkoissa. Jakeluverkko suunnitellaan yleensä kertatehtävänä, jossa sinne suunnitellaan keskijänniteverkko 20 kV, määritetään muuntamoiden paikat (20/0,69-0,4 kV) sekä suunnitellaan pienjänniteverkko. Suunnittelu on haastava optimointitehtävä, johon yleensä käytetään ohjelmistoja. (Elovaara & Haarla 2011b, 77–78.)

Suunnittelun osia ovat mm.

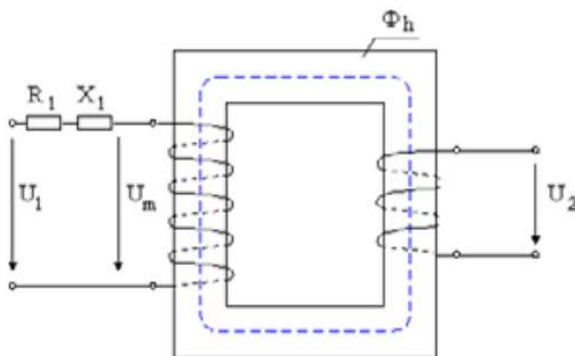
- arvioida kulutustiedot
- optimoida keskijänniteverkon rakenne
- määrittää muuntajapaikat ja pienjänniteverkon rakenne (Elovaara & Haarla 2011b, 77–78).

## 4 MUUNTAJA

Muuntaja on vaihtosähköjärjestelmässä toimiva sähkölaite, joka säätää ja muuntaa jännitteitä sekä virtoja kahden tai useamman käämin välillä sähkömagneettisen induktion avulla (Elovaara & Haarla 2011a, 141).

### 4.1 Muuntajan toiminta

Muuntaja on tyhjäkäynnissä, kun toisiokäämissä ei kulje virtaa ja ensiökäämi on kytketty vaihtojännitteeseen. Ideaalisessa, häviöttömässä yksivaihemuuntajassa ei synny virtalämpöhäviöitä (kuparihäviöitä) käämeissä eikä rautahäviöitä sydämessä, ja hajavuo on nolla, jolloin sama magneettivuo kulkee ensiö- ja toisiokäämin läpi (kuvio 4). Käytännössä muuntaja ei kuitenkaan ole ideaalinen, vaan siinä esiintyy häviöitä ja hajavuota. (Korpinen 1998a.)



Kuvio 4. Yksivaiheisen muuntajan havainnekuva, jossa esitetty ensiökäämin resistanssi  $R_1$  ja reaktanssi  $X_1$ , ensiöjännite  $U_1$  ja toisiojännite  $U_2$ , vuojaännite  $U_m$  sekä muuntajasydämen päävuo  $\Phi_h$  (Korpinen 1998a)

Ensiökäämi ottaa verkosta tyhjäkäyntivirran  $I_0$ , joka on tavallisilla tehomuuntajilla noin 0,3–2,0 % nimellisvirrasta  $I_N$ . Tyhjäkäyntivirta synnyttää ensiökäämissä magnetomotorisen voiman (mmv)  $N_1 I_0$ , joka kehittää rautasydämeen päävuon  $\Phi_h$ . Tämä päävuo kulkee sekä ensiö- että toisiokäämityksen läpi. Hajavuo puolestaan kulkee epämagneettisessa aineessa, jonka magneettivastus on huomattavasti suurempi kuin rautasydämen, minkä vuoksi hajavuo on päävuohon verrattuna vähäinen. Hajavuolla on olennainen vaikutus muuntajan ominaisuuksiin, sillä se yhdessä tyhjäkäyntivirran kanssa määrää muuntajan ensiökäämin hajainduktanssin  $L_1$ , ja se saadaan laskettua kaavalla (1). (Korpinen 1998a.)

$$L = N_1 \frac{\varphi_{\sigma 1}}{\sqrt{2}I_0} \quad (1)$$

missä

$N_1$  on ensiökäämin johdinkierrosten lukumäärä

$\varphi_{\sigma 1}$  on ensiökäämin hajavuo ja

$I_0$  on tyhjäkäyntivirta (Korpinen 1998a).

Hajareaktanssi voidaan myös laskea, kun tiedetään hajainduktanssi sekä verkon taajuus ja se lasketaan kaavalla (2) (Korpinen 1998a). Samaa kaavaa voidaan soveltaa myös kaapeleiden reaktanssien laskentaan.

$$X_{\sigma 1} = 2\pi fL \quad (2)$$

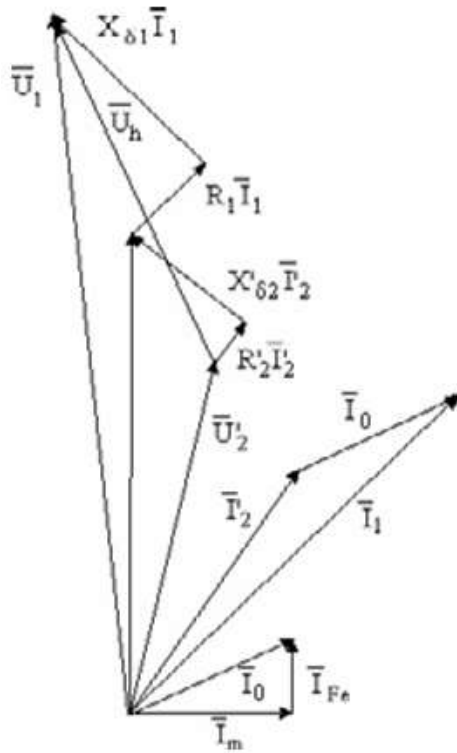
missä

$f$  on verkon taajuus (50 Hz) (Korpinen 1998a).

Kun muuntajan toisiokäämiin kytketään jokin kuormitus, toisiopuolen vuojännite aiheuttaa kuormitukseen virran  $i_2$ , joka synnyttää magnetomotorisen virran  $i_2 n_2$  toisiossa. Häviöttömässä muuntajassa vuo ei saa muuttua, joten mmv:n  $i_2 n_2$  täytyy kumoutua. Muuntajassa tämä toteutuu ensiökäämin verkosta ottaman lisävirran  $I_a$  avulla, joka asettuu suuruudeltaan seuraavanlaiseksi kaavalla (3). (Korpinen 1998a.)

$$I_a N_1 = I_2 N_2 \quad (3)$$

Ensiön lisävirran ja toisiovirran magnetomotoriset voimat vaikuttavat magneetti-piirissä toisiaan vastaan, jolloin virrat  $i_a$  ja  $i_2$  kiertävät pylvästä vastakkaisiin suuntiin. Toisiokäämin magnetomotorinen voima kuitenkin synnyttää toision hajavuon, jota ensiökäämi ei pysty kumoamaan, koska se ei kulje ensiökäämin kautta. Muuntajan ensiövirta muodostuu tyhjäkäyntivirran  $I_0$  ja kuormitusvirran aiheuttaman lisävirran  $I_a$  summana. Kuormitetun muuntajan täydellinen osoitinpiirros esittää muuntajan toiminnan, kun resistanssien ja hajareaktanssien aiheuttamat jännitehäviöt on huomioitu ja se esitetään kuviossa 5. (Korpinen 1998a.)



Kuvassa

$\bar{U}_1$  on ensiöjännite

$\bar{U}'_2$  on ensiöön redusoitu toisiojännite

$R_1$  on ensiökäämin resistanssi

$R'_2$  on toisiökäämin resistanssi ensiöön redusoituna

$X_{\delta 1}$  on ensiökäämin hajareaktanssi

$X'_{\delta 2}$  on ensiöön redusoitu toisiökäämin hajareaktanssi

$\bar{U}_h$  on jännitehäviö

$\bar{I}_0$  on tyhjäkäyntivirta

$\bar{I}_1$  on ensiövirta

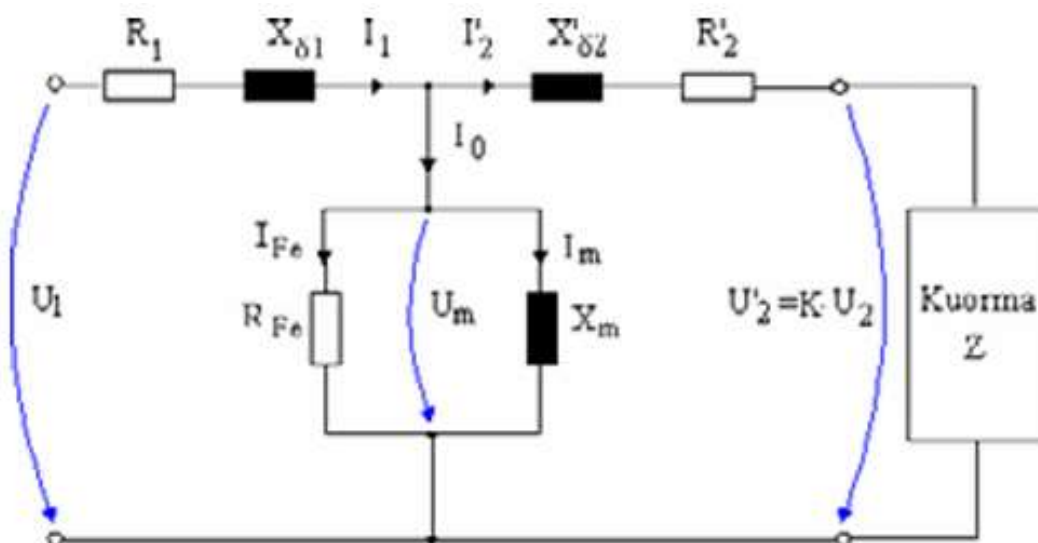
$\bar{I}'_2$  on ensiöön redusoitu toisiovirta

$\bar{I}_{Fe}$  on rautahäviövirta ja

$\bar{I}_m$  on magnetoimisvirta.

Kuvio 5. Kuormitettuna olevan muuntajan osoitinpiirros (Korpinen 1998a)

Muuntaja voidaan esittää myös täydellisenä sijaiskytkentänä (kuvio 6). Sijaiskytkennässä on otettu huomioon myös muuntajan tyhjäkäyntivirta  $I_0$ . (Korpinen 1998a.)



Kuvio 6. Kuva muuntajan täydellisestä sijaiskytkennästä (Korpinen 1998a)

Kuvassa  $R_1$  esittää ensiökäämin resistanssia ja  $X_{\delta 1}$  ensiökäämin hajareaktanssia sekä  $R'_2$  kuvaa toisiokäämin resistanssia ensiöön redusoituna ja  $X'_{\delta 2}$  toisiokäämin hajareaktanssia redusoituna ensiöön. Lisäksi on kuvattuna rautahäviöresistanssi  $R_{Fe}$  ja magnetointireaktanssi  $X_m$  sekä ensiöjännite  $U_1$  ja vuo-jännite  $U_m$ .  $I_0$  puolestaan on tyhjäkäyntivirta,  $I_1$  ensiövirta,  $I'_2$  ensiöön redusoitu toisiovirta,  $I_{Fe}$  rautahäviövirta,  $I_m$  magnetoimisvirta ja kuormana  $Z$ . (Korpinen 1998a.)

Usein muuntajaa tarkastellaan yksinkertaistetulla sijaiskytkennällä, jossa tyhjäkäyntivirtaa kuvaava haara jätetään pois ja ensiön sekä toision resistanssit ja reaktanssit yhdistetään. Näitä yhdistettyjä suureita merkitään  $R_k$ :lla ja  $X_k$ :lla ja ne määritetään laskemalla kaavalla (4). (Korpinen 1998a.)

$$R_k = R_1 + R'_2 \quad (4)$$

## 4.2 Muuntajan ominaisuuksia

Kolmivaihemuuntaja muuttaa usein ylä- ja ala jännitteen vaihe-eroa, joka riippuu muuntajan käämien kytkennästä. Suuret ulko- tai sisäasennuksen muuntajat ovat öljyeristeisiä ja öljy toimii niissä myös jäähdytysväliaineena siirtäen muuntajan rautasydämessä syntyvän lämmön muuntaja-astiaan. Hartseilla ja muilla vastaavanlaisilla aineilla eristettyjä sekä ilmaa jäähdytysaineena käyttäviä niin kutsuttuja kuivamuuntajia käytetään pääasiallisesti jakelujännitteillä sisätiloissa. Muuntajasydän on valmistettu tavallisesti 0,23–0,35 mm paksuista kidesuunnatuista (grain-oriented) sydänlevyistä, jotka voidaan laserkäsitellä häviöiden pienentämiseksi. (Elovaara & Haarla 2011a, 141–142.)

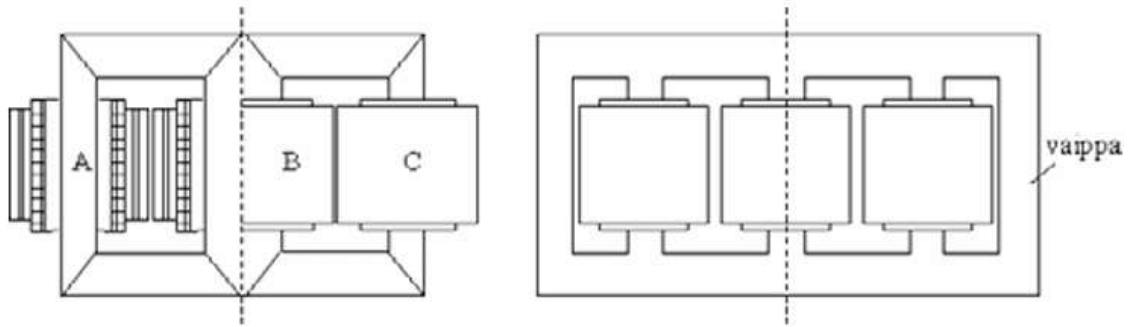
Suurten muuntajien käämit on yleensä valmistettu kuparista, mutta jakelumuntajissa ne voidaan tehdä myös alumiinista. Kolmivaihemuuntaja voidaan kytkeä tähteen (Y, y, star) tai kolmioon (D, d, delta) sekä jakelujännitteillä käytetään myös hakatähtikytkentää (Z, z, zigzag). Isoja kirjaimia käytetään yläjännitekäämeillä ja pieniä kirjaimia alajännitekäämeillä sekä tähtipiste on ilmoitettu N tai n kirjaimella. Käämien kytkennästä määräytyvä vaihesiirto ylä- ja alajännitteillä ilmaistaan tunnusluvulla, joka tulee 12 tuntisen analogisen kellotaulun mukaan, jolloin 1 tunti vastaa 30° vaihe-eroa (taulukko 1). Tällä tavalla ilmaistaan, kuinka

monta astetta tietyn vaiheen alajännite on jäljessä samaista yläjännitettä. Luku 5 tarkoittaa, että alajännite on  $150^\circ$  yläjännitettä jäljessä ja 7 tarkoittaa, että se on  $210^\circ$  jäljessä eli  $150^\circ$  yläjännitettä edellä. (Elovaara & Haarla 2011a, 142.)

Taulukko 1. Muuntajan kytkentäryhmä ja kellotaulun mukaan menevä vaihesiirto (Korpinen 2008a)

Tunnusluku	Kytkentä	Osoitinkuvat		Kytkennät	
		YJ	AJ	YJ	AJ
0	Dd0				
	Yy0				
	Dz0				
5	Dy5				
	Yd5				
	Yz5				
6	Dd6				
	Yy6				
	Dz6				
11	Dy11				
	Yd11				
	Yz11				

Muuntaja on staattinen sähkölaite, jonka aktiivisia osia ovat käämitykset ja rautasydän, jotka tekevät muuntajan varsinaisen työn. Rakenteen puolesta ne voidaan jakaa sydän tai vaippamuuntajiin. (Kuvio 7; Korpinen 1998a.)



Kuvio 7. Vasemmalla kolmivaiheinen sydänmuuntaja ja oikealla kolmivaiheinen vaippamuuntaja (Korpinen 1998a)

Sydänmuuntajassa (vasen) jokaisella vaiheella on oma pylväänsä, johon kuuluvat kyseisen vaiheen käämitykset. Vaippamuuntajassa puolestaan yhden vaiheen magneettivuolla on muista vaiheista riippumaton paluutie. Suurin osa kolmivaihemuuntajista on sydänmuuntajia, koska niiden rakenne on vaippamuuntajia yksinkertaisempi ja jäähdytyksen kannalta edullisempi. (Korpinen 1998a.)

Muuntajassa syntyvät häviöt aiheuttavat rautasydämen ja käämitysten lämpenemistä. Suurikokoiset muuntajat vaativat pienempiä tehokkaampia jäähdytysratkaisuja, koska muuntajan häviöt kasvavat geometrinen mittojen kuution suhteessa, kun taas jäähdytyspinta kasvaa vain mittojen neliön suhteessa. Jäähdytysaineena käytetään ilmaa tai öljyä, minkä perusteella muuntajat jaetaan kuiva- ja öljymuuntajiin. (Korpinen 1998a.)

Kuivamuuntajissa (kuvio 8) käämitykset ja rautasydän ovat suorassa kosketuksessa ympäröivään ilmaan, johon syntyvä lämpö johdetaan. Ilma lämpenee ja nousee ylöspäin, jolloin syntyy luonnollinen ilmavirtaus, joka siirtää lämmön ympäristöön. Tätä kutsutaan luonnolliseksi ilmajäähdytykseksi. Kiihdytetyssä ilmajäähdytyksessä ilmavirtausta tehostetaan puhaltimilla, mikä parantaa jäähdytystehoa. Kuivamuuntajia käytetään erityisesti räjähdys-, saastumis- ja palovaarallissa tiloissa. (Korpinen 1998a.)



Kuvio 8. Kuivamuuntaja hartsieristeen 1600 kVA 20/0,69 kV, joka on tyypiltä sydänmuuntaja ja samanlainen kuin tässä opinnäytetyössä käytetty

#### 4.3 Muuntajan nimellisarvot

Muuntajan kilpiarvoissa ei yleensä ilmoiteta erikseen suhteellista oikosulkureaktanssia ja resistanssia, vaan tavallisesti ilmoitetaan ainoastaan muuntajan suhteellinen oikosulkuimpedanssi  $u_z$ . Kilpiarvoissa ilmoitetaan yleensä myös nimellisteho  $S_N$ , nimelliskuormitushäviöt  $P_k$  ja tyhjäkäyntihäviöt  $P_0$ . Nimelliskuormitushäviöiden perusteella voidaan määrittää muuntajan suhteellinen oikosulkuresistanssi  $u_r = P_k/S_N$ , minkä jälkeen suhteellinen oikosulkureaktanssi voidaan laskea suhteellisen oikosulkuimpedanssin ja resistanssin avulla. (Lakervi & Partanen 2008, 27.)

Sähkönjakeluverkon laskennat koskevat usein tapauksia, joissa esiintyy kaksi jänniteportista, kuten suur- ja keskijännite tai keski- ja pienjännite. Muuntajan impedanssi määritetään tarkasteltavan jänniteportaan nimellisarvojen perusteella ja toisen jänniteportaan virta, jännite ja impedanssiarvot on redusoitava tarkasteltavalle jännitetasolle. Teho on invarianttisuure eikä muutu muuntajan yli. Jännite muunnetaan muuntosuhteen  $\mu$  mukaan ja virta kääntäen. Impedanssi puolestaan muuntuu muuntosuhteen  $\mu$  neliön mukaisesti siten, että alemman jännitetaso tarkasteluissa ylemmän jännitetaso johtoimpedanssi pienenee. (Lakervi & Partanen 2008, 27.)

Muuntajassa vastusarvot annetaan arvokilvissä ja luetteloissa yleensä prosentteina sen nimellisimpedanssista  $Z_N$ , joka saadaan kaavalla (5) (ABB 2000a, 7).

$$Z_N = \frac{U_N [V]}{I_N [A]} [\Omega]/vaihe \quad (5)$$

missä

$U_N$  on muuntajan nimellisjännite

$I_N$  on muuntajan nimellisvirta (ABB 2000a, 7).

Koska kolmivaihemuuntajan nimellisjännite tarkoittaa yleensä pääjännitettä, sen nimellisimpedanssi määritellään myös pääjännitteen perusteella, joka saadaan kaavalla (6) (ABB 2000a, 7).

$$Z_N = \frac{U_N [V]}{\sqrt{3}I_N [A]} [\Omega]/vaihe \quad (6)$$

missä

$U_N$  on muuntajan nimellisjännite

$I_N$  on muuntajan nimellisvirta (ABB 2000a, 7).

Yleensä oikosulkuimpedanssi  $Z_K$  ja usein nollaimpedanssi  $Z_0$  ilmoitetaan muuntajan arvokilvessä prosentteina. Oikosulkuresistanssi  $R_k$  saadaan prosentteina kaavalla (7). (ABB 2000a, 7.)

$$R_k = \frac{100P_k [W]}{S_N [VA]} \% \quad (7)$$

missä

$P_k$  on kuormitushäviöt nimellisvirralla

$S_N$  on muuntajan nimellisteho (ABB 2000a, 7).

Oikosulkureaktanssi  $X_k$  saadaan tällöin prosentteina kaavalla (8) (ABB 2000a, 7).

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (8)$$

Vastusarvoja voidaan esittää myös suhteellisina arvoina, joita merkitään alaindeksillä r (esim.  $Z_{kr}$ ,  $R_{kr}$  ja  $X_{kr}$ ). Nämä ilmaisevat, kuinka suuri osa kyseinen

vastus on muuntajan nimellisimpedanssista  $Z_N$ . Suhteelliset arvot ovat tällöin sadasosa vastaavista prosenttiarvoista. Vastusarvot ohmeina vaihetta kohti pätee seuraavat kaavat (9), (10) ja (11). Kolmivaihemuuntajaa varten arvot lasketaan kaavoilla (12), (13) ja (14). (ABB 2000a, 7–8.)

$$Z_{k1} = Z_{kr} * Z_{1N} \quad \Omega/\text{vaihe} \quad (9)$$

$$R_{k1} = R_{kr} * Z_{1N} \quad \Omega/\text{vaihe} \quad (10)$$

$$X_{k1} = X_{kr} * Z_{1N} \quad \Omega/\text{vaihe} \quad (11)$$

$$Z_{k1} = Z_{kr} \cdot \frac{(U_{N1} [kV])^2}{S_N [KVA]} \quad \Omega/\text{vaihe} \quad (12)$$

$$R_{k1} = R_{kr} \cdot \frac{(U_{N1} [kV])^2}{S_N [KVA]} \quad \Omega/\text{vaihe} \quad (13)$$

$$X_{kr} = X_{kr} \cdot \frac{(U_{N1} [kV])^2}{S_N [KVA]} \quad \Omega/\text{vaihe} \quad (14)$$

Kaavat tuottavat vastusarvot ensiöpuolelle redusoituina. Jos arvot halutaan toisiopuolelle, ne kerrotaan muuntosuhteen  $\mu$  neliöllä kaavalla (15) tai käytetään toisiopuolen nimellisimpedanssia  $Z_{N2}$  ylläolevissa kaavoissa. (ABB 2000a, 7.)

$$\mu^2 = \left( \frac{U_{N2}}{U_{N1}} \right)^2 \quad (15)$$

Muuntajien vastusarvoja tarvitaan jännitteenaleneman sekä oikosulku- ja maasulkuvirtojen laskennassa. Muuntajassa syntyvä suhteellinen jännitteenalennus  $U_{hr}$  voidaan määrittää likimääräisesti kaavalla (16). (ABB 2000a, 8.)

$$U_{hr} \approx \frac{I}{I_N} (R_{kr} \cos \varphi + X_{kr} \sin \varphi) \quad (16)$$

missä

$I$  on kuormitusvirta

$\cos \varphi$  on tehokerroin (ABB 2000a, 8).

Muuntajan toisiopuolen symmetrinen kolmivaiheoikosulku aiheuttaa oikosulkuvirran  $I_k$ , joka lasketaan kaavalla (17) (ABB 2000a, 8).

$$I_k \approx \frac{U_N}{\sqrt{3} Z_k} = \frac{I_N}{Z_{kr}} \quad (17)$$

Vastaavasti yksivaiheisessa oikosulussa syntyy oikosulkuvirta, jota kutsutaan maasulkuvirraksi  $I_{k1v}$  ja se lasketaan kaavalla (18) (ABB 2000a, 8).

$$I_{k1v} = \frac{3 \cdot I_N}{2 Z_{kr} + Z_{0r}} \quad (18)$$

missä

$Z_{0r}$  on suhteellinen nollaimpedanssi (ABB 2000a, 8).

## 5 OIKOSULKU

Vikatilanteiden arviointi on tärkeä osa voimansiirtojärjestelmän suunnittelua. Tyypillisimpiä häiriöitä ovat oikosulut ja maasulut. Oikosulussa (short-circuit) kaksi tai useampi vaihe kytkeytyy toisiinsa ilman yhteyttä maahan, kun taas maasulussa (earth-fault) vikavirta kulkee aina myös maan kautta. (Elovaara & Haarla 2011b, 166.)

### 5.1 Oikosulkutyypit

Osa vioista on symmetrisiä, eli ne vaikuttavat kaikkiin kolmeen vaiheeseen samalla tavalla. Tällaisia ovat esimerkiksi johdon tai muuntajan kolmivaiheinen oikosulku, johdon tai muuntajan laukeaminen tai suuren tuotantolaitoksen äkillinen poistuminen verkosta. (Elovaara & Haarla 2011b, 166.)

Epäsymmetrisissä vioissa (unsymmetrical faults) vaikutukset näkyvät eri lailla eri vaiheissa. Tällaisia poikittaisvikoja ovat esimerkiksi yksi- ja kaksivaiheiset maasulut (single & double phase-to-ground faults), joita esiintyy usein salaman iskiessä johtoon. Jos jännite puuttuu vähintään yhdestä vaiheesta, kyseessä on sarjavika (series fault) tai yksivaiheinen katkos (single phase longitudinal fault), joka johtuu esimerkiksi sulakkeen tai katkaisijan virheellisestä toiminnasta. (Elovaara & Haarla 2011b, 167.)

#### 5.1.1 3-vaiheinen oikosulku

3-vaiheinen oikosulku rasittaa sähköverkkoa eniten, joten se on mahdollisimman nopeasti kytkettävä pois. Syntyessään 3-vaiheinen oikosulkuvirta voi saavuttaa 30–40 kertaisia nimellisvirta-arvoja. Oikosulkuvirta voi vaurioittaa johtimia sekä kojeita ja tästä johtuen laitteille ilmoitetaan suurimpien sallittujen virtojen sallitut kestoajat. Normaalityössä 3-vaiheista oikosulkua syöttää symmetrinen kolmivaihejännite. Riippuen oikosulun alkuhetkestä virta voi olla joko symmetrinen, jolloin oikosulku toteutuu jännitteen huippuarvon hetkellä, tai epäsymmetrinen. Yleensä oikosulkuvirta on näiden kahden välimuoto ja varsinkin

3-vaihe verkossa eri vaiheiden oikosulkuvirrat ovat sattumanvaraisia välimuotoja. (Aura & Tonteri 1993, 159.)

Epäsymmetriseen oikosulkuvirtaan liittyy tasakomponentti, jonka suuruus riippuu oikosulun alkuhetkestä. Vaihtovirtapiirissä esiintyvä tasakomponentti voi olla haitallinen, sillä se saattaa esimerkiksi esimagnetoida mittamuuntajia ja siten heikentää niiden mittaustarkkuutta. Oikosulkuvirta summautuu piirin kuormitusvirtaan, mutta koska se on huomattavasti suurempi, oletetaan oikosulkulaskuissa usein verkon olevan tyhjäkäynnissä. Epäsymmetrisen oikosulkuvirran ensimmäisen oikosulkuhetken jälkeistä huippuarvoa kutsutaan sysäyoikosulkuvirraksi  $I_s$  tai  $I_p$ . Tätä suurinta oikosulkuvirtaa käytetään laitteiden ja kojeiden sähködynaamisten voimien laskennassa, sillä se määrää verkossa esiintyvien suurimpien mekaanisten rasitusten suuruuden. (Aura & Tonteri 1993, 159–160.)

### 5.1.2 Epäsymmetriset oikosulut

Epäsymmetrisiin vikoihin kuuluvat yksivaiheinen maasulku sekä kaksivaiheinen oikosulku, joka voi esiintyä myös samanaikaisesti maasulkuna. Tällaisia vikatapauksia ei voida käsitellä erillisinä yksivaihetapauksina, vaan piiri on ratkaistava kokonaisuutena piiriteorian menetelmiä soveltaen. Tällä tavalla ratkaisemalla ei voida muodostaa yleispäteviä sääntöjä vikatapausten laskentaa varten. Siksi epäsymmetriset vikatilanteet käsitellään yleensä symmetristen komponenttien menetelmällä, jonka avulla voidaan johtaa myös epäsymmetrisille vioille yleisesti pätevät yhtälöt ja säännöt. (Aura & Tonteri 1993, 162.)

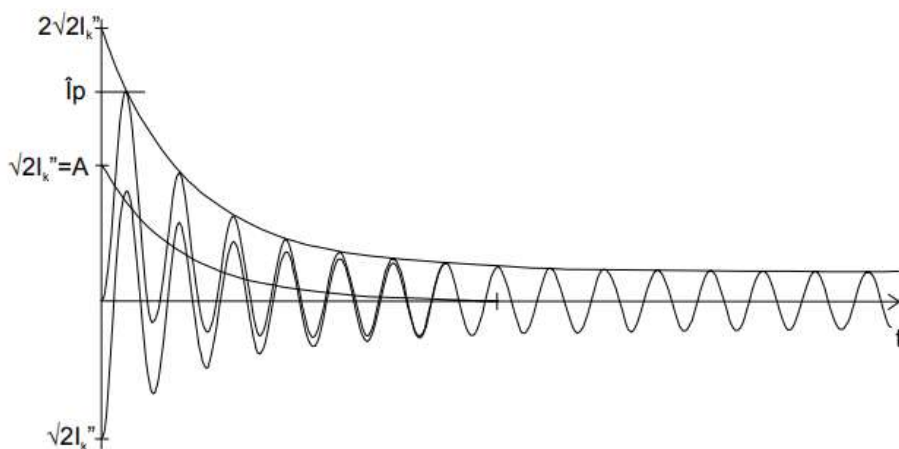
Kaksivaiheinen oikosulku sekä sama kyseinen oikosulku, johon liittyy maakosketus, samoin kuin jäykästi maadoitetun järjestelmän yksivaiheinen maasulku, ovat verkon kannalta aina oikosulkutilanteita, ja verkko on suojattu niitä vastaan oikosulkusuojilla. Verkko on näin ollen mitoitettu siten, että oikosulkusuojat toimivat. Erityisen haastava vikatilanne on yksivaiheinen maasulku maasta erotetussa verkossa, sillä maasulkukohdan vikavastuksen arvoa ei tiedetä ja se voi vaihdella laajasti. Tämä tekee maasulun havaitsemisesta ja vian poistamisesta vaikeaa. Yksivaiheinen maasulku voi

aiheuttaa verkkoon vaarallisen suuria vikajännitteitä ja siten heikentää sähkönjakelun turvallisuutta. Jäykästi maadoitetun nollapisteen verkossa myös yksinkertainen maasulku on aina oikosulkutilanne. Sen sijaan erotetuissa ja sammutetuissa verkoissa yksivaiheisen maasulun laskenta on huomattavasti haastavampaa. (Aura & Tonteri 1993, 162–163.)

### 5.1.3 Oikosulkuvirran luonne

Oikosulkuvirta koostuu vaimenevasta tasavirtakomponentista (A) (kuvio 9), jonka suuruus riippuu vian syntyhetkestä ja vaimenemisnopeus piirissä olevan resistanssin ja reaktanssin (R/X) suhteesta, sekä vaihtovirtakomponentista, jossa voi olla myös vaimeneva osa (ABB 2000b, 1).

Alkuoikosulkuvirta  $I_K''$  kuvaa symmetrisen oikosulkuvirran tehollisarvoa vian alkuhetkellä ja vastaa generaattoreiden reaktansseja vian syntyhetkellä. Reaktanssien kasvaessa vian aikana virta vaimenee jatkuvuustilan arvoon  $I_K$ . Kun tasavirtakomponentti huomioidaan, ensimmäisen huipun hetkellisarvo on sysäyoikosulkuvirta  $i_p$  tai  $i_s$ . Ekvivalenttisella termisellä oikosulkuvirralla  $I_{th}$  on sama virtateitä lämmittävä vaikutus kuin todellisella oikosulkuvirralla. Muutostilan oikosulkuvirtaa  $I_k'$  ei käytetä IEC-standardeissa. (ABB 2000b, 1.)



Kuvio 9. Käyrämuoto oikosulkuvirrasta, jossa tasavirtakomponentti A (ABB 2000b, 2)

## 6 OIKOSULKUVIRTOJEN LASKENTA

Verkon laitteiden mitoituksessa, oikosulkusuojauksen suunnittelussa ja turvallisen käytön varmistamisessa on tunnettava oikosulkuvirrat eri tilanteissa ja verkon eri osissa. Komponenttien on kestävä oikosulkujen aiheuttamat dynaamiset ja termiset kuormitukset, ja riittävän suuri oikosulkuvirta on edellytys vakaalle jännitteelle ja hyvälle sähkön laadulle. (ABB 2000b, 1.)

### 6.1.1 Theveninin menetelmä

Yksivaiheisessa sijaiskytkennässä Theveninin menetelmällä kaikki verkon komponentit ja lähteet korvataan oikosulkuimpedansseilla. Vikapaikkaan sijoitetaan ekvivalenttinen jännitelähde  $cU_N$ , jossa  $U_N$  on vikapaikan käyttöjännite vikahetkellä ja  $c$  on taulukon 2 mukainen kerroin. (ABB 2000b, 1.)

Oikosulku saadaan tällöin kaavalla (19):

$$I_k'' = \frac{c U_N}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{c U_N}{\sqrt{3} Z_k}, \quad (19)$$

missä

$c$  on taulukon 2 korjauskerroin

$U_N$  on syöttävän verkon jännite

$Z_k$  on impedanssi vikapaikasta tarkasteltuna (ABB 2000b, 1).

Taulukko 2. Laskennassa käytettävät korjauskertoimet (ABB 2000b, 2)

Nimellisjännite $U_n$	Maksimioiko- sulkuvirta $C_{max}$	Minimioiko- sulkuvirta $C_{min}$
pienjännite 100 V – 1000 V		
a) 230 V / 400 V	1.00	0.95
b) muut jännitteet	1.05	1.00
keskijännite 1 kV - 35 kV	1.10	1.00
suurjännite 35 kV - 230 kV	1.10	1.00

Maksimioikosulkuvirtaa laskettaessa oletetaan verkon olevan sellaisessa kytkentätilanteessa, jossa oikosulkuvirta on suurimmillaan. Tällöin jännitekerroin  $c$  valitaan tarkasteltavan jännitetason suurinta sallittua käyttöjännitettä vastaavaksi. (ABB 2000b, 9.)

Minimioikosulkuvirran laskennassa verkon kytkentätilanne valitaan siten, että oikosulkuvirta on mahdollisimman pieni. Jännitekerroin  $c$  valitaan myös tässä tapauksessa jännitetason maksimiarvon mukaiseksi. Lisäksi oletetaan, etteivät moottorit syötä vikavirtaa verkkoon, ja johtimien resistanssi määritetään niiden suurinta sallittua käyttölämpötilaa vastaavaksi. (ABB 2000b, 9.)

### 6.1.2 Komponenttien mitoituslaskenta

Yksi- ja kaksivaiheisissa vioissa sijaiskytkentä laaditaan myötä-, vasta- ja nollakomponenttiverkkojen avulla, ja vikatyypin määrää keskinäisen kytkeytymisen. Myötä- ja vastaverkkojen komponenttien impedanssit kytkeytyvät samalla tavalla, mutta nollaverkon kytkeytyminen riippuu muuntajan kytkentäryhmästä. Tähtipisteen ja maan väliset impedanssit sekä vikaimpedanssi näkyvät nollaverkossa kolminkertaisina. Ekvivalenttinen jännitelähde sijoitetaan vain myötäverkkoon. Johdoilla, muuntajilla ja kuristimilla myötä- ja vastaimpedanssit ovat samat, kun taas pyörivien koneiden myötä- ja vastareaktanssit voivat erota toisistaan. Nollaimpedanssit eroavat myötäimpedansseista kaikissa verkon komponenteissa. (ABB 2000b, 2.)

Verkkosyötölle oikosulkuimpedanssi voidaan laskea oikosulkutehosta tai virrasta kaavalla (20):

$$Z_Q'' = \frac{c \cdot U_N^2}{S_{kQ}''} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}''} \quad (20)$$

missä

$c$  on taulukon 2 mukainen kerroin

$U_N$  on syöttävän verkon jännite

$S_{kQ}''$  on alkuoikosulkuteho

$I_{kQ}''$  on alkuoikosulkuvirta (ABB 2000b, 4).

Yleensä pätee yli 35 kV:n jännitteellä  $Z_Q \approx X_Q$ , muussa tapauksessa  $R_Q \approx 0,1 \cdot X_Q$  (ABB 2000b, 4).

Kolmivaiheisessa oikosulussa oikosulkuimpedanssi muodostuu ainoastaan myötäimpedansseista ja se saadaan kaavalla (21):

$$I_{k3}'' = \frac{c U_N}{\sqrt{3} Z_1} \quad (21)$$

missä

$c$  on taulukon 2 mukainen korjauskerroin

$U_N$  on jännite syöttävässä verkossa

$Z_1$  on myötäkomponenttiverkon impedanssi (ABB 2000b, 2).

Kaksivaiheinen oikosulku ilman kosketusta maahan saadaan kaavalla (22):

$$I_{k2}'' = \frac{c U_N}{|\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2|} \quad (22)$$

missä

$c$  on taulukon 2 mukainen korjauskerroin

$U_N$  on jännite syöttävässä verkossa

$\overline{Z}_1$  on myötäkomponenttiverkon impedanssi

$\overline{Z}_2$  on vastakomponenttiverkon impedanssi (ABB 2000b, 2).

Yksivaiheinen oikosulkuvirta saadaan kaavalla (23):

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} c U_N}{|\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2 + \overline{Z}_0|} \quad (23)$$

missä

$\overline{Z}_1$  on myötäkomponenttiverkon impedanssi

$\overline{Z}_2$  on vastakomponenttiverkon impedanssi

$\overline{Z}_0$  on nollakomponenttiverkon impedanssi (ABB 2000b, 3).

Sysäysoikosulkuvirta  $i_s$  (dynamic short-circuit current), joka on oikosulkuvirran suurin hetkellisarvo, ja joka esiintyy noin yhden puolijakson jälkeen vian

alkamisesta. Oikosulkuvirta oletetaan syntyvän hetkellä, jolloin tasakomponentti on huipussaan. (Elovaara & Haarla 2011b, 174.)

Sysäysoikosulkuvirta säteittäisessä verkossa lasketaan kaavalla (24):

$$i_p = k \sqrt{2} I_k'' \quad (24)$$

missä

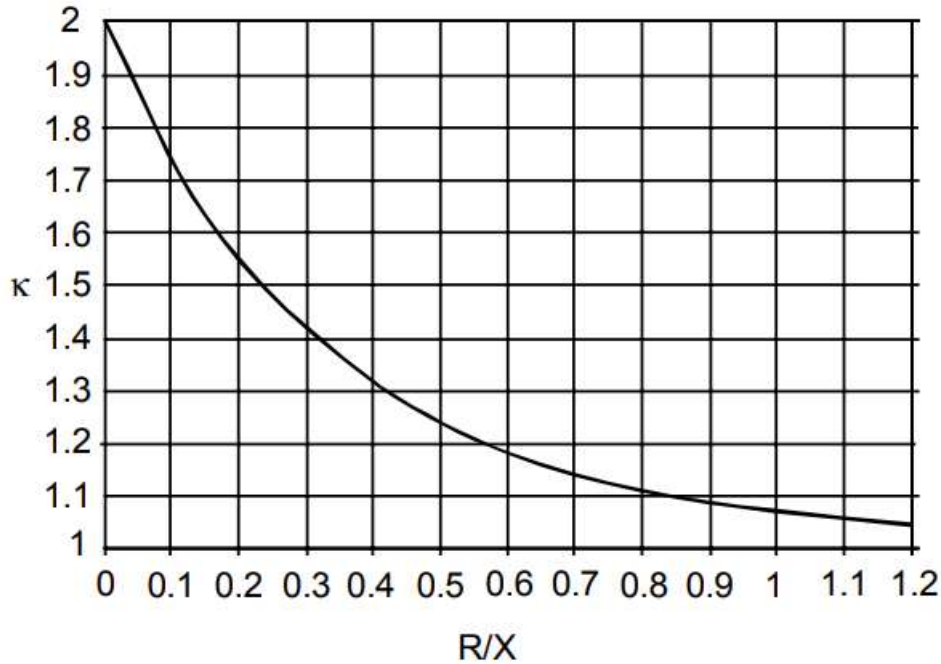
$k$  on sysäyskerroin (kuvio 10), piirin R/X suhteen funktiona (ABB 2000b, 7).

Standardin IEC 60909 mukaan, sysäysoikosulkuvirran suuruus lasketaan yhtälöstä (24), jossa kerroin  $k$  on muodostuu oikosulkupiirin resistanssin R ja reaktanssin X suhteesta ja se saadaan kaavalla (25) (Elovaara & Haarla 2011b, 174).

$$k \approx 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3\frac{R}{X}} \quad (25)$$

Ennen sysäysoikosulkuvirran laskentaan käytettiin yleisesti saksasalaista VDE-standardia ja siitä peräisin olevaa kaavaa (26), joka vastaan IEC-standardissa suhdetta  $R/X \approx 0,103$  (Elovaara & Haarla 2011b, 174).

$$i_p = 1,8\sqrt{2} I_k'' \approx 2,5 \cdot I_k'' \quad (26)$$



Kuvio 10. Sysäyskertoimen riippuvuus oikosulkuvirtapiirin resistanssin ja reaktanssin ( $R/X$ ) välisestä suhteesta (ABB 2000b, 8)

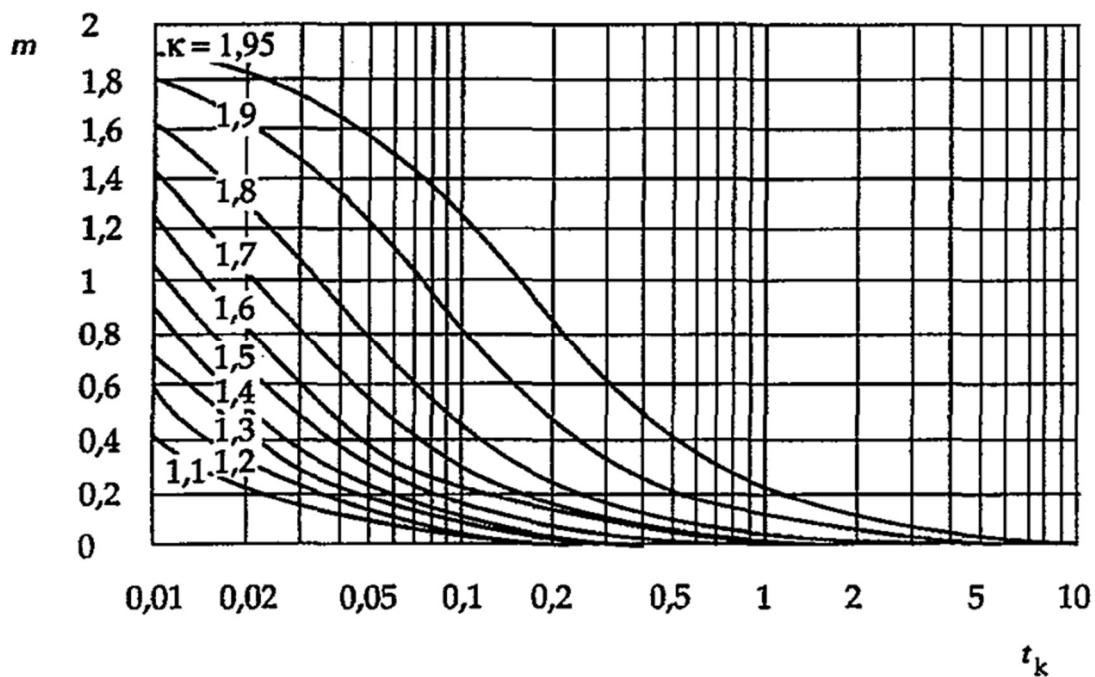
Terminen oikosulkuvirta  $I_{th}$  eli ekvivalenttinen oikosulkuvirta lasketaan kaavalla (27), jossa kaavan kerroin  $m$  on vaimeneva vaihtovirtakomponentti, joka saadaan kuviosta 11 ja kerroin  $n$  on vaimenevan tasavirtakomponentin vaikutus (Kuvio 12; ABB 2000b, 8).

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m + n} \quad (27)$$

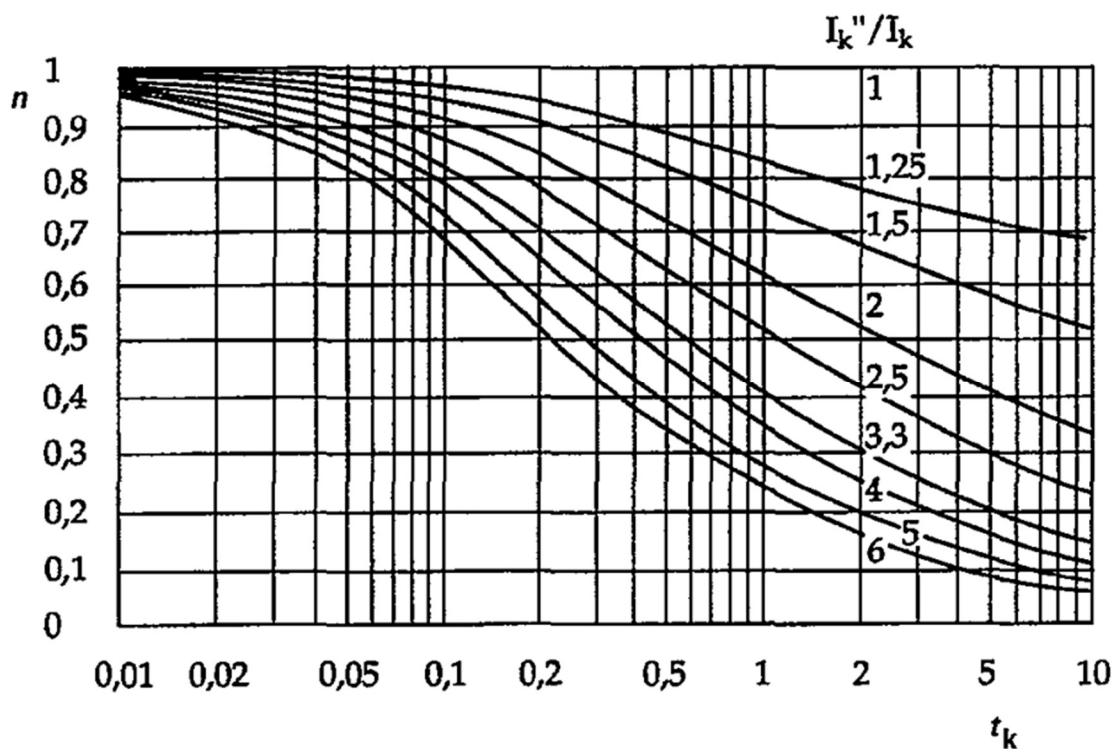
Terminen kestopvirta kuvaa oikosulkuvirran kestoa lämpenemän kannalta, ja se ilmoitetaan yleensä 1 s tai 3 s arvona. Ekvivalenttinen 1 sekunnin oikosulkuvirta lasketaan myös kaavalla (28). (Hietalahti 2013, 269.)

$$W = R \cdot I^2 \cdot t \rightarrow I_{1s}^2 \cdot 1s = I_k''^2 \cdot t \rightarrow I_{1s} = I_k'' \sqrt{t/s} \quad (28)$$

Oikosulkuvirtaa syöttää syöttävä verkko, tahtikoneet ja epätahtimoottorit. Kun generaattorin ja vikapaikan välinen impedanssi on suuri, ei generaattorin impedanssin muuttumisella oikosulun aikana ole juuri merkitystä piirin kokonaisimpedanssiin ja tällöin voidaan olettaa että  $I_k'' = I_k$ . Eli näin ollen vaihtovirtakomponentti ei vaimene. Oikosulkumoottoreilla ei myöskään ole vaikutusta pysyvän tilan 3 vaiheiseen oikosulkuvirtaan. (Huotari & Partanen 1998, 7, 15, 26.)



Kuvio 11. Tasavirtatekijän  $m$  riippuvuus oikosulkuvirran sysäyskertoimesta sekä oikosulun kestoajasta (Huotari & Partanen 1998, 30)



Kuvio 12. Vaihtovirtatekijän  $n$  riippuvuus oikosulkuvirran alkuarvon  $I_k''$  ja pysyvän arvon  $I_k$  suhteesta (Huotari & Partanen 1998, 30)

### 6.1.3 Laskeminen ominaisoikosulkutehoilla

Ominaisoikosulkutehojen avulla oikosulkuvirtoja voidaan likimääräisesti arvioida nopeasti ja yksinkertaisesti. Oikosulkuteho on laskennallinen suure, jossa täysi oikosulkuvirta ja nimellisjännite vaikuttavat samaan aikaan. Ominaisoikosulkuteho puolestaan kuvaa sitä oikosulkutehoa, joka esiintyisi kyseisen komponentin jälkeen, elleivät muut virtapiirin osat rajoittaisi sitä. Yleensä määritetään alkuoikosulkuvirta  $I_k''$ , jolloin huomioon otetaan vain reaktanssit. Tästä syntyvä epätarkkuus lisää mitoituksen varmuutta. Resistanssien pois jättäminen merkitsee sitä, ettei sysäyskerrointa voida määrittää tarkasti, vaan se arvioidaan tärkeimpien komponenttien R/X-suhteiden perusteella. (Hietalahti 2013, 270.)

Muuntajan ja generaattorin oikosulkuteho saadaan kaavalla (29):

$$S_k = \frac{U_n^2}{Z_k} = \frac{S_N}{z_k} \sim \frac{S_N}{z_d} \quad (29)$$

missä

$S_k$	on	ominaisoikosulkuteho
$U_N$	on	nimellispääjännite (johdolla pääjännite normaalikäytössä)
$Z_k$	on	komponentin oikosulkuimpedanssi ohmeina vaihetta kohti
$S_n$	on	komponentin nimellisteho
$z_k$	on	suhteellinen arvo oikosulkuimpedanssilla (generaattoreilla tahtireaktanssin $Z_d$ suhteellinen arvo) (ABB 2000b, 10).

Rinnan kytkettyjen ominaisoikosulkutehojen kokonaisoikosulkuteho saadaan määritettyä komponenttien ominaisoikosulkutehojen avulla kaavalla (30) (ABB 2000b, 10).

$$\sum S_k = S_{k1} + S_{k2} + S_{k3} + \dots + S_{kn}. \quad (30)$$

Sarjaan kytkettyjen ominaisoikosulkutehojen kokonaisoikosulkuteho saadaan komponenttien ominaisoikosulkutehosta puolestaan kaavalla (31) (ABB 2000b, 10).

$$\sum S_k = \frac{1}{\frac{1}{S_{k1}} + \frac{1}{S_{k2}} + \dots + \frac{1}{S_{kn}}}. \quad (31)$$

Oikosulkuvirta saadaan ominaisoikosulkutehosta taas kaavalla (32) (Hietalahti 2013, 270).

$$I_k = \frac{c \cdot S_k}{\sqrt{3} \cdot U_N}. \quad (32)$$

#### 6.1.4 Kiskostot ja kaapelit

Verkostovaikutusten laskemista varten tarvitaan tiedot käytetyistä virtalähteistä ja rakenneratkaisuista. Käytännön suunnittelutyössä kaapeleiden resistanssi- ja reaktanssiarvot saadaan yleensä valmistajilta. Jos näitä tietoja ei ole saatavilla, kaapeleiden resistanssit voidaan laskea myös kaavalla (33). (Hietalahti 2013, 260.) Kaapeleiden reaktanssit saadaan laskettua kaavalla (2).

$$R_j = \frac{\rho}{q} \cdot l \quad (33)$$

missä

$R_j$  on johtimen resistanssi

$q$  on johtimen pinta-ala ( $mm^2$ )

$l$  on johtimen pituus ( $m$ )

$\rho$  on johtimen ominaisresistanssi, jonka lukuarvo tulee seuraavasti eri johdintyypeille:

- $1/54 \Omega mm^2/m$  kuparijohtimille,
- $1/34 \Omega mm^2/m$  alumiinijohtimille ja
- $1/31 \Omega mm^2/m$  alumiiniseoksille.

Kiskostoille taas voidaan yleisesti käyttää reaktanssia  $0.15 m\Omega/m$ . (Hietalahti 2013, 260.)

Kun kuormitusvirta  $I$  kulkee johtimessa, sen impedanssi aiheuttaa jännitteen aleneman. Tämän vuoksi jännite on johdon loppupäässä pienempi kuin sen alkupäässä. Jännitteenalenema määritellään näiden jännitteiden erotuksena, ja

sillä on suuri merkitys sähköverkkojen mitoituksessa. Usein jännitteenalenema esitetään prosentteina nimellisjännitteestä. (Korpinen 1998c.)

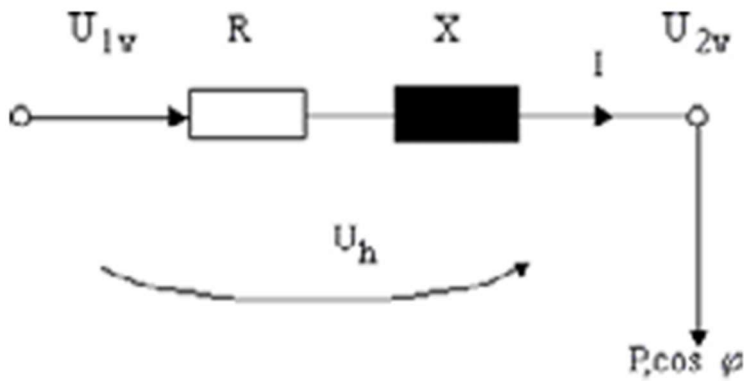
Kuvion 13 mukaisessa tilanteessa johdon loppupäähän on kytketty kuorma, jonka pätöteho on  $P$  ja tehokerroin  $\cos\varphi$ . Käytännön laskentaa varten jännitteenalenema voidaan arvioida likimääräisesti riittävän tarkasti kaavalla (34). (Korpinen 1998c.)

$$U_h = \sqrt{3} \cdot I \cdot (R \cos\varphi + X \sin\varphi) \text{ tai } \sqrt{3} \cdot (I_P R + X I_Q) \quad (34)$$

missä

$I_P$  on kuormitusvirran pätökomponentti

$I_Q$  on kuormitusvirran loiskikomponentti (Korpinen 1998c).



Kuvio 13. Johdon jännitteenaleneman laskeminen (Korpinen 1998c)

## 7 KOJEISTOT

Kojeistolla (switchgear) tarkoitetaan kokonaisuutta, joka sisältää kytkentä-, suojaus-, ohjaus- ja valvontalaitteet. Kojeistot jaetaan suur-, keski- ja pienjännitekojeistoihin. (Elovaara & Haarla 2011a, 117.)

### 7.1 $SF_6$ eristeaineena

Rikkiheksafluoridi eli toisin sanoen  $SF_6$  on hyvin yleisesti tekniikassa käytetty kaasumainen eristysaine. Sen käyttö koteloituissa GIS (Gas Insulated Switchgear) kytkinlaitoksissa on erinomainen eristysominaisuuksiensa ansiosta, jolloin laitokset voidaan rakentaa erittäin pienikokoisiksi. Sen hyvät sähkönlujuusominaisuudet perustuvat siihen, että molekyylinä  $SF_6$  on raskas ja sillä on kyky sitoa vapaita elektroneja, jotka ovat välttämättömiä läpilyönnin kannalta. Tätä ominaisuutta kutsutaan elektronegatiivisuudeksi. (Aura & Tonteri 1993, 208.)

Samassa paineessa verrattuna ilmaan  $SF_6$  kaasulla jännitelujuus on noin 2,5-kertainen. Normaalisissa tilanteissa paine pidetään normaalipainetta korkeampana ja tämän ansiosta jännitelujuus parantuu. Käytännössä paineen vaihtelu on 0,15–0,6 MPa välillä.  $SF_6$  kaasun käyttöä alhaisissa lämpötiloissa vaikeuttaa sen nesteytyminen lämpötiloissa, joita Suomen talviolosuhteissa voi esiintyä. Jos elektrodivälin eristeaineena toimiva kaasu nesteytyy, menettää elektrodiväli sähkönlujuuden, jolloin syntyy läpilyönti ja laitteisto tuhoutuu. Täytyy siis huolehtia siitä että, lämpötila ja paine  $SF_6$  kaasulla pysyy sallituissa rajoissa. (Aura & Tonteri 1993, 208.)

$SF_6$ -kaasu lämmittää ilmastoa jopa 23 500 kertaa enemmän kuin hiilidioksidi ja on tällöin ilmastolle haitallinen aine. Tämän takia EU kieltää  $SF_6$ -kaasun käytön sähkökojeistoissa täysin vuoteen 2031 mennessä. Keski-jännitteisiä laitteita koskeva kieltö tulee voimaan jo aiemmin ja vuodesta 2026 alkaen uudet keski-jännitekojeistot on toteutettava ensisijaisesti ilman  $SF_6$ -kaasua (Schneider 2024). Vanhat käytössä olevat kojeistot voidaan kuitenkin käyttää loppuun ennen uusien  $SF_6$  vapaiden kojeistojen asentamista.

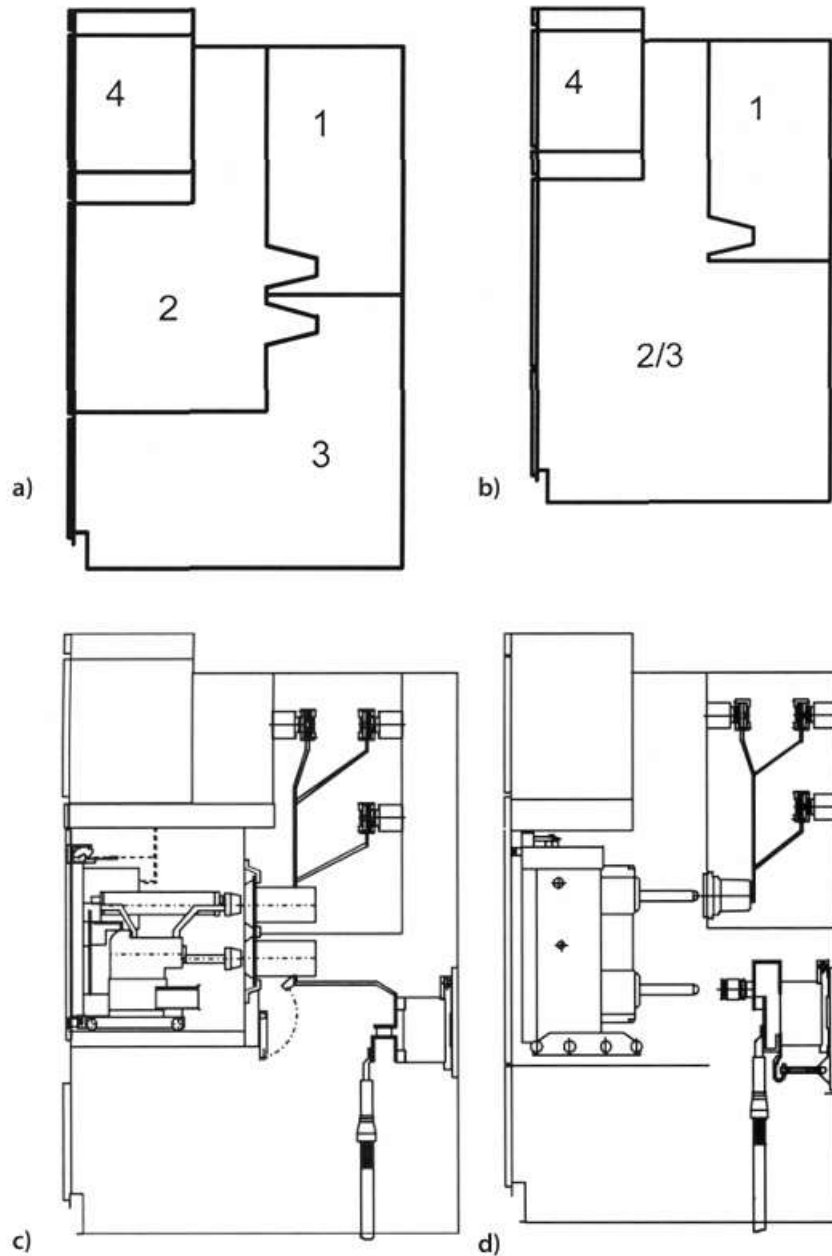
## 7.2 Keskijännitekojeistot

Kojeistot jaotellaan ulkokuoren materiaalin mukaan metallikuorisiin (metal-enclosed) sekä eristysainekuorisiin (insulation enclosed) kojeistoihin, joista metallikuoriset ovat yleisimmin käytössä. Metallikuoriset kojeistot jaotellaan sisäisen osastoinnin ja sen toteutustavan perusteella kolmeen alaryhmään: metallikoteloituihin (metal-clad), tilakoteloituihin (compartmentmented) sekä kennokoteloituihin (cubicle) kojeistoihin. (Elovaara & Haarla 2011a, 121–122.)

Ensin mainituissa kahdessa tyypissä kokoojakiskot, katkaisija ja kussakin lähdössä olevat kojeet ovat omissa tiloissaan ja eroa näissä on että, metallikoteloituisissa kojeistossa tilojen välinen osastointi on toteutettu maadoitetulla metallilla, kun taas tilakoteloituisissa tämä on toteutettu osittain tai kokonaan eristysaineella. (Elovaara & Haarla 2011a, 121–122.)

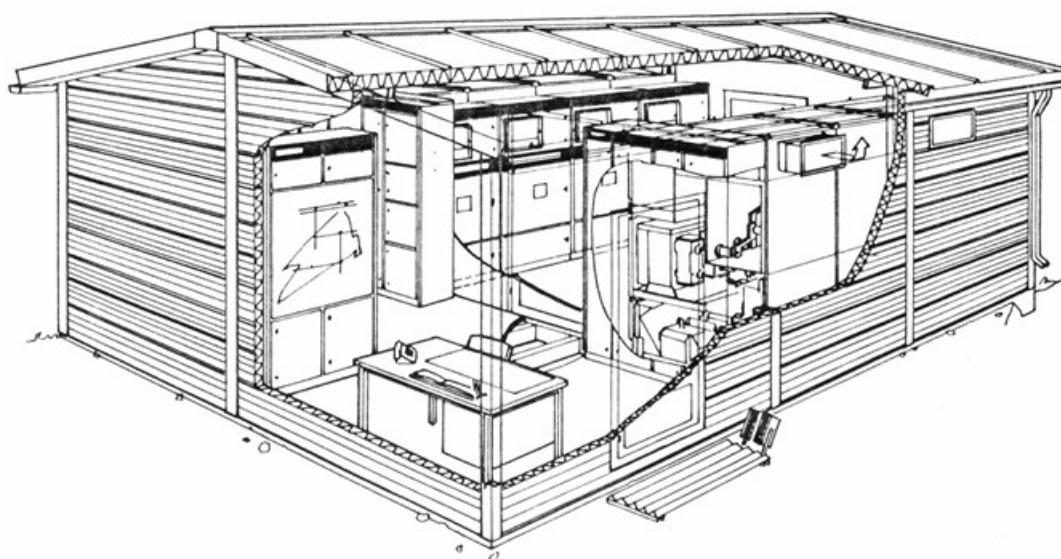
Kennokoteloituisissa rakenteissa on kojeiston kennojen väliseinät, mutta ei kennon sisäisiä väliseiniä, siten kokoojakiskot, katkaisijat, mittamuuntajat ja kaapelipäätteet ovat samassa tilassa. Kokoomakiskotila itsessään voi olla koteloimaton tai koteloitu sekä kisko voi olla rakennettu tukieristimille. Läpivientieristimet sijaitsevat kennojen välillä. (Elovaara & Haarla 2011a, 121–122.)

Kojeiston eristysaineena pääasiallisesti voi olla normaalipaineinen ilma (ilmaeristeinen kojeisto) tai eristyskaasu (kaasueristeinen kojeisto). Kojeistot voidaan jakaa kalustustavan perusteella ulosvedettävillä (withdrawable) kojeilla varustettuihin (vaunukojeistoihin) tai kiinteällä kalustuksella varustettuihin kojeistoihin. Kuviossa 14 on esimerkki kahdesta vaunukojeistosta, jossa vaunukatkaisijakenno on kojeiston vasemman laidan keskiosassa, ja sen yläpuolella sijaitsee toisiokojetila. Toisiokojetilan oikealla puolella on kokoojakiskotila ja sen alla lähtötila. Lähtötilassa sijaitsee virtamuuntaja kiinnitettynä kennon takaseinään, ja liittyminen ulkopuoliseen verkkoon toteutetaan kaapelilla. (Elovaara & Haarla 2011a, 122.)



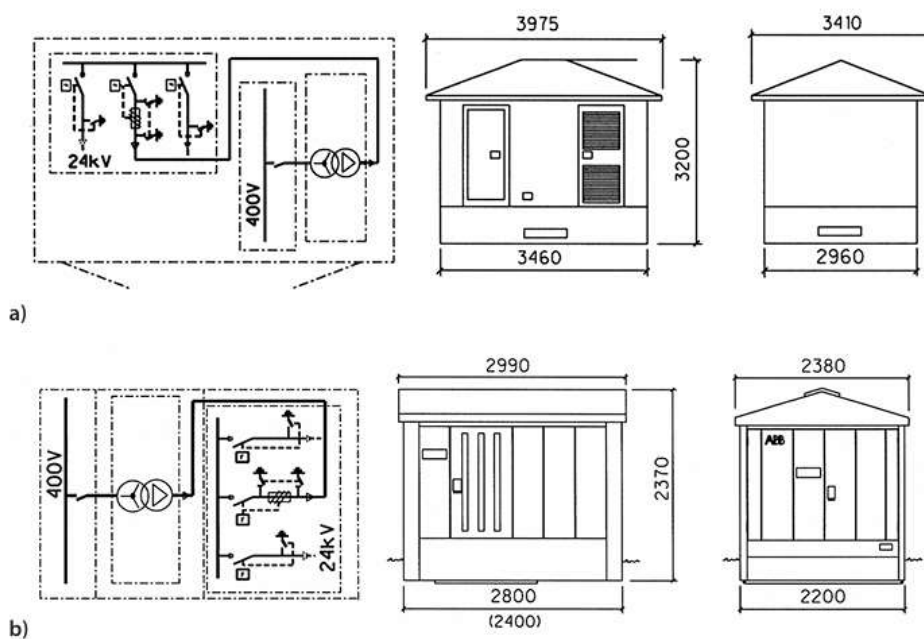
Kuvio 14. Jakeluverkon sisäkytkinlaitosten kojeistotyypppejä, joissa vaunukatkaisijat, jossa a) metalli- tai tilakoteloitu kojeisto, b) kennokoteloitu kojeisto, c) metallikoteloitu katkaisijakenno ja d) kennokoteloitu katkaisijakenno. 1 kokooja, 2 katkaisija, 3 lähtö ja 4 toisiokojetila (Elovaara & Haarla 2011a, 121)

Koteloitu ulkokojeisto on käytännöllinen vaihtoehto, kun apulaitteet, kuten ohjaus, asennonosoitus ja mittaus ym. vievät vähän tilaa ja ne voivat olla kojeiston yhteydessä. Tällaisia kojeistoja käytetään tavallisesti 10–30 kV:n jännitteillä. Kuviossa 15 on esitettyä 24 kV:n koteloidun ulkokojeiston rakenne. (Elovaara & Haarla 2011a, 122.)



Kuvio 15. Koteloitu ulkokojeisto (Elovaara & Haarla 2011a, 123)

Äärimmilleen pelkistetystä ulkokojeistosta esimerkkinä on 12–24 kV:n maakaapeliverkkojen muuntamoksi tarkoitettu puistomuuntamo (kuvio 16). Tehtaalla kokonaisuuteen on asennettuna kytkinlaitteiden lisäksi myös jakelumuuntaja. Kytkinlaitteina voidaan käyttää  $SF_6$ - tai tyhjiökatkaisijaa, kuormanerotinta tai varokekuormanerotinta. (Elovaara & Haarla 2011a, 122.)



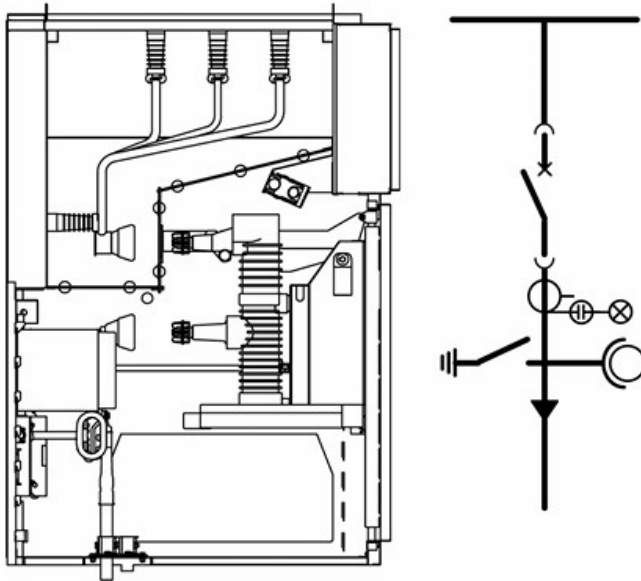
Kuvio 16. Erilaisia puistomuuntamo rakenteita (Elovaara & Haarla 2011a, 123)

Jakeluverkkoa syöttävillä sähköasemilla sekä voimalaitosten ja teollisuuslaitosten sähköasemilla toteutetaan keskijännitteiset kytkinlaitokset yleensä järeinä katkaisijakojeistoina, kun taas jakeluverkkojen muuntamoilla käytetään kuormanerotinkojeistoja. Katkaisijakojeistoissa käytetään yleisesti vaunukatkaisijakenoja kiintein maadoituserottimin ja kuormanerotinkojeistojen erottimet ovat tavallisesti kiinteästi asennettuja. (Elovaara & Haarla 2011a, 124.)

Kasettikojeistot, joissa kytkinlaitteet ovat kaseteissa, johtaa jokaisesta kojetilasta oma valokaaripaineen purkauskanava ulkotilaan. Metalliosastoidussa tai tilakoteloiduissa kojeistoissa kasetti voidaan vaihtaa siirtovaunulla, ja kasetin alle jäävää tilaa voidaan hyödyntää kalustukseen. Kaikkien kytkentätoimenpiteiden edellytys on suljettu ovi. (Elovaara & Haarla 2011a, 125.)

Yhteydet kokoojakisko- ja kaapelitiloihin on toteutettu siten, että kasettia ulos vedettäessä esimerkiksi automaattisesti toimivat sulkulevyt sulkeutuvat ja tulevat työskentelysuojiksi. Työmaadoituserotin pystyy sulkeutumaan vaurioitta eli kestää mitoitusvirran. Kuviossa 17 on esitelty kasettikojeistoratkaisu, jossa kennon yläosan kiskotila kulkee koko kojeiston läpi ja sen saa auki vain työkaluin. Kisko ja kaapelitilan välinen alue muusta tilasta erotettu epoksihartsikuorella, joka on kaasulla täytetty ja jota ei saa avata, sisältäen myös kuormanerottimen sähköiset osat. (Elovaara & Haarla 2011a, 125.)

Kennon tilasta noin 75 % on varattuna kaapeliliitännöille, sulakkeille, maadoituskytkimille tai mittamuuntajille, tilaa kutsutaan myös kaapelitilaksi, jossa katkaisijakin sijaitsee. Kennossa kuormanerotinta käytettäessä, lukitusjärjestelmä varmistaa, että kennon avaus ei onnistu ennen kuin kennon alaosa on jännitteetön ja maadoitettu. Kaapelitila on tällä tavalla lukituslaittein valvottua tilaa. Toisiokojeen tila voidaan käyttää kuormanerottimen ja maadoituskytkimen ohjausmekanismeille, asennonosoittimille, mekaanisille lukituslaitteille, apukoskettimille, laukaisukeloille, jännitteen ilmaisimille sekä releille. Valokaaripaine suunnataan kojeiston takaosaan kennon takalevyssä sijaitsevien purkausluukkujen kautta ja näitä on erikseen kiskotilaa, kuormanerotinta sekä katkaisija- ja kaapelitilaa varten (Elovaara & Haarla 2011a, 125–126.)



Kuvio 17. Keskijännitekojeiston Uniswitch poikkileikkaus, jossa vaunukatkaisija sekä pääkaavio (Elovaara & Haarla 2011a, 126)

$SF_6$ -eristeisten keskijännitekojeistojen etuna on pienempi tilantarve, mutta erot keskijännitteillä eivät ole yhtä merkittäviä kuin suurjännitteillä. Esimerkkinä yksikiskojärjestelmässä  $SF_6$ -eristeisen ratkaisun tuoma tilansäästö huonekorkeudessa ja leveydessä on vähäinen verrattuna ilmaeristeiseen laitokseen, kun taas kaksoiskiskojärjestelmässä huonetilan leveys voi olla noin metrin kapeampi. Keskijännite GIS säästää noin 30–70 % kojeiston pituudessa. Niin kutsutut muuntamokojeistot vaativat  $SF_6$ -eristeisillä ratkaisuilla pituussuunnassa noin kolmasosan ja korkeussuunnassa noin puolet vähemmän tilaa, jos verrataan normaaliin ilmaeristeiseen laitokseen. (Elovaara & Haarla 2011a, 126.)

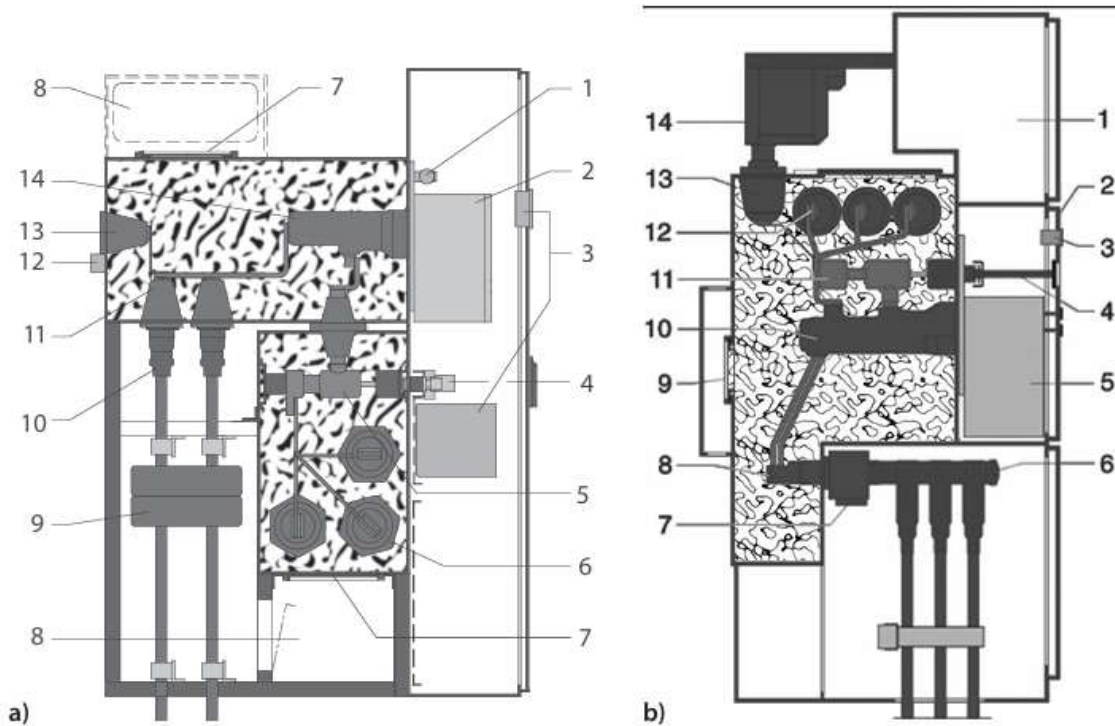
### 7.3 Keskijännite GIS-rakenne

Keskijänniteverkkojen GIS-laitoksiin kuuluvat katkaisijakytkinlaitokset, kuormanerotimilla varustetut kytkinlaitoskennot sekä ilmaeristeisiä kuormanerotinkojeistoja korvaavat muuntamokojeistot eli niin sanotut RMU-kojeistot (ring main unit). Kaikki nämä laitteet on suunniteltu kaapeliliityntään. (Elovaara & Haarla 2011a, 136.)

Katkaisijakytkinlaitoksissa kokoojakiskoilla ja katkaisijoilla on tyypillisesti oma kaasutila, joissa ylipaine on 0,12–0,15 MPa (1,2-1,5 bar). Kiskot voivat valmistajasta riippuen olla joko yksi- tai kolmivaiheisesti koteloituja, ja katkaisijat voivat olla  $SF_6$ - tai tyhjiökatkaisijoita. Koko keskijännitealue toteutetaan yhdellä rakenteella, jolloin vain kaasun painetta nostamalla saavutetaan helposti eri jännitetasojen jännitelujuusominaisuudet. (Elovaara & Haarla 2011a, 136.)

Kojeistoja on kehitetty siten että, ne ovat helposti laajennettavissa ilman käyttökatkoksia verrattuna suurjännite GIS laitoksiin. Keskijännite-GIS-laitoksissa jopa yhden kiskon lisäys voi olla mahdollista ilman täydellistä katkosta. Tyypillistä on myös kolmiasentoinen (kiinni, auki, maadoitettu) käsin- tai moottorihjattu erotin kokoojakiskon ja katkaisijan välillä, työmaadoittaminen katkaisijan kautta sekä jännitteen indikointi työmaadoittimeen. Virtamittaukset suoritetaan yleensä ulkoisilla rengasvirtamuuntajilla ja jännitteen mittaus magneettisilla tai kapasitiivisilla jännitemuuntajilla sekä testauksen helpottamiseksi mittamuuntajien toisionavat sijoitetaan kaasutilan ulkopuolelle. (Elovaara & Haarla 2011a, 136–137.)

Kuviossa 18 on esimerkki eräänlaisesta GIS laitoksen poikkileikkauksesta, jossa 12–40 kV:n  $SF_6$  eristeteisissä kytkinlaitoksissa, kuten ABB ZX0-ZX2 kytkinlaitoksissa, tilaa on säästetty  $SF_6$  täytteisellä osastoinnilla (kuvioitu osa). Lisäksi asennusnopeutta ja muunneltavuutta on parannettu tehdasvalmisteisilla, paikalleen työnnettävillä osilla. Mittaustekniikassa hyödynnetään kuituoptiikkaa, aaltoputkia ja ei-konventionaalisia antureita. Nimellisvirrat ovat 630–2500 A ja vikavirtakestoisuus 25–40 kA ja kytkinlaitoselementit saadaan laajennettua myös kaksikiskojärjestelmiin. (Elovaara & Haarla 2011a, 137.)



Kuvio 18.  $SF_6$  eristeisiä kytkinlaitoksia (Elovaara & Haarla 2011a, 137)

Kuvassa vasemmalla a) ZX1.2 1250 A, jossa 1) tiheys sensori, 2) katkaisijan ohjain, 3) monitoiminen suojaus/ohjausyksikkö, 4) kolmiasentoinen erottimen ohjain, 5) kolmiasentoinen erotin, 6) kokoojakisko, 7) paineenpurkauslevy, 8) paineenpurkauskanava, 9) rengasvirtamuuntaja, 10) kaapelin tulppapäätte, 11) kaapelipäätteen vastakappale, 12) jännitteen indikointiliitin (kapasitiivinen), 13) testauspistoke, 14) katkaisija. Oikealla puolella b) ZX0 1250 A, jossa 1) poistettavissa oleva toisiolaitekenno, 2) mekaaniset toiminnot, 3) jännitteen indikointiliittimet (kapasitiivinen), 4) kolmiasentoinen erottimen ohjain, 5) katkaisijan ohjain, 6) kaapelien liittospaikat, 7) rengasvirtamuuntaja, 8) läpivientieristin, 9) paineenpurkauslevy, 10) tyhjiökatkaisija, 11) kolmiasentoinen erotin, 12) kokoomakisko läpivientieristimiseen, 13) vastakappale lisävarusteena saatavalle jännitemuuntajan liittimille, 14) paikalleen työnnettävä jännitemuuntaja (lisävaruste). (Elovaara & Haarla 2011a, 137.)

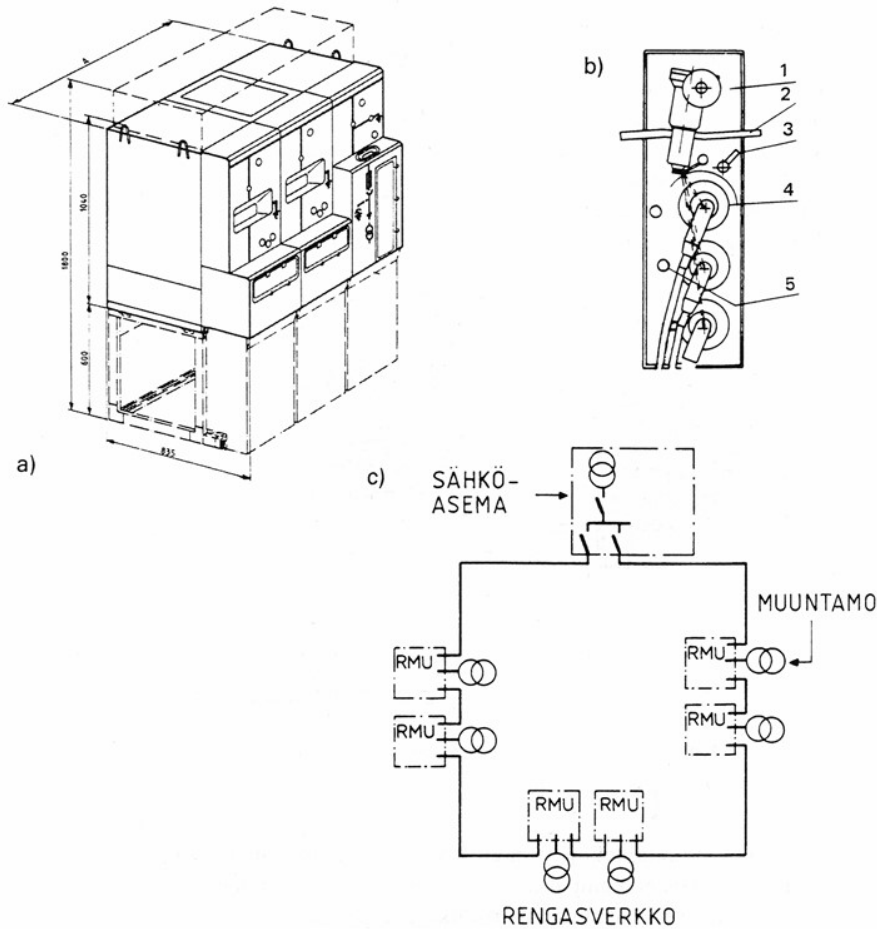
Pienempiä kuormituksia varten on kehitetty ratkaisuja, joissa riittää kytkinlaitteeksi tyhjiökatkaisija tai kuormanerotin. Kuormanerotin on myös kolmiasentoinen ja  $SF_6$  kaasutilaan suljettu, täyttäen samat tekniset vaatimukset kuin vastaavanlainen ulos asennettava ilmaeristeinen kuormanerotin. Jännite

indikointi voidaan toteuttaa kaapelipääteeseen sijoitettavan kapasitiivisen jännitteenjakajan avulla ja sillä voidaan varmistaa ennen maadoittamista, että kaapelit ovat varmasti irti verkosta. Kaapeleiden työmaadoitus suoritetaan katkaisijoiden avulla. (Elovaara & Haarla 2011a, 138.)

$SF_6$  eristeisten RMU kojeistojen eli niin kutsuttujen muuntamokojeistojen kehitys sai alkunsa valumuovieristeisten kompaktimuuntamoiden vuotovirtaongelmista. RMU on tarkoitettu silmukoidusti kaapeloidun keskijänniteverkon kuormanerotinkojeistoksi, jossa on T-haaraliitäntä mahdollisuus muuntajan silmukkaan liittämiseen ja sen erottamiseen molempiin syöttösuuntiin (kuvio 19). Kojeeistoilla mitoitusvirta on yleensä 630 A ja oikosulkukestoisuus 50 kA. RMU-kojeistoilla on kaksi perusrakennetta:

- Järjestelmät, joissa on yhteisen kuoren sisältämä yhteinen kaasutila, jonka sisällä on ennalta määrätysti kaapelilähtöjä.
- Vierekkäin asennetut itsenäiset kennot, joiden lukumäärää voidaan myöhemmin muuttaa. (Elovaara & Haarla 2011a, 138.)

Sijituspaikat RMU-kojeistoilla ovat kiinteistömuuntamoissa sisätiloissa ja puistomuuntamoissa ulkotiloissa. Rakenteessa kuormanerotin ja maadoitusveitset sijaitsevat samassa 200–300 litraisessa, teräslevystä valmistetussa kaasutilassa, jossa on jäännöskosteus ja  $SF_6$  hajoamistuotteet sitova suodatin. Kaasutilan kytkinlaitteita ei pysty huoltamaan, minkä takia niiden toimintavarmuus täytyy olla erinomainen. Kaapelipääte- ja varoketiloihin olevat liittynät ovat kaasutiiviillä läpivienneillä toteutettuja. Varokkeet on toteutettu ilmaeristeisinä yksivaiheisissa koteloissa tai kouruissa siten, että vaiheiden välinen vuotovirtamahdollisuus on poistettu. Maadoitetussa tai kosketussuojaisessa lähdössä varokkeet voidaan vaihtaa käsin tai varokepihtejä käyttäen. Joissakin ratkaisuissa, joissa koko varokekuormanerotin on korvattu pienikokoisella tyhjiö tai  $SF_6$ -katkaisijalla, esimerkiksi muuntajan suojaustarpeen vuoksi. (Elovaara & Haarla 2011a, 138.)



Kuvio 19. RMU kojeisto esimerkki, jossa a) RMU muuntamokojeisto, b) sulakekennon poikkileikkaus, jossa 1) kuormanerotin, 2) kokoojakisko, 3) maadoitin, 4) sulakekotelo kaapeliliityntöineen, 5) työmaadoitusliittimet ja c) RMU:n silmukoitu käyttö (Elovaara & Haarla 2011a, 139)

Kaasutilassa kaasun ylipaine on ainoastaan 20–50 kPa (0,2-0,5 bar), joka on riittävän alhainen estämään sen nesteytymisen  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötilassakin. Perusversio  $SF_6$  muuntamokojeistoissa voi olla esimerkiksi kahteen kaapelilähtöön ja yhteen muuntajaan liitettävissä eli siinä on kaksi kuormanerotinta ja yksi varokekuormanerotin. (Elovaara & Haarla 2011a, 138–139.)

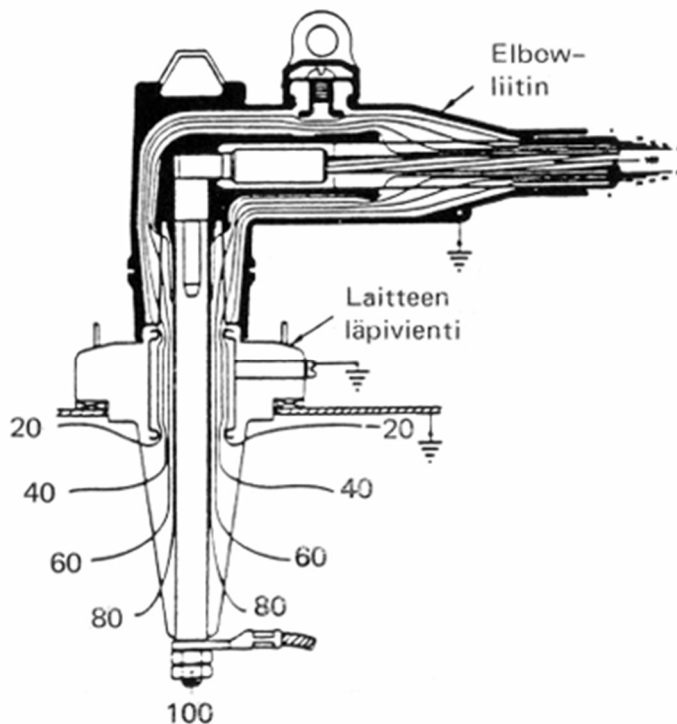
Kaikissa kaapeli- ja muuntajalähdöissä on oikosulun kytkemiseen kykenevät maadoituserottimet sekä muuntajalähdön maaveitset ovat varokkeiden molemmin puolin. Erottimien ohjaimet toimivat ohjaajasta riippumattomasti siten, että kytkentä- ja katkaisutoiminnot tapahtuvat vakionopeudella. Varokekuormanerottimessa on oltava kaksi laukaisujousta, joista auki-

ohjausjousi viritetään ennen kiinni-ohjausta, tällä tavalla varaudutaan vikaa vasten tapahtuvaan virheelliseen kiinniohjaukseen. (Elovaara & Haarla 2011a, 139.)

#### 7.4 Keskijännite GIS-liitynnät

Varsinaiseen keskijännite-GIS-kojeistoon voidaan liittyä joko tavallisella kaapelipääteellä tai paljaalla kiskolla. Tällöin kojeisto varustetaan erillisellä liityntäkappaleella, jolla parannetaan eristystä ja kosketussuojausta. Lisäksi käytetään myös pistokeliityntöjä ja suuria virtoja varten liitynnät toteutetaan eristetyllä kiskolla tai  $SF_6$ -putkella. Kojeistoon liittyminen tapahtuu yleensä joko alta kaapelitilasta tai kojeiston takapuolelta. (Elovaara & Haarla 2011a, 140.)

Muuntamokojeistoissa pistoketyyppiset kaapeliliitynnät ovat yleisiä. Esimerkkinä tästä kuviossa 20 on niin sanottu Elbow-pääte, joka on toteutettu metallivaipalla kosketussuojaiseksi. Pistokepäätteet on alun perin kehitetty PEX-eristeisille kaapeleille, mutta nykyisin niitä voidaan käyttää myös paperieristeisillä kaapeleilla. (Elovaara & Haarla 2011a, 140.)



Kuvio 20. Muuntajakojeiston (RMU) pistokemallinen Elbow-kaapelipääte (Elovaara & Haarla 2011a, 140)

## 7.5 Pienjännitekojeistot

Pienjännitteiset jakokeskukset jaetaan rakenteensa perusteella avoimiin ja koteloituihin keskuksiin. Koteloidut keskukset luokitellaan edelleen koteloinnin toteutuksen perustella IP-luokkiin (internal protection). IP-luokka esitetään kaksinumeroisena lukuna, jossa ensimmäisellä numerolla kuvataan vaarallisten osien kosketussuojausta sekä kojeiston suojausta vierailta esineiltä ja pölyltä. Toisella numerolla ilmaistaan, kuinka hyvin veden tunkeutuminen on kojeistoon estetty ja numeron suurenemisella kuvataan suojauksen tehostumista. (Elovaara & Haarla 2011a, 126–127.)

Luokittelu kosketussuojauksessa ei kuitenkaan ole riittävä ja sitä varten tehokkuus suositellaan ilmaistavaksi IP-tunnuksen jälkeen olevilla lisäkirjaimilla esimerkiksi (IP 20 C). Näistä voidaan tehdä vielä ero kosketussuojaisten ja kosteussuojattujen keskusten ja kojeiden välillä. (Elovaara & Haarla 2011a, 127.)

Kosketussuojainen keskus on rakennettu siten, että paljaita jännitteisiä osia pääsee koskemaan vain irrottamalla peitelevy tai vastaava suojus. Tällainen keskus on sijoitettava kuivaan ja palovaarattomaan tilaan. Kosketussuojaisia keskuksia käytetään yleensä asuin- ja liiketiloissa ja osin teollisuudessa, kun mekaanisen vaurioitumisen riski on vähäinen. Tavallisesti ne kiinnitetään suoraan seinälle kiinnitysulokkeistaan tai sidekiskoistaan. Pienet ryhmäkeskukset voidaan upottaa seinärakenteeseen ja myös siirrettävät pistotulppaliitännäiset keskukset luokitellaan kosketussuojaisiksi keskuksiksi. Käytön aikana käsiteltävät osat, kuten painonapit, tulppavarokkeiden suojakannet ja kytkimien käyttölaitteet, on tuotu keskuksen kannen ulkopuolelle. (Elovaara & Haarla 2011a, 127.)

Kosteussuojatut jakokeskukset on tarkoitettu teollisuuden moottori, voima sekä valaistuskäyttöön ja ne soveltuvat myös ulkokäyttöön sekä muutenkin huonoihin ympäristöolosuhteisiin. Roiskevedenpitäviä keskuksia voidaan käyttää sekä kuivissa että kosteissa tiloissa ja yleensä myös tiloissa, joissa esiintyy märkiä tai syövyttäviä aineita. Poikkeuksena ovat käyttötilat, joissa keskus on jatkuvasti tai pitkään alltiina syövyttävälle kaasulle, palaville nesteille tai roiskevedelle. Roiskevedenpitävien keskusten lisäksi valmistetaan erikoiskäyttöön

tippuvedenpitäviä tai täysin vedenpitäviä jakokeskuksia. Kosteussuojatut keskukset eroavat rakenteeltaan kosketussuojatuista keskuksista siten, että ne muodostuvat yleensä erillisistä koteloista ja kennoista. (Elovaara & Haarla 2011a, 127.)

## 8 MITTAMUUNTAJAT JA RELESUOJAUS

Mittamuuntajia, kuten virta sekä jännitemuuntajia käytetään mittaus ja suojaustekniikassa muuntamaan primääripiirin jännite ja virtasuureet toisiokojeille eli releille sopivaan arvoon, jolloin mitta-ala laajennetaan. Niitä tarvitaan, koska suurten virtojen ja jännitteiden mittaaminen suoraan mittareilla ja releillä olisi teknisesti vaikeaa. (Korpinen 1998a.)

### 8.1 Virtamuuntajat

Virtamuuntajan tehtävänä on muuntaa piirin virta kyseessä olevan piirin suojauksessa, valvonnassa ja mittauksessa käytettäville pienjännitteisille releille ja mittareille sopivaksi sekä eristää ensiö- ja toisiopiirit toisistaan (ABB 2000d, 1).

Virtamuuntajien teknillisiä arvoja ovat esimerkiksi:

- terminen mitoitusvirta
- dynaaminen mitoitusvirta
- mitoitusensiövirta  $I_{pn}$
- mitoitustoisiovirta  $I_{sn}$
- mitoitustaakka (ABB 2000d, 1).

Terminen mitoitusvirta  $I_{th}$  on suurin ensiövirta, jonka virtamuuntaja kestää yhden sekunnin ajan ilman termistä vaurioitumista, kun toisiokäämit ovat oikosuljettuina. Dynaaminen mitoitusvirta  $I_{dyn}$  kertoo, kuinka suuren ensiövirran voimat virtamuuntaja kestää ilman vaurioita, kun toisiokäämit ovat oikosuljettuina. (ABB 2000d, 1.)

Mitoitusensiövirta  $I_{pn}$  minkä standardoidut nimellisarvot ovat:

$$\underline{10} - 12,5 - \underline{15} - \underline{20} - 25 - \underline{30} - 40 - \underline{50} - 60 - \underline{75} A,$$

sekä näiden kymmenpotenssikerrannaiset sekä osat ja suositellut arvot on alleviivattu. Lisäksi ne voivat olla vaihtokytkettäviä kahdelle ensiövirralle,

esimerkiksi merkintä 50-100 A. Mitoitustoisiovirran standardiarvot ovat 1 A, 2 A ja 5 A, joista suositeltuina pidetään 1 A ja 5 A. (ABB 2000d, 1.)

Mitoitustaakka kuvaa suurinta kuormitusimpedanssia, jolla virtamuuntaja on kuormitettavissa kyseessä olevassa tarkkuusluokassa. Nimellistaakka ilmoitetaan yleensä tehona (VA), joka saadaan kertomalla mitoitustaakka nimellistoisiovirran neliöllä. Standardiarvot ovat 2, 5, 10, 15 ja 30 VA, ja suurempia tehoja käytetään tarpeen mukaan. (ABB 2000d, 1.)

Virtamuuntajassa voi olla yksi tai useampia sydämiä. Usean sydämen rakenteessa niillä on yhteinen ensiökäämi, mutta jokaisella sydämellä on oma toisiokääminsä. Mittaustarkoituksiin käytettävää sydäntä kutsutaan mittaussydämeksi ja suojaukseen tarkoitettua suojaussydämeksi. (ABB 2000d, 2.)

## 8.2 Jännitemuuntajat

Jännitemuuntajien tehtävänä on muuntaa ensiöpiirin jännite toisiokojeille sopivaan arvoon sekä eristää ensiö- ja toisiopiiri toisistaan (ABB 2000d, 7).

Jännitemuuntajien teknillisiä arvoja ovat esimerkiksi:

- mitoitusensiöjännite  $U_{pn}$
- mitoitustoisiojännite  $U_{sn}$
- mitoitustaakka (ABB 2000d, 7).

Mitoitusensiöjännite  $U_{pn}$  ilmoitetaan kytkentätavan mukaan. Kolmivaiheverkossa vaiheiden välille kytkettäessä mitoitusensiöjännite esitetään pääjännitteenä, esimerkiksi 20 000 V. Kun jännitemuuntaja kytketään vaiheen ja tähtipisteen tai tähtipisteen ja maan väliin, mitoitusensiöjännite ilmoitetaan vaihejännitteenä, esimerkiksi  $20\,000/\sqrt{3}$  V. (ABB 2000d, 7.)

Mitoitustoisiojännitteen  $U_{sn}$  standardiarvot on esitetty taulukossa 3. Suomessa suositellaan käytettäväksi taulukon alleviivattuja arvoja. (ABB 2000d, 8.)

Taulukko 3. Toisiojännitteen standardoidut arvot (ABB 2000d, 8)

	Ensiökäämi kytketty kahden vaiheen väliin tai verkon tähtipisteen ja maan väliin.	Ensiökäämi kytketty vaiheen ja maan väliin
Mittaus- ja suojauskäämeille	<u>100 V</u> , 110 V ja 200 V	<u>100 : <math>\sqrt{3}</math> V</u> , 110 : $\sqrt{3}$ ja 200 : $\sqrt{3}$ V
Avokolmiokäämille		<u>100 : 3 V</u> , 110 : 3 ja 200 : 3 V

Mitoitustaakka on suurin kuormituksen admittanssi, jolla jännitemuuntaja on kuormitettavissa kyseisessä tarkkuusluokassa. Käytännössä mitoitustaakka ilmoitetaan yleensä näennäistehona  $S$  [VA], joka saadaan kertomalla admittanssi mitoitustoisiojännitteen neliöllä. (ABB 2000d, 8.)

Mitoitustaakan standardiarvoja ovat:

10 – 15 – 25 – 30 – 50 – 75 – 150 – 200 – 300 – 400 – 500 VA,

joista suositelluimmat on korostettu (ABB 2000d, 8).

### 8.3 Relesuojaus

Sähköverkon vikatilanteiden varalta voimalaitokset sekä sähkö- ja kytkinasemat varustetaan katkaisijoilla, joiden avulla vioittunut verkon osa voidaan erottaa muusta verkosta. Katkaisijoiden ohjaus toteutetaan suojarelleillä, jotka valvovat verkon tilaa ja antavat vikatilanteessa, niihin aseteltujen arvojen ylittyessä, laukaisusignaalin tai hälytyksen. Relesuojauksia käytetään keskijänniteverkoissa ja sitä korkeammilla jännitetasoilla, kun taas pienjänniteverkkojen suojauksessa käytetään varokkeita ja varokeautomaatteja. (Korpinen 1998b.)

Relesuojaukselle asetettavat vaatimukset:

- Suojauksen tulee toimia selektiivisesti, jotta vikatilanteessa käytöstä poistuu mahdollisimman pieni osa verkkoa.
- Toiminnan on oltava riittävän nopeaa ja herkkää, jotta vaarat, vauriot ja häiriöt pysyvät kohtuullisina sekä verkon stabiilisuus säilyy.
- Suojauksen on katettava koko suojattava järjestelmä ilman katvealueita.
- Sen on oltava käyttövarma sekä mahdollisimman yksinkertainen.
- Sen on oltava kestävä.
- Suojauksen tulee olla koestettavissa käyttöpaikalla ja
- Sen on oltava hankintakustannuksiltaan kohtuullinen. (Korpinen 1998b.)

Vanhimmat releet ovat sähkömekaanisia sisältäen liikkuvia osia. Niiden toiminta perustuu esimerkiksi virran aiheuttamaan magneettikentän kasvuun, joka saa releen liikkumaan. Sähkömekaaniset releet ovat kestäviä, suurikokoisia ja hieman epätarkkoja, ja ne vaativat säännöllistä koestamista jäykistymisen estämiseksi. Vaikka ne voivat olla kookkaita, niiden toiminta on yksinkertaista ja havainnollista ja niitä käytetään edelleen. Nopeimmat sähkömekaaniset distanssireleet voivat toimia jopa 20 millisekunnissa. (Elovaara & Haarla 2011a, 344.)

Staattiset eli elektroniset releet otettiin käyttöön 1960-luvulla. Niissä ei ole liikkuvia mekaanisia osia, vaan ainoastaan puolijohdekomponentteja ja mikropiirejä. Ne mahdollistavat sähkömekaanisia releitä vaativammat suojaustoiminnot, ovat tarkempia ja niiden palautumisaika on nopeampi. Haittoina ovat herkkyyks ylijännitteille, jatkuva aputehon tarve sekä elektronisten osien vanheneminen, mikä edellyttää releiden korjausta tai vaihtoa. (Elovaara & Haarla 2011a, 344–345.)

Mikroprosessorireleet eli digitaaliset releet tulivat käyttöön 1980-luvun loppupuolella. Niissä suojaustoiminnot ovat huomattavasti monipuolisempia verrattuna muihin ja asettelumahdollisuuksia runsaasti, mikä mahdollistaa viritetyt suojausratkaisut. Asetteluihin voi kuitenkin tulla virheitä runsaiden vaihtoehtojen vuoksi, ja digitaalisilla releillä esiintyy enemmän virhelaukaisuja kuin muilla reletyypeillä,

mikä johtuu releiden monimutkaisuudesta ja tämän takia asettelujen sekä kytkentöjen tekeminen on vaikeaa. (Elovaara & Haarla 2011a, 345.)

#### 8.4 Reletyypit

Releet luokitellaan mitattavan suureen perusteella seitsemään pääryhmään: ylivirtareleet, ali- ja ylijännitereleet, taajuusreleet, suunta- ja tehoreleet, epäsymmetriareleet, vertoreleet sekä distanssireleet (Korpinen 1998b).

Ylivirtareleitä käytetään ylikuormitus- ja oikosulkusuojaukseen ja säteittäisten verkkojen oikosulkusuojaukseen toteutetaan tavallisesti ylivirtareleiden avulla. Ylivirtareleet voivat olla hetkellisiä, vakioaikaisia tai käänteisaikaisia. Muuntajien, generaattoreiden ja moottoreiden ylikuormitussuojauksessa käytetään muun muassa lämpöreleitä. (Korpinen 1998b.)

Alijännitereleitä käytetään suurten moottoreiden erottamiseen verkosta, kun alijännite uhkaa pysäyttää ne. Ylijännitereleitä puolestaan hyödynnetään maasulkusuojauksessa ja tahtigeneraattoreissa vaarallisen jännitteen nousun varalta. Taajuusreleitä käytetään sähköyhtiöiden kytkentäjärjestelmissä, joissa on omaa sähköntuotantoa ja ne toimivat verkon taajuuden poiketessa nimellisarvosta (50 Hz). (Korpinen 1998b.)

Suunta- ja tehoreleillä seurataan jännitteen tai virran hetkellisarvoja sekä niistä johdettuja tehoja. Suuntareleen tehtävä on osoittaa tehon virtaussuunta ja silmukoiduissa verkoissa käytetään ylivirta- ja oikosulkusuojaukseen suunnattuja ylivirtareleitä. Generaattorin ja sitä pyörittävän voimakoneen suojauksessa käytetään takatehorelettä, jolla estetään generaattorin toimiminen moottorina. Keskijänniteverkon maasulkusuojaukseen Suomessa toteutetaan pääosin maasulun suuntareleillä. (Korpinen 1998b.)

Epäsymmetriareleillä suojataan suuria koneita haitallisilta virta- ja jännite-epäsymmetrioilta. Vertoreleet vertailevat verkon eri osissa kulkevia virtoja tai tehoja ja niitä käytetään muuntajien, generaattoreiden, johtojen ja kiskostojen suojaukseen. Vertailukohteena voivat olla esimerkiksi itseisarvot, vaihekulmat tai

virtojen suunnat. Vertoreleistä tunnetuin on differentiaalirele, joka toimii mitattujen virtojen vertailun perusteella. (Korpinen 1998b.)

Distanssireleet mittaavat sijoituspaikkansa ja vikapaikan välistä impedanssia virtojen ja jännitteiden avulla. Impedanssimittauksen perusteella rele pystyy arvioimaan vikapaikan etäisyyden ja laukeaa kun mitattava impedanssi alittaa asetelluarvon. Mitattava impedanssi pienenee vikapaikan lähestyessä. Suomessa distanssireleitä käytetään siirtoverkon oikosulku- ja maasulkusuojauksessa. (Korpinen 1998b.)

Suurin osa avojohtoverkon vioista, kuten salamaniskujen aiheuttamat ohimenevät valokaariviat, poistuvat, kun johto tehdään jännitteettömäksi. Pitkien keskeytysten välttämiseksi suojareleet varustetaan jälleenkytkentäautomatiikalla, jossa rele avaa katkaisijan vian sattuessa ja sulkee sen asetellun jännitteettömän väliajan (0,2-0,5 s) jälkeen, mitä kutsutaan pikajälleenkytkennäksi (PJK). Jos vika ei poistu pikajälleenkytkennällä (PJK), rele avaa katkaisijan uudelleen ja sulkee sen pidemmän ajan (noin 0,5-3 min) kuluttua, mitä kutsutaan aikajälleenkytkennäksi (AJK). Jos vika ei korjaannu AJK:n avulla, suoritetaan lopullinen laukaisu, jolloin katkaisija pysyy auki vian korjaukseen saakka. (Korpinen 1998b.)

## 9 KATKAISIJAT

### 9.1 Katkaisijoiden ominaisuuksia

Katkaisijoilla tarkoitetaan kojeita, joita käytetään virtapiirin avaamiseen sekä sulkemiseen ja ne voi olla käsi tai automaattiohjattuja. Tavallisesti katkaisija toimii automaattisesti ja avautuu esimerkiksi ylivirran, kuten oikosulku- tai maasulkuvirran vaikutuksesta, jolloin avautumiskäskyn katkaisijalle antaa virtapiirin kytketty rele. Katkaisijan automaattinen sulkeutuminen uudestaan on mahdollista erityisen jälleenkytkentäreleistyksen ansiosta. Tyypillistä katkaisijalle on, että se on kykenevä rikkoutumatta avaamaan sekä sulkemaan oikosulkupiirin, tai sellaisen piirin, jossa virta on moninkertainen sen nimellisvirtaan verrattuna. (Elovaara & Laiho 1999, 245.)

Katkaisijan valintaan vaikuttavia asioita ovat:

- suurin käyttöjännite kuormituspiirissä, joka määrittää katkaisijan nimellisjännitteen  $U_N$
- jatkuva virta kuormituspiirissä, joka määrittää katkaisijan nimellisvirran  $I_N$
- oikosulkupiirissä tapahtuva suurin oikosulkuvirta
- kesto aika oikosulkuvirralla
- katkaisijan kytkentätiheys
- taajuus käyttöjännitteellä
- ympäristötekijät
- katkaisijan valintaan vaikuttavat myös mekaaniset mitat (Aura & Tonteri, 1993, 269–270).

Katkaisijan nimellisjännitteellä  $U_N$  tarkoitetaan suurinta sallittua käyttöjännitettä, joka määrää katkaisijan eristysrakenteiden jännitelujuusvaatimukset. Nimellisvir-

ralla  $I_N$  määritetään katkaisijan jatkuva kuormitettavuus sen ollessa kiinni. Virtakuormitettavuus määräytyy normeissa määriteltyjen koskettimien suurimpien sallittujen lämpenemisarvojen mukaan. Katkaisijan täytyy pystyä katkaisemaan suurin sijoituspaikalla esiintyvä oikosulkuvirta, jossa normit määrittävät katkaisukyvyn symmetriselle ja epäsymmetriselle oikosulkuvirralla. Symmetrisen oikosulkuvirran katkaisukyky ilmoitetaan sen tehollisarvona (kA). Standardoidut arvot vastaavat samaa, kuin kytkinaseman muidenkin kojeiden virta-arvot ( $I_{term}$ ). (Aura & Tonteri 1993, 270.)

Epäsymmetrisellä oikosulkuvirralla katkaisukyky ilmoitetaan antamalla oikosulkuvirran sallittu alkuarvo  $I_K''$  tehollisarvona. Pika- ja aikajälleenkytkennässä katkaisijan tulee kestää myös oikosulun termiset rasitukset määritellyn ajan. Tavallisesti katkaisijoille ilmoitetaan 1 s terminen oikosulkuvirtakestoisuus  $I_{term}$  ja sen on mekaanisesti kestävä epäsymmetrisen oikosulkuvirran hetkellinen alkuarvo  $I_{dyn}$ . Katkaisija voi joutua kytkemään verkon myös oikosulussa, tällöin on määriteltävä sulkeutumiskyky, jolla ilmoitetaan suurin sallittu oikosulkuvirta, jonka katkaisija pystyy kytkemään koskettimien hitsautumatta. (Aura & Tonteri 1993, 270.)

## 9.2 SF<sub>6</sub>-katkaisija

Etuina SF<sub>6</sub>-katkaisijalla ovat palamattomuus sammutusväliaineella, valokaaren suuri jäähdytyskyky, yhdellä katkaisuyksiköllä saavutettava suurempi palaavan jännitteen kestoisuus sekä tästä johtuva suurempi katkaisuteho muihin kilpaileviin katkaisijatyyppeihin verrattuna. Katkaisupäiden vähäisemmän lukumäärän ansiosta SF<sub>6</sub>-katkaisija on yleensä kustannustehokkain katkaisijaratkaisu 123–765 kV:n jännitetasoilla. Keski-jännitetasolla katkaisupäiden lukumäärä ei ole merkittävä tekijä, vaan ratkaisevia tekijöitä ovat palamattomuus, vähäinen huollon tarve sekä alhaiset katkaisuylijännitteet. SF<sub>6</sub>-katkaisijoissa keski-jännitteellä voidaan käyttää valuhartsista valmistettuja kuoria, joissa kaikki jännitteelliset osat on mahdollista suojata, mikä mahdollistaa pienet vaihevälit ja pienikokoisen kojeistorakenteen. (Elovaara & Haarla 2011a, 177–179.)

$SF_6$  katkaisijoiden mekaaninen elinikä on yleisesti noin 5000–10000 toimintakertaa. Katkaisuelimet itsessään kestävät yleensä 10–20 katkaisukertaa täydellä oikosulkuvirralla ja tuhansia toimintakertoja mitoitusvirralla. Huoltovälit katkaisijoilla on yli 10 vuotta, millä on vaikutusta jopa sähköaseman yleissuunnittelussa.  $SF_6$ -katkaisijoihin liittyviä haasteita ovat valokaaren seurauksena syntyvät myrkylliset yhdisteet, jotka kosteuden vaikutuksesta aiheuttaa korroosiota katkaisukammioissa, sekä myös kaasun nesteytyminen matalissa käyttölämpötiloissa. (Elovaara & Haarla 2011a, 180–181.)

### 9.3 Tyhjiökatkaisija

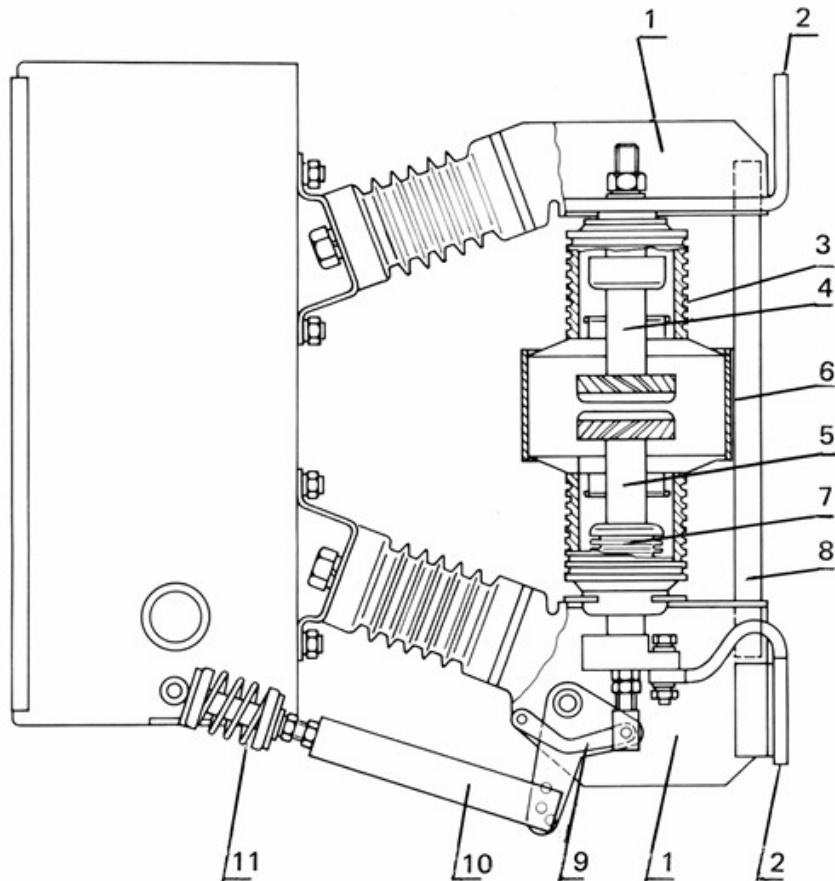
Tyhjiökatkaisijat (vacuum circuit-breaker) eroavat muista katkaisijarakenteista niiden yksinkertaisen rakenteen puolesta, koska katkaisijassa on vain kiinteä ja liikkuva kosketin, jotka ovat tyhjiösäiliössä. Koskettimien erkaantuessa toisistaan, jää valokaari palamaan ionisoituneeseen kosketinpinnoilta höyrystyneeseen metallipilveen eikä ionisoituneeseen kaasuun, niin kuin muissa katkaisijarakenteissa. Virran nollakohdassa metallihöyryn ionisaatio häviää ja höyry tiivistyy nopeasti, minkä vuoksi tyhjiökatkaisijan katkaisukyky on lähes riippumaton palaavan jännitteen muodosta ja jyrkkyydestä. (Elovaara & Haarla 2011a, 182.)

Tyhjiön korkean jännitelujuuden ansiosta jo 5–15 mm:n suuruinen koskettimien avausväli riittää tarpeeksi suuren jännitelujuuden saavuttamiseen. Valokaaren syntymiseen, palamiseen ja sammumiseen vaikuttavat keskeisesti kosketinpinnoilla käytettävät elektrodimateriaalit. Katkaisijan kuorirakenteen on oltava täysin tiivis, minkä vuoksi jännite ja virta johdetaan katkaisuelektrodeille esimerkiksi keraamisten läpivientieristimien kautta, jotka voidaan kovajuottaa metalliosien kanssa, jolloin vältetään tiivisteongelmat. (Elovaara & Haarla 2011a, 182.)

Tyhjiökatkaisijatekniikan tärkeä ero konventionaaliseen katkaisijatekniikkaan verrattuna on, että tyhjiökatkaisijan koskettimet edellyttävät jatkuvaa ulkoista puristusvoimaa, jotta ne pystyvät johtamaan mitoitus- ja oikosulkuvirtoja ilman

katkaisijan lämpenemistä. Lisäksi syntyvä lämpö voidaan johtaa ympäristöön ainoastaan liittimien kautta. (Elovaara & Haarla 2011a, 182.)

Kuviolla 21 on havainnollistettu tyhjiökatkaisijan rakennetta. Tyhjiöputken kannattimet on kiinnitetty ohjainkoteloon kahden valuhartsieristimen avulla. Tyhjiöputkessa metallipalje mahdollistaa pystysuuntaisen liikkeen liikkuvalla koskettimella ja teräksestä valmistettu sammutuskammio suojaa keraamista eristintä metallihöyryltä. Kiinteä ja liikkuva kosketin ovat uritettuja ja ne yhdessä synnyttävät suurilla noin 10 kA virroilla valokaarta pyörittävän magneettikentän. (Elovaara & Haarla 2011a, 182.)



Kuvio 21. Tyhjiökatkaisijan rakennekuva (Elovaara & Haarla 2011a, 183)

Kuviossa 21 ovat 1) katkaisuyksikön kannattimet, 2) liittimet, 3) keraaminen eristin, 4) ja 5) kiinteä sekä liikkuva kosketin, 6) sammutuskammio, 7) metallipalje, 8) eristävä tukitanko, 9) ohjaava vipu, 10) eristävä välitanko ja 11) jousi ohjausvoimalle (Elovaara & Haarla 2011a, 183).

Tyhjiökatkaisijan ohjain on useimmiten moottorijousiohjain, eikä itse katkaisuyksikköä yleensä tarvitse huoltaa. Katkaisuyksikön sähköinen elinikä on yleisesti noin 20–100 toimintaa täydellä oikosulkuvirralla sekä 10 000–20 000 toimintaa mitoitusvirralla, kun taas mekaaninen elinikä on noin 10 000–30 000 toimintaa sekä katkaisijalle että ohjaimelle. Katkaisijan taloudellinen kilpailukyky perustuu sen huoltovapauteen, sillä vain ohjain edellyttää määräaikaista voitelua, tyypillisesti noin kerran kymmenessä vuodessa. (Elovaara & Haarla 2011a, 182.)

#### 9.4 Ilmakatkaisija

Nimensä mukaisesti ilmakatkaisijassa katkaisukärjet ovat normaalipaineisessa ilmassa ja ne ovat suojattu tavallisesti tulenkestävällä sekä eristävällä valokaarisuojuksella. Suojuksen sisällä on yleensä useita välilevyjä, joiden tarkoituksena on tehostaa valokaaren sammumista. Ilmakatkaisijoissa on tyypillisesti erilliset pää- ja valokaarikoskettimet. Katkaisijan ollessa suljettuna virta kulkee pääkoskettimien kautta, ja avattaessa pääkoskettimet avautuvat ennen valokaarikoskettimia, jolloin katkaisuvalokaari muodostuu viimeksi mainittujen väliin ilman, että pääkoskettimet vahingoittuvat. Valokaarikoskettimien välinen valokaari sammutetaan ohjaamalla se nopeasti moniosaiseen sammutuskammioon, jossa virta sammuu seuraavassa nollakohdassaan. (Elovaara & Haarla 2011a, 172.)

Useat valmistajat varustavat ilmakatkaisijansa magneettisella puhalluksella, jossa virran aiheuttama sähkömagneettinen voima kohdistuu poikittain valokaareen ja työntää sitä sammutuskammion kennostoja kohti. Tämä pidentää valokaarta ja kasvattaa valokaarivastusta, jolloin katkaistava virta pienenee ja lopuksi kennostossa valokaari jäähtyy ja sammuu. Magneettipuhalluksella varustettujen katkaisijoiden suurin mitoitusjännite  $U_R = 24$  kV, ja niiden etuina ovat pienet katkaisijan aiheuttamat ylijännitteet, suuri kytkentätiheys sekä pitkät huoltovälit. Ilmakatkaisijoita valmistetaan yleensä mitoitusjännitteeseen 500 V saakka ja mitoitusvirrat voivat nousta jopa 10 kA asti. Katkaisuvirta on tyypillisesti 25–50 kA, mutta joskus huomattavasti suurempikin. (Elovaara & Haarla 2011a, 173.)

## 10 VOIMAKAAPELIT

Voimakaapeli on sähköenergian siirtoon tarkoitettu johto, jossa yksi tai useampi toisistaan eristetty johdin on suojattu tehdasvalmisteisella vaipalla kosteutta, korroosiota ja mekaanisia vaurioita vastaan (Elovaara & Haarla 2011a, 303).

### 10.1 Kaapelien ominaisuudet ja rakenne

Mekaanisesti vaativissa asennusolosuhteissa, kuten maa- ja meriasennuksissa, kaapelit varustetaan armeerauksella, esimerkiksi teräsnauhoilla tai -langoilla. Erittäin ankarissa käyttöympäristöissä, kuten kaivoksissa tai syvässä vedessä, kaapeleissa voidaan käyttää useampaa armeerauskerrosta. Suomessa käytetään vaihtosähkökaapeleita 110 kV jännitteelle saakka. (Elovaara & Haarla 2011a, 303.)

Vaihtosähkökaapelien nimellisjännite esitetään muodossa  $U_0/U$ , jossa  $U_0$  kuvaa johtimen nimellisjännitettä suhteessa maahan ja  $U$  johtimien välistä nimellisjännitettä. Kaapelien suurimman käyttöjännitteen  $U_m$  ja nimellisjännitteen  $U_0/U$  keskinäistä riippuvuutta kuvataan taulukossa 4. Alle 1 kV:n jännitetasoilla  $U_0$  ja  $U$  vastaavat suurinta sallittua käyttöjännitettä. (Elovaara & Haarla 2011a, 303.)

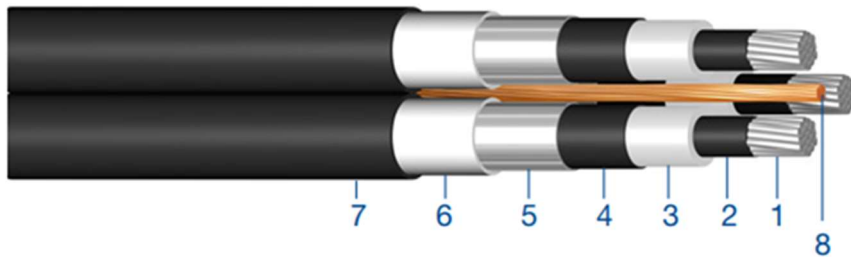
Taulukko 4. Suurin sallittu käyttöjännite  $U_m$  ja kaapelin nimellisjännitteen  $U_0/U$  keskinäinen riippuvuus (Elovaara & Haarla 2011a, 303)

$U_m$ /kV	1,2	12	24	123	420
$U_0/U$ , kV/kV	0,6/1	5,8/10	11,6/20	64/110	231/400

Kaapeleilla poikkipinta-alat ovat 25–2500 mm<sup>2</sup>. Pienenimmät poikkipinta-alat ovat pienjännitteille, pinta-alat 25–300 mm<sup>2</sup> ovat keskijännitekaapeleille, 300–1600 mm<sup>2</sup> ovat 123 kV kaapeleille ja 420 kV jännitteellä mennään näidenkin arvojen yli. Kaapelien johtimet ovat yleensä kuparia tai alumiinia, ja erikoistapauksissa voidaan käyttää myös muita metalleja tai seoksia, esimerkiksi vetolujuuden lisäämiseksi. Alumiinin resistiivisyys on kuitenkin suurempi kuin kuparin, minkä takia sen poikkipinta-ala on noin 50 prosenttia suurempi, kuin saman virrankeston omaavan kuparikaapelin. (Elovaara & Haarla 2011a, 307.)

Kaapelien rakenteeseen sisältyvät johdin/johtimet, johdinsuoja, johdin eristys, hohtosuoja, kosketussuoja sekä ulkoiset suojakerrokset mm. vaippa, armeeraus ja korroosiosuoja. Johdin, hohto- ja kosketussuojia käytetään ainoastaan keski- ja suurjännitekaapeleissa. (Elovaara & Haarla 2011a, 307.)

Seuraavaksi on kuvattu AHXAMK-W kaapelin (kuvio 22) ja AMCMK kaapelin (kuvio 23) rakennetta.



Kuvio 22. Keski-jännitekaapelin AXHAMK-W  $U_0, U, U_m/12, 20, 24$  kV rakennekuva (NKT 2022)

Kuviossa 22 luvuista 1–8 ovat:

1. Pyöreä kerrattu alumiiniköysi pitkittäinen vesitiivistetty pulverilla
2. Puolijohtava muovimateriaali
3. Kuivavulganoitu XLPE, nimellispaksuus on 5.5 mm
4. Täysin liimattu puolijohtava materiaali
5. Vedestä paisuva puolijohtava nauha, joka paisuessaan estää veden etenemisen kaapelissa
6. Alumiini-muovilaminaatti, joka toimii myös poikittaisena vesitiivistyksenä
7. Musta sääkestävä MDPE muovi, jossa merkinnät vaipassa: merkki, ulottuvuus, tyyppi, vuosi, pituus ja koodi
8. Keskellä oleva kuparijohdin (NKT 2022).



Kuvio 23. Voimakaapelin AMCMK  $U_0, U, U_m/0,6, 1, 1.2$  kV rakennekuva (Mukailen Rexel 2025a)

Kuviossa 23 luvuista 1–6 ovat:

1. AL-johdin
2. PVC-eristys
3. Muovinen vyönauhoitus
4. Konsentrisen kuparijohdin
5. Muovinen vyönauhoitus
6. PVC-vaippa (Rexel 2025a).

Kaapelin johtimet valmistetaan sitä useammasta ja ohuemmasta säikeestä, mitä suurempaa liikuteltavuutta ja mekaanista taipuisuutta kaapelilta vaaditaan. Johdinsuoja (conductor screen) sijaitsee johtimien pinnalla ja se on valmistettu puolijohtavasta materiaalista. Sen tarkoitus on poistaa johtimen pinnan epätasaisuudet ja sillä tavalla pienentää kentänvoimakkuushuippuja, jotka aiheutuvat johdinlangoista. Johdinsuoja vähentää myös johtimen ja eristyksen välisiä lämpörasituksia oikosulku- ja maasulkutilanteissa. (Elovaara & Haarla 2011a, 308.)

Johdineristys ulottuu johtimen tai johdinsuojan pinnasta hohtosuojaan saakka ja antaa kaapelille riittävän jännitekeston. Samalla sen tehtävänä on poistaa johtimessa syntyvä häviölämpö tehokkaasti kaapelista. (Elovaara & Haarla 2011a, 308.)

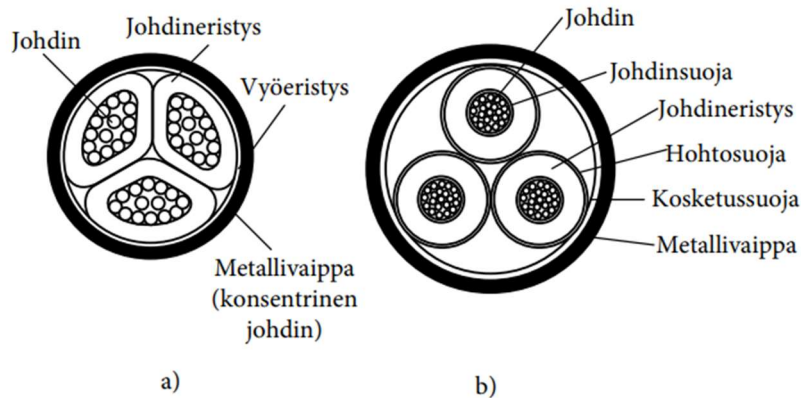
Hohtosuoja (core tai insulation screen) yhdessä johdinsuojan kanssa rajaa johtimen aiheuttavan sähkökentän kahden sylinterimäisen pinnan väliin. Se on valmistettu johtavista metallinauhoista tai puolijohtavasta materiaalista. (Elovaara & Haarla 2011a, 309–310.)

Kosketussuoja (shield) toimii varaus- ja vikavirtojen johtotienä, häiriösuojana sekä turvallisuuslaitteena ja on tästä syystä metallista valmistettu. Kosketussuojarakenteisiin vaikuttavia tekijöitä ovat kaapelityyppi ja käyttötarkoitus sekä suojarakenne voi olla vaihekohtainen tai yhteinen kaikille vaihejohtimille. Kosketussuojan valmistuksessa voidaan käyttää lyijyä, alumiinia, kuparia tai jopa terästä. (Elovaara & Haarla 2011a, 310.)

Välivaippoja käytetään muovikaapeleissa yhteenkerrattujen johtimien mekaanisena suojana sekä kaapelin muodon pyöristämisessä. Ulkovaippa (external shield) voi olla valmistettu metallista, muovista tai kumista kaapelin tyyppin ja käyttötarkoituksen mukaan. (Elovaara & Haarla 2011a, 311.)

Armeerausta (armor) ei nykyisin käytetä maahan asennettavissa voimakaapeleissa, koska esimerkiksi alumiinivaippa antaa kaapelille riittävän mekaanisen lujuuden. Armeerausta käytetään pääasiassa vain meri- ja kaivoskaapeleissa sekä maahan asennettavissa asennusjohdoissa. (Elovaara & Haarla 2011a, 312.)

Kaapelit jaetaan rakenteensa perusteella vyöeristeisiin ja H-suojattuihin kaapeleihin (kuvio 24) sen mukaan, miten jänniterasitus kohdistuu eristeeseen. H-suojatussa kaapelissa jokaisella johtimella on oma hohtosuoja, eikä kaapelissa ole lainkaan vyöeristystä. Vyöeristeellä tarkoitetaan useita johtimia ympäröivää yhteistä eristystä johtimien ja maan välillä. Metallivaipalliset kaapelit ovat nimellisiä jännitteeseen 10 kV saakka yleensä vyöeristeisiä, mutta tätä suuremmilla jännitteillä käytetään jännitelujuussyistä pääasiassa H-suojattuja kaapeleita. (Elovaara & Haarla 2011a, 310.)



Kuvio 24. Vyöeristetyn a) ja hohtoeristetyn b) voimakaapelin rakenne (Elovaara & Haarla 2011a, 311)

## 10.2 Kaapelin valinta

Kaapelilajin ja johtimen poikkipinnan valintaan vaikuttaa useita tekijöitä ja pääpaino on asetettava taloudellisuudelle ja kuormitettavuudelle sekä valinnassa on huomioitava myös asennuspaikan asettamat mekaaniset vaatimukset sekä korroosiokestoisuus. Voimakaapelin kuormitettavuus on erittäin monimutkainen asia. Kaapelin kuormitettavuuteen vaikuttavia korjauskertoimia ovat mm. kaapelin rakenne, ympäristön lämpötila, lähellä sijaitsevien muiden johtojen lämmittävä vaikutus, maan lämpöresistiivisyys maahan upotettavissa kaapeleissa, asennustapa ja asennussyvyys. Standardeissa on olemassa erityiset kuormitustaulukot, jotka ilmoittavat, kuinka suurella virralla kaapelia saa yhtäjaksoisesti kuormittaa, että se ei lämpene liikaa. Kuormitustaulukkoja kaapeleille on saatavissa myös kaapelivalmistajilta. (Elovaara & Haarla 2011a, 316.)

Kaapelin kuormitettavuus lasketaan määrittämällä mihin lämpötilaan tietty virta kaapelin lämmittää tai toisin sanoen kuinka paljon kaapelia voidaan kuormittaa, että lämpötila pysyy määritellyn lämpötilan alapuolella. Tällöin täytyy pystyä arvioimaan kaapelissa syntyvää lämpöä ja ennen kaikkea sitä, miten kaapelia ympäröivä materiaali kykenee vastaanottamaan tämän lämmön. Syntyvä lämmönkehitys on helppoa arvioida, koska kaapelille voidaan tehdä

lämmönkehitystä koskevia mittauksia. Vaikeampi mittauskohde on ympäristön kyky vastaanottaa lämpöä, koska siihen vaikuttaa moni asia, kuten maaperän laatu, kosteus ja lämpötila. (Elovaara & Haarla 2011a, 316–317.)

Kaapelissa syntyy lämpöä johtimien, vaipan ja armeerauksen virtalämpöhäviöistä sekä eristeen dielektrisestä häviöistä. Nämä häviöt muuttuvat lämmöksi ja nostavat johtimen ja eristeen lämpötilaa, minkä jälkeen lämpö siirtyy johtumalla (convection) eristeen ja suojakerrosten läpi kaapelin pinnalle. Maahan tai veteen asennetussa kaapelissa lämpö siirtyy edelleen ympäröivän maan tai veden pintaan ja lopulta johtuu sekä säteilee ilmaan. (Elovaara & Haarla 2011a, 317.)

### 10.3 Kaapelivarusteet

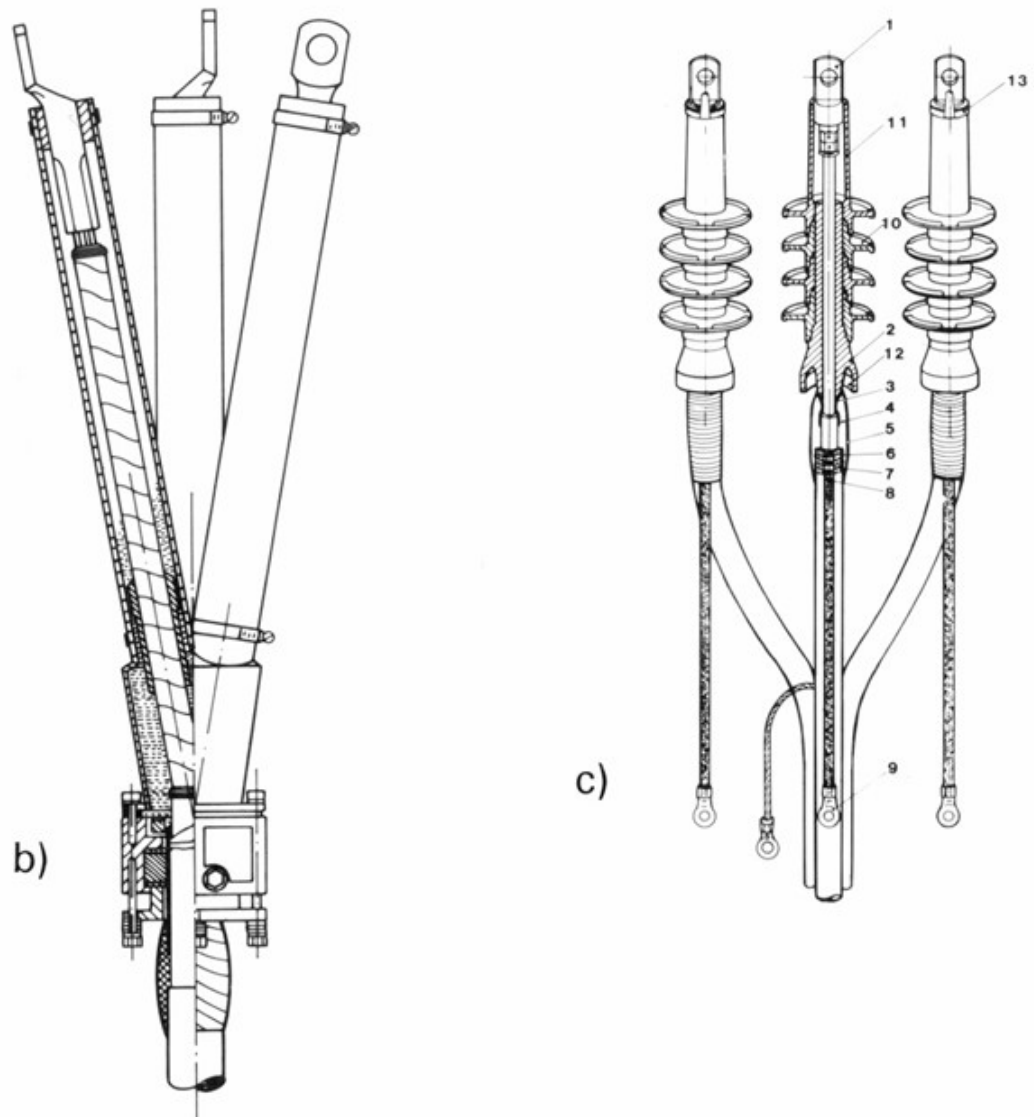
Kaapelivarusteisiin kuuluvat muun muassa erilaiset päätteet ja jatkokset. Kaapelipäätteiden tehtävänä on esimerkiksi:

- eristettyjen johtimien yhdistäminen näkyvissä oleviin liittimiin
- öljyn pitäminen öljykyllästetyissä kaapeleissa
- suojata kaapeleita kosteudelta
- suojata mekaanisesti kaapelin pää
- muuttaa homogeenisen kaapelieristeen ylitse vaikuttavan sähkökentän jakautuman poikittaisesta pitkittäiseksi, mikä mahdollistaa myös ulkoisen eristyksen (ilman) mahdollisuudesta selviytyä rasituksesta ilman osittaispurkauksia. (Elovaara & Haarla 2011a, 327.)

Kaapelipäätteen on kestettävä samat sähköiset rasitukset kuin itse kaapelin, ja testauksissa niitä käsitellään aina yhtenä kokonaisuutena. Jos kaapeli ja päätteet hankitaan eri toimittajilta, on erityisen tärkeää varmistaa, että päätteet soveltuvat varmasti kyseiseen käyttötarkoitukseen. (Elovaara & Haarla 2011a, 327.)

Kaapelipäätteitä on esitetty kuviossa 25, joista b on vanhan paperieristeen ja c muovieristeen kaapelin päätteet. Kuvassa b) on 10 kV:n APAKM-kaapelin

sisäpääte ja c on 20 kV:n AHXAMK-kaapelin ulkopääte. Ulkopäätteessä numerosta 1-13 ovat 1 kaapelikenkä, 2 kumikeila, 3 puolijohtava levy, 4 EPR-nauha, 5 sähköteippi, 6 tukiholkki, 7 letkunkiristin, 8 kuparipunos, 9 kaapelikenkä, 10 laippa, 11 huppu, 12 maadoitusrengas ja 13 letkunkiristin. (Elovaara & Haarla 2011a, 328.)



Kuvio 25. Erityyppisiä kaapelipäätteitä (Elovaara & Haarla 2011a, 329)

Kaapelipäätteen rakenne määräytyy kaapelityypin, käyttöjännitteen ja asennuspaikan mukaan. Enintään 20 kV:n jännitteillä sisäasennuksissa on perinteisesti käytetty öljytäytteisiä letkupäätteitä tai eristysputkipäätteitä.

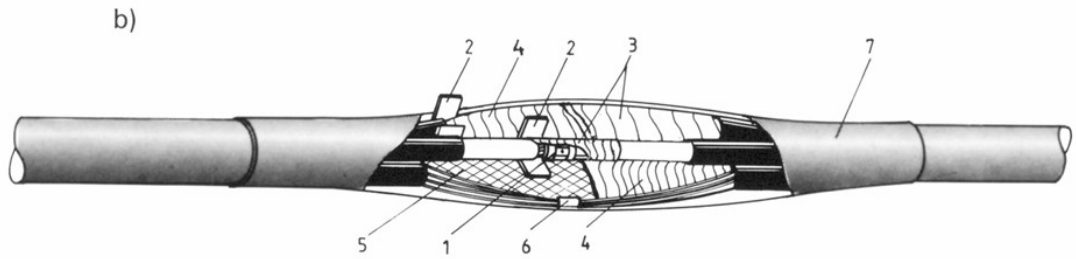
Ulkoasennuksissa päätteiltä vaaditaan hyvää mekaanista kestävyyttä ja täyttä tiiviyttä, minkä vuoksi on käytetty posliinieristimiä ja säänkestävällä kumilla toteutettuja tiivistyksiä. Muovikaapeleissa jännitteellä 6–36 kV on tavallisesti hohtosuoja, joten sähkökentän ohjaus toteutetaan puolijohtavalla kutistemuoviletkulla. Myös päätteen ulkoinen rakenne on yleensä kutistemuovia ja ulkokäytössä siihen lisätään vielä laipat kutistamalla. (Elovaara & Haarla 2011a, 328–329.)

Jatkosten (joints) tarkoituksena on liittää yhteen kaapelin valmistuspituuksia suorilla jatkoksilla sekä tehdä haaroituksia pääkaapelista haaroitusjatkoksilla. Jatkoksia käytetään myös kaapelivikojen korjaamisessa. Jännitemitoituksen osalta jatkokset toteutetaan periaatteessa samalla tavalla kuin kaapelipäätteet. (Elovaara & Haarla 2011a, 330.)

Jatkoskohdassa johdineristys muotoillaan kartiomaiseksi, kun käyttöjännite on 20 kV tai enemmän. Johdinliitoksen päälle asennetaan yleensä jatkosholkki, joka voi olla juotettava, puristettava tai ruuvikiinnitteinen. Sähkökentän hallinnan parantamiseksi holkin ulkopinnan tulee olla lieriömäinen ja pinnan tasoittamiseksi sen päälle voidaan lisätä puolijohtavia nauhoja. Jatkosholkin päissä käytetään suurta pyörityssädettä, jotta sähkökentän voimakkuus ei kasvaisi paikallisesti eristykselle haitalliseksi. (Elovaara & Haarla 2011a, 330.)

Kaapelijatkoksen johdineristys toteutetaan kaapelin rakenteesta riippuen esimerkiksi valumuovilla, muoviteipillä, paperi tai muovinauhoilla, kaapelimassalla tai kaapeliöljyllä. Nauhoista tehty eristys on yleensä 1,5–2,5-kertainen verrattuna johdineristyksen normaaliin paksuuteen. Jatkos varustetaan suojuksella, jonka tarkoituksena on varmistaa riittävä mekaaninen suoja. Suojatuissa asennuspaikoissa suojaukseksi riittää muovikuori, muussa tapauksessa käytetään metallikuorta. (Elovaara & Haarla 2011a, 330.)

Muovieristeisten 6–20 kV:n kaapelien jatkokset toteutetaan itsevulkanoituvalla nauhalla, joka kiinnitetään teippaamalla. Johdinjatkos tehdään puristettavan holkin avulla, ja kosketussuoja voidaan toteuttaa esimerkiksi kupariverkosta. (Kuvio 26; Elovaara & Haarla 2011a, 330–331.)

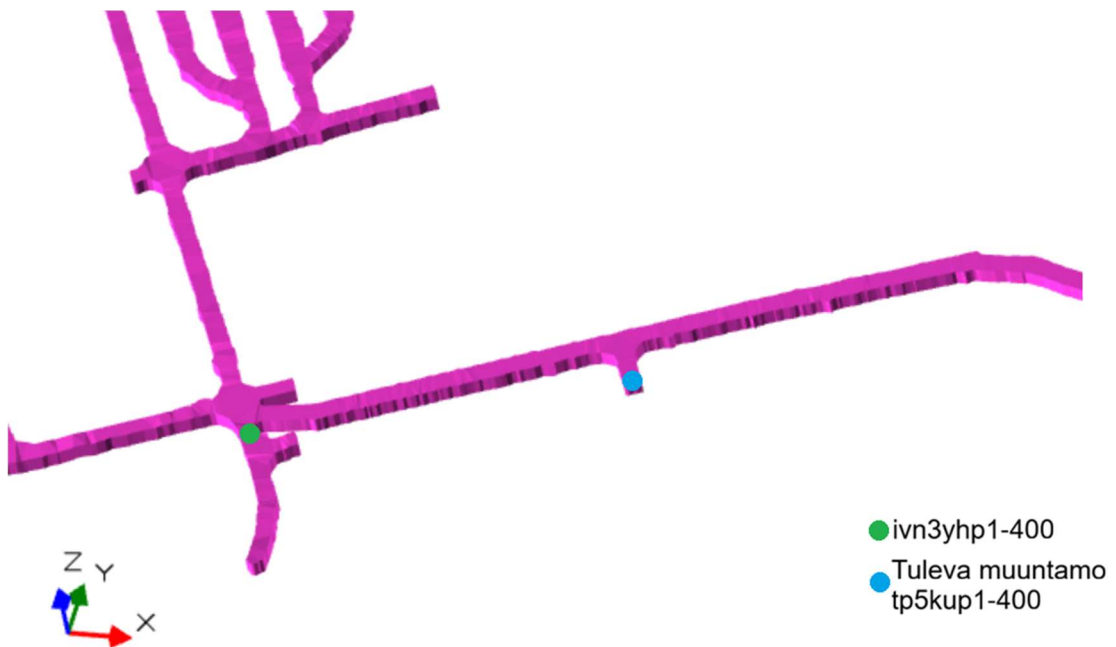


Kuvio 26. AHXCMK-kaapelin teippijatkoksen rakenne, jossa 1 on jatkosholkki, 2 kentänohjauslevy, 3 puolijohtava nauha, 4 EPR-nauha, 5 kupariverkko, 6 jatkosholkki ja 7 kutistemuovinen ulkovaippa (Elovaara & Haarla 2011a, 332)

## 11 400 MUUNTAMON TYÖSUUNNITELMA

### 11.1 Lähtötietoa

Sähköjen riittävyys on ollut pitkään ongelma 400 tp5:ssä pitkien kaapelimatkojen ja tästä johtuvan suuren jännitteen aleneman takia. Muuntamo 266 tasolta on ollut tarkoitus purkaa kalliomekaanisten asioiden vuoksi ja se on korvattu jo 289 tasolle asennetulla uudella muuntamolla. Tasolta 266 purettava muuntaja tullaan siirtämään uuteen kohteeseen tp5kup1-400 (Kuvio 27). Kyseisessä paikassa tp5-400 on paremmalle sähkölle tarvetta perien tekemistä ja tutkimuskairausta varten. Kun kaikki tulot sekä lähdöt on saatu 266 muuntamosta purettua, niin se voidaan siirtää huoltotiloihin pudistusta ja kunnostusta varten. Muuntamolle täytyy porata kallioon reiät keskijännitesyöttöä varten 4 eri tasoväliä 500–457, 475–450, 450–425 ja 425–400. Sitten kun porareivät on tehty, voidaan suorittaa kaapelin veto ja siirtää muuntaja 400 tasolle odottamaan sähköistystä.



Kuvio 27. Muuntamon tuleva paikka 400 tasolla

## 11.2 Puistomuuntamo

Puistomuuntamo (Kuvio 28), joka siirretään 266 tasolta 400 tasolle on Norelcon valmistama. Muuntamokokonaisuuteen kuuluu muuntamokopin sisälle tehdas-asennetut 1600 kVA kuivamuuntaja (GBE) (Kuvio 29), keskijännite kojeisto Ormazabal CGMCOSMOS (RMU)  $SF_6$  eristeinen (Kuvio 30), Pienjännitekojeisto (Norelco) (Kuvio 31), Valaistusmuuntaja 690/400 V 100 kVA (muuntosähkö) (Kuvio 32) sekä tarvittavat syötöt keskijännitekojeistolta muuntajalle ja virtakiskosto pienjännitekeskukselle.



Kuvio 28. Norelco-puistomuuntamo



Kuvio 29. Muuntamon päädyssä oleva hartsieristeinen kuivamuuntaja



Kuvio 30. Ormazabal-keskijännitekojeisto



Kuvio 31. Norelco-pienjännitekojeisto



Kuvio 32. Valaistusmuuntaja 100 kVA

Puistomuuntamon muuntaja (Kuvio 29) on alumiinikäämityksinen pienihäviöinen hartsieristeinen muuntaja. Jännitteet muuntajassa ovat ensiossa 20 kV ja toisosssa 0,69 kV/50 Hz. Muuntajan ensiökäämissä on  $\pm 2 \times 2,5\%$  säätö molempiin suuntiin eli  $-2,5\%$  vähennys nostaa alajännitettä prosentuaalisen verran nimellisjännitteestä. Se on kytkennältään Dyn11 eli ensiö on kolmiossa ja toisio tähdessä, jossa on nollapiste. Kytkennän mukaan alajännite on yläjännitettä  $30^\circ$  edellä.

Muuntajan arvokilvessä on esitetty tyhjäkäyntihäviö  $P_0$ , joka on 1980 W ja kuormitushäviö  $P_k$ , joka on 13 kW. Oikosulkujännitteeksi arvokilpi antaa  $u_k = 6\%$ . Muuntajan arvojen perusteella on laskettu työssä oikosulkuvirtoja ja jännitteen alenemaa sekä toisiojännitettä. Muuntajakoko on kaivoksessa kokemusperäisesti valittu, jossa on riittävä syöttökapasiteetti useille eri tasoille.

### 11.3 Muuntamon sijoitus

Muuntamolle on louhittu perä paikassa tp5kup1-400 (Kuvio 33). Perään on tehty muuntamolle lattiavalu (Kuvio 34), jossa on kaapelikanava muuntamon syöttökaapelia ja lähtöjä varten sekä maadoituselektrodi. Kaapelikanavassa on myös rakennettuna viemärointi vedenpoistoa varten.

Muuntamo tulee asentaa lattiavalulle siten, että se on kaapelikanavaan nähden oikeassa paikassa, että keski- ja pienjännitekeskuksen syötöt ja lähdöt saadaan helposti vedettyä. Kuvia muuntamon sijoituksesta kaapelikanavaan nähden sekä yleiskuva muuntamon komponenttien sijainnista on liitteissä (Liite 3).



Kuvio 33. Muuntamolle louhittu perä, jossa lattiavalu



Kuvio 34. Muuntamon lattiavalu, jossa kaapelikanava

#### 11.4 Kaapelireitti muuntamon keskijännitesyötölle

Syöttökaapeli vedetään neljä eri tasoväliä porareikiä pitkin 500 tasolta 400 tasolle. Kaapelivedon pituudeksi tulee noin 1000m AHXAMK-W 3x185+35 keskijännitekaapelia, jolloin kaapelia syöttöön menee ainakin kaksi 500m täyttä kela. Riippuen miten kaapeli saadaan vedettyä ja asennettua, tulee tehdä kaapeliin jatkoksia ainakin kaksi kappaletta 500 tasolla ja 450 tasolla. Lisäksi keskijännitekaapelin kaveriksi vedetään 70 cu johdin kaivoksen laajan maadoitusverkon toteuttamiseksi sekä toinen päällystetty, jatkuvuuden mittauksen helpottamiseksi.

Tasovälien kaapelointi menee seuraavasti:

500 louhinta -> pv12yhp1/tp1-500 (Liite 4 1(5))

pv12yhp1/tp1-500 -> pv12yhp1/tp1-475 (Liite 4 1(5))

pv12yhp1/tp1-475 -> pv12yhp1/tp1-450 (Liite 4 2(5))

pv12 450 tasoperää pitkin -> ivn3yhp1-450 (Liite 4 2(5))

ivn3yhp1-450 -> ivn3yhp1-425 (Liite 4 3(5))

ivn3yhp1-425 -> tp5-400 (Liite 4 3(5))

tp5-400 -> tp5kup1-400 (Liite 4 4(5))

Koko kaapelireitti (Liite 4 5(5))

Kaapelivetojen kuvat ovat liitteissä (Liite 4).

### 11.5 Kojeiston oikosulkukestoisuuden määrittäminen

Ormazabal kojeistossa oli leimattuna 3 sekunnin oikosulkuvirta  $I_k$ , joka oli 20 kA, sekä dynaaminen oikosulkuvirta  $I_p$ , joka oli 50 kA. Laskennassa tulokset olivat keskijännitekojeistolla oikosulkuvirralla 9,65 kA ja dynaamiselle oikosulkuvirralla 28,1 kA. Laskennoissa todetaan, että kojeisto kestää sähköiset ja mekaaniset rasitukset. Schneider pienjännitekojeistolla leima-arvot olivat  $I_k$  50 kA ja dynaaminen oikosulkuvirta  $I_p$  105 kA. Laskennassa tuloksiksi saatiin  $I_k$  21,7 kA ja  $I_p$  62,3 kA. Myös pienjännitekeskus kestää sähköiset ja mekaaniset rasitukset.

Vertaillaan keskijännitekojeiston tuloksia:

9,65 kA < 20 kA

28,1 kA < 50 kA.

Vertaillaan pienjännitekojeiston tuloksia:

21,7 kA < 50 kA

62,3 kA < 105 kA oikosulkulaskemat ovat liitteissä (Liite 5).

## 11.6 Kaapeleiden kuormitettavuudet ja releasettelu

Kaapelit muuntajien syötöissä ja pienjänniteverkon (poraverkon) syötöissä ovat vakiintuneita. Keskijännitesyötöissä (20 kV) käytetään yleensä AHXAMK-W 3x185+35 kaapelia ja poraverkon (690 V) syötössä AMCMK 3x240+72 kaapelia. Tässä työssä tarkastellaan näiden kaapelien suhteen kuormitettavuutta ja soveltuvuutta.

Keskijännitekaapelissa AHXAMK-W 3x185+35 standardin mukainen kuormitettavuus ilma-asennuksessa oli 340 A PEX eristeiselle kaapelille, johdinlämpötilassa 90 astetta. Tähän tulee vielä korjauskertoimena ilman lämpötila (25°C), jonka kerroin oli 1 ja kolme kaapelia tikashylyllä kosketuksissa toisiinsa seinää vasten (0,80). Korjauskertoimien jälkeen kuormitettavuudeksi tuli 272 A, joka ylittää relesuojauksen alemman portaan asettelun 215 A 0,8 s ja on tällöin riittävä. Keskijännitekaapelin asennustavat ja korjauskertoimet ovat liitteissä (Liite 1).

Ryhmäkeskuksen syötössä kaapelina käytetään AMCMK 3x240+72 tuplasyötönä ja asennustavaksi tuli C monijohdinkaapeli seinäpinnalla PEX-eristeinen. Korjauskertoimiksi kuormitettavuudelle kaapelia kohden tuli ilman lämpötila (15°C), jonka korjauskerroin oli 1,12 ja yhdessä kerroksessa neljä kaapelia seinällä 0,75. Korjauskertoimien jälkeen tuplasyötölle jäi kuormitettavuudeksi noin 640 A, joka on riittävä ryhmäkeskusta syöttävälle 630 A katkaisijalle. Pienjännitekaapeleiden asennustavat ja korjauskertoimet ovat liitteissä (Liite 2).

Ryhmäjohdolla AMCMK 3x240+72 asennustavaksi tuli C monijohdinkaapeli seinäpinnalla PEX-eristeinen. Kuormitettavuuden korjauskertoimiksi tuli vielä ilman lämpötila (15°C), jonka korjauskerroin oli 1,12 ja viisi kaapelia seinällä yhdessä kerroksessa 0,73. Yhden ryhmäjohdon kuormitettavuus laskennallisesti oli noin 312 ampeeria, mikä on riittävä 250 A gG sulakkeelle. Kaapeleiden kuormitettavuuslaskelmat ovat liitteissä (Liite 6).

Oikosulkukestoisuus keskijännitekaapelilla AHXAMK-W 3x185 oli 17,4 kA 1 s ja laskennoissa 400 kojeiston oikosulkuvirraksi saatiin 9,65 kA, joten kaapeli on oikosulkukestoinen.

Muuntamo 266 tasolla on EJ08 lähdössä ja kun tämä muuntaja siirretään 400 tasolle, tulee se olemaan saman EJ08 lähdön syöttämä. Kuormitus ei juuri muutu EJ08 lähdössä, koska tehoa jaettu EJ05 lähtöön. Releasettelu EJ08 lähdössä on alemmalla portaalla >215A/0,8 s ja pikalaukaisuportaalla >>500A/0,2 s. Oikosulkuvirrat ovat laskennallisesti riittävät relesuojaukselle, jossa minimi oikosulkuviraksi saatiin 8,8 kA, jolloin relesuojaus laukaisee yli 500A vikavirran pois pikalaukaisuportaalla 0,2 s. Johdonsuoja on kunnossa myös alemman portaan tarkastelussa, jossa kaapelin kuormitettavuudeksi saatiin 272A, jolloin relesuojaus toimii virran ylittäessä 215A 0,8 sekunnin ajan. Kaapelien terminen kestoisuus on 17,4 kA/ 1 s, eli kaapelit on relesuojauksella termisesti suojattu.

### 11.7 Jännitteenalenema

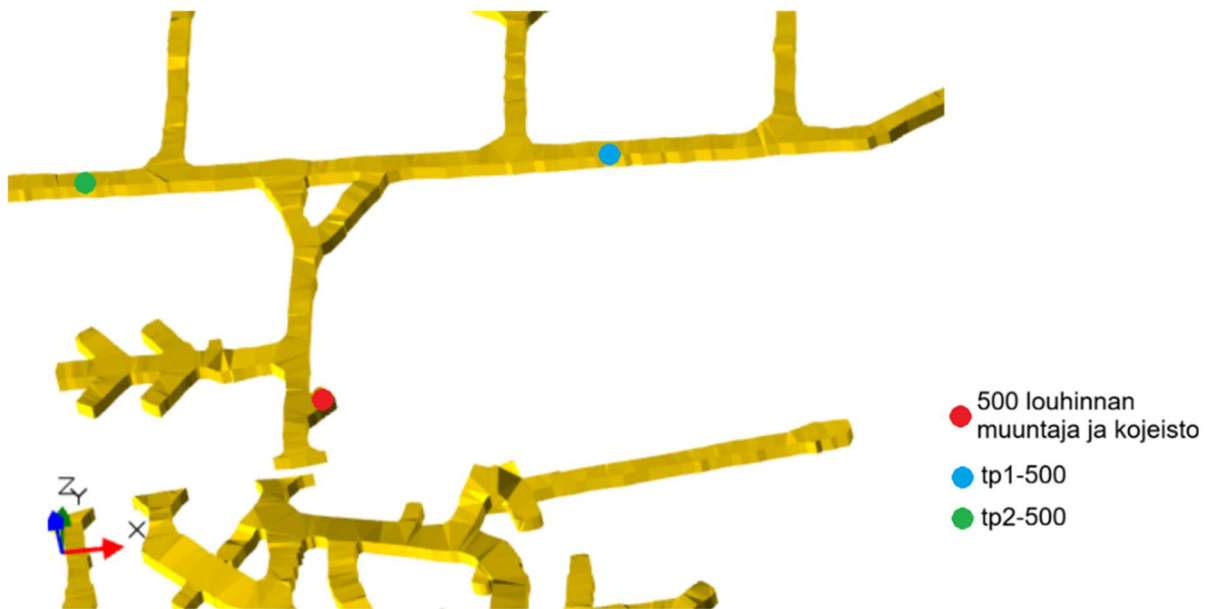
Jännitteenalenema laskennoissa todettiin, 400 muuntajan toisiojännite on ensiökäähin vakioasetuksella alhainen ja sitä mahdollisesti täytyy nostaa ainakin yhdellä portaalla. Jännitteenalenema keskijännitejohdolla oli muuntajan 70 % kuormalla noin 13,3 V ja prosentuaalisesti erittäin pieni. Pienjännitejohdolla taas oletetulla 180 kW kuormalla alenema olisi 600 m matkalla noin 22 V, ollen prosentuaalisesti noin 3 %. Alenema jää alle sallitun, joka selviää taulukosta (Taulukko 4). Jännitteenalenemaa on laskettu sen hetkisen verkon kuormituksen, jännitteenaleneman ja päämuuntajan käämikytkimen asennon mukaan. Jännitteen alenema laskennat ovat liitteissä (Liite 7).

Taulukko 4. Suurin sallittu jännitteenalenema pienjännitteellä (ST-käsikirja 33, 31)

Asennuksen tyyppi	Valaistus %	Muu käyttö %
A - Pienjänniteasennus, joka on syötetty suoraan yleisestä jakeluverkosta	3	5
B - Pienjänniteasennus, joka on syötetty yksityisestä teholähteestä)	6	8
<p>a) Suositellaan, että niin pitkälle kuin mahdollista ryhmäjohtojen jännitteenalenema ei ylitä asennustyyppille A annettuja arvoja.            Kun asennuksen pääjohdot ovat pitempiä kuin 100 m, näitä jännitteenalenemia voidaan kasvattaa 0,005 % johdon 100 m ylittävän pituuden metriä kohti. Ilman tätä lisäystä se ei saa olla suurempi kuin 0,5 %.            Jännitteenalenema määritellään sähkölaitteen tehontarpeen mukaan käyttäen soveltuvin osin tasoitus-kertoimia, tai käyttäen piirien suunniteltuja virtoja.</p>		

## 11.8 Muuntamon syötön kytkennät

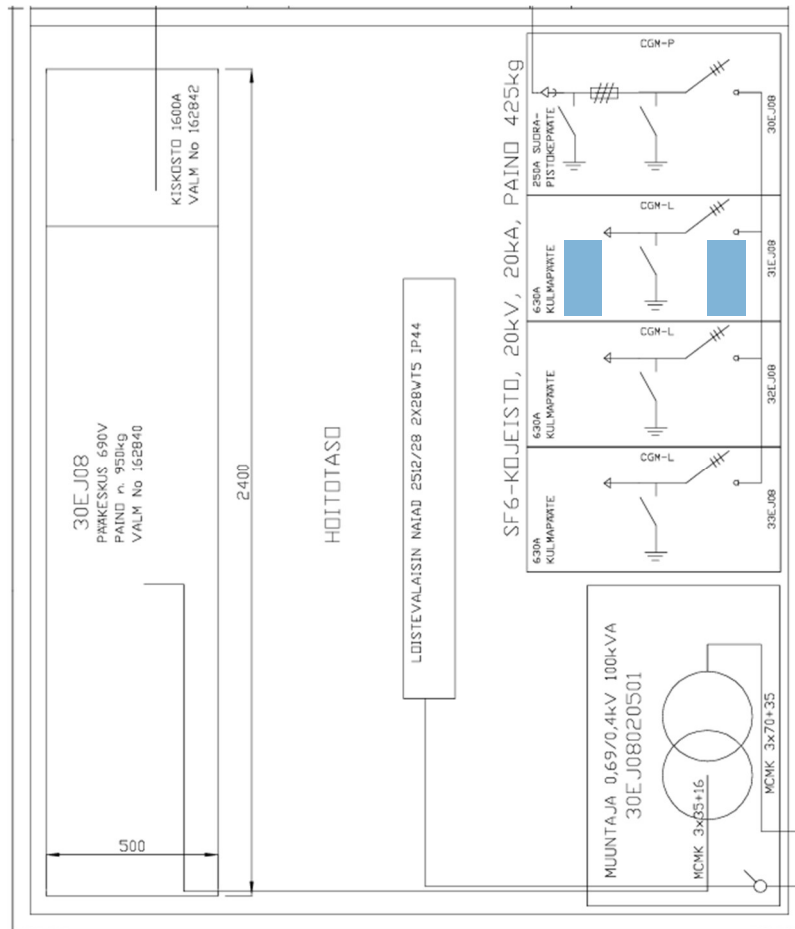
Muuntajan syöttö otetaan tp1yhp1kup1-500 louhinnan muuntamolta 500 tasolla (Kuvio 35). Norelcon kojeisto sijaitsee muuntamon oikealla puolella, jossa syöttöä varten on varalähtö 20EJ08 (Kuvio 36). 400 tasolle siirrettävän muuntamon Ormazabal kojeistolla keskijännitekaapeli kytketään linjakenttään 31EJ08 (Kuvio 37). Keskijännitekaapelin kytkennät syöttävällä Norelcon kojeistolla ja muuntamon Ormazabal kojeistolla tehdään Raychem RSTI-5854 pistokepäätteillä (Kuvio 38).



Kuvio 35. 500 louhinnan muuntajan ja kojeiston sijainti



Kuvio 36. 20EJ08 lähtö 400 muuntamon syöttöä varten



Kuvio 37. Muuntamon kojeiston keskijännitekaapelin kytkentäkenttä merkittynä (31EJ08)



Kuvio 38. Raychem RSTI-5854 -pistokepääte (Roxel 2026b)

### 11.8.1 Uusi keskus ja kaapeleiden käännöt

Uusi keskus asennetaan muuntamon viereen tp5kup1-400, jonka syöttö toteutetaan tuplana AMCMK 3x240+72 kaapelilla. Keskuksen syöttö otetaan muuntamon pienjännitekeskuksen 630 A Schneider katkaisijalähdöstä 01.

Uudelle keskukselle käännetään vanha syöttö 06EJ080703. Kaapeli irrotetaan syöttävästä haaroituskotelosta, lyhennetään ja kytketään uuteen keskukseseen (30EJ0801) lähtöön 01. Uusi keskukselta lähtevä ryhmä merkitään (30EJ080101) tunnuksella. Kuva keskuksen asennuspaikasta, kaapelin käännöstä, keskijännitekaapelin vedosta sekä muuntamosyötön jakelukaaviosta ovat liitteissä (Liite 8).

### 11.8.2 Ryhmäjohdon pisin matka

Jakeluverkossa automaattiseen poiskytkentään käytettävän sulakkeen mitoitusvirta voidaan valita taulukon (Taulukko 5) mukaan. Jakeluverkoissa pienimpiä yksivaiheisia oikosulkuvirtoja laskettaessa voidaan käyttää alempaa johtimen lämpötilaa kuin rakennusten sähköasennuksissa. Laskennassa käytettävän lämpötilan on kuitenkin oltava vähintään +40 °C (SFS 6000-8-801 2022, 7).

Kaivoksessa poraverkkona oleva pienjänniteverkko luokitellaan jakeluverkoksi, jolloin yli 63gG ylivirtasuojan pienin oikosulkuvirta voi olla  $3xI_N$ .

Taulukko 5. Jakeluverkon pienin oikosulkuvirta, jonka mukaan vikasuojaukseen käytetty ylivirtasuojaja voidaan mitoittaa (SFS 6000-8-801 2022, 7)

Ylivirtasuojaja	Pienin yksivaiheinen oikosulkuvirta jakeluverkossa
gG-tyypin sulake $I_N \leq 63 \text{ A}$	$2,5 \times I_N$
gG-tyypin sulake $I_N > 63 \text{ A}$	$3,0 \times I_N$

Tuloksiksi laskennoissa tuli 250 A gG sulakkeella  $3xI_N$  pisimmäksi kaapelimatkaksi noin 1900m, jolloin oikosulkuvirta ehdot vielä täytyvät. Laskennat ovat liitteissä (Liite 5).

## 11.9 Keski- ja pienjänniteosan käyttöönottotarkastus

*”Sähkölaitteisto saadaan ottaa käyttöön vasta, kun käyttöönottotarkastuksessa on riittävässä laajuudessa selvitetty, että siitä ei aiheudu 6 §:ssä tarkoitettua vaaraa tai häiriötä. Käyttöönottotarkastus on tehtävä myös sähkölaitteiston muutosten ja laajennustöille. Sähkölaitteiston rakentajan tulee huolehtia sähkölaitteiston käyttöönottotarkastuksesta. Jos rakentaja laiminlyö velvollisuutensa tai on estynyt huolehtimaan niistä, tulee sähkölaitteiston haltijan huolehtia tarkastuksesta.”* (Sähköturvallisuuslaki 2016/1135 § 3:43.)

### 11.9.1 Keski- ja pienjänniteosa

Kaikkiin suurjänniteasennuksiin on tehtävä sähköturvallisuuslain edellyttämä käyttöönottotarkastus, josta laaditaan tarkastuspöytäkirja. Tuotestandardien mukaiset laitteet esim. kojeistot ja muuntajat, tarkastetaan asennuspaikalla niiden merkintöjen ja mukana toimitettujen asiakirjojen perusteella. Lisäksi laitteille on suoritettava paikan päällä laitekohtaisissa standardeissa ja hankinta-asiakirjoissa määritellyt tarkastukset ja testaukset. (SFS 6001 2025, 108-109.)

Kaivoksen laajan maadoitusjärjestelmän ehtojen täyttymistä ei tarvi tutkia kokonaisuutena, kun olemassa olevaan laajaan maadoitusjärjestelmään liitetään uusia paikallisia maadoitusjärjestelmiä, esimerkiksi uusia jekelumuntamoita. Tällöin liittyminen on kuitenkin varmistettava mittaamalla ja tulokset on dokumentoitava. (SFS 6001 2025, 111.)

Keski- ja pienjänniteosan käyttöönottotarkastuksessa noudatetaan suurjännitesähköasennukset standardia SFS 6001:2025. Käyttöönotto tarkastukseen voi käyttää valmista pohjaa, jolla voi suorittaa samalla lomakkeella keski- ja pienjänniteosan lisäksi myös siihen kuuluvan pienjänniteosan tarkastuksen. Vastaavasti voidaan käyttää myös omia pohjia, joita myös työpaikalla on.

Sähköasennuksen vaatimuksenmukaisuus voidaan todeta seuraavasti:

1. tekemällä aistinvaraiset tarkastukset
2. suorittamalla toiminnalliset testit
3. tekemällä mittaukset

Keskijänniteosan vaatimuksenmukaisuuteen liittyviä tarkastuksia, testejä ja mittauksia on esitetty liitteissä (Liite 9).

### 11.9.2 Pienjänniteosa

Myös pienjänniteasennuksille on tehtävä sähköturvallisuuslain mukainen käyttöönottotarkastus, josta laaditaan pöytäkirja. Tarkastuksessa noudatetaan pienjännitesähköasennukset SFS 6000:2022 standardia.

Aistinvaraiset tarkastukset sisältävät vähintään standardin mukaan seuraavat kohdat, kun ne ovat aiheellisia:

- a. *"sähköiskulta suojaukseen käytetyt menetelmät (SFS 6000-4-41)*
- b. *palosuojauksien käyttö ja toimenpiteet lämpövaikutuksilta suojaamiseksi (SFS 6000-4-42) sekä palon leviämisen estämiseksi tehdyt toimenpiteet (SFS 6000-5-52 luku 527)*
- c. *johtimien valinta kuormitettavuuden kannalta (SFS 6000-4-43 ja SFS 6000-5-52 luku 523)*
- d. *Suoja- ja valvontalaitteiden valinta, asettelu, selektiivisyys ja yhteensopivuus (SFS 6000-5-53)*
- e. *sopivien ylijännitesuojien valinta, sijoitus ja asennus, silloin kun ne on vaadittu (SFS 6000-5-53 luku 534)*
- f. *erotus- ja kytkentälaitteiden valinta, sijoitus ja asennus (SFS 6000-5-53 luku 537)*
- g. *sähkölaitteiden ja suojausmenetelmien valinta ulkoisten tekijöiden vaikutusten mukaan (SFS 6000-4-42 kohta 422, SFS 6000-5-51 kohta 512.2 ja SFS 6000-5-52 kohta 522 sekä SFS 6000-8-804)*
- h. *nolla- ja suojajohtimien oikeat tunnuksat (SFS 6000-5-51 kohta 514.3)*
- i. *piirustusten, varoituskilpien tai vastaavien tietojen olemassaolo (SFS 6000-5-51 kohta 514.5)*

- j. virtapiirien, varokkeiden, kytkimien, liittimien yms. tunnistettavuus (SFS 6000-5-51 luku 514)*
- k. kaapelien ja johtimien päätteiden ja liitosten sopivuus (SFS 6000-5-52 luku 526)*
- l. maadoituskytkentöjen, suojajohtimien ja niiden liitosten sopivuus (SFS 6000-5-54)*
- m. sähkölaitteiston käytön, tunnistamisen ja huollon vaatima tila (SFS 6000-5-51 luvut 513 ja 514 ja SFS 6000-7-729)*
- n. sähkömagneettisilta häiriöiltä suojaavat toimenpiteet (SFS 6000-4-44 luku 444)*
- o. jännitteelle alttiiden osien kytkennät maadoitusjärjestelmään (SFS 6000-4-41 luku 411)*
- p. johtojärjestelmien valinta ja asentaminen (SFS 6000-5-52 luvut 521 ja 522)*
- q. yksivaiheisten kytkinlaitteiden kytkentä äärijohtimiin ja äärijohtimen kytkentä hehkulampun lampunpitimen kantaosaan (SFS 6000-46 ja SFS 6000-5-53).” (SFS 6000-6 2022, 8.)*

Seuraavat testit standardin mukaan on tehtävä, kun ne liittyvät tarkastettavaan työhön ja ne tehdään mieluiten seuraavassa järjestyksessä:

- a. ”suojajohtimien jatkuvuus (kohta 6.4.3.2)*
- b. eristysresistanssi (kohta 6.4.3.3)*
- c. eristysresistanssin testaus, jolla varmistetaan SELV- ja PELV-piirien tai sähköisesti erotettujen piirien erotus (kohta 6.4.3.4)*
- d. eristysresistanssin testaus, jolla varmistetaan lattia- ja seinäpintojen resistanssi/impedanssi (kohta 6.4.3.5)*
- e. syötön automaattisen poiskytkennän toiminnan varmistamisen testaus (kohta 6.4.3.7)*
- f. lisäsuojauksen tehokkuuden varmistamisen testaus (kohta 6.4.3.8)*
- g. kiertosuunnan mittaus (kohta 6.4.3.9)*
- h. toimintatestit (kohta 6.4.3.10)*
- i. jännitteenalenema (kohta 6.4.3.11).” (SFS 6000-6 2022, 8-9.)*

### 11.9.3 Varmennustarkastus

Luokan 1, 2 ja 3 sähkölaitteistoille on tehtävä käyttöönottotarkastuksen lisäksi myös varmennustarkastus. Pääsääntöisesti sähkölaitteiston rakentajan vastuulla on huolehtia varmennustarkastuksesta, mutta jos tämä laiminlyö velvollisuutensa tai on muuten estynyt huolehtimaan siitä, huolehtii sen silloin sähkölaitteiston haltija. Varmennustarkastus on tehtävä kolmen kuukauden kuluessa siitä kun sähkölaitteisto on otettu käyttöön. (ST 51.24 2017, 2–3.)

Varmennustarkastuksessa varmistetaan, että sähkölaitteisto täyttää sähköturvallisuudelle ja sähkömagneettiselle yhteensopivuudelle säädetyt vaatimukset ja että sille on tehty asianmukainen käyttöönottotarkastus (ST 51.24 2017, 3).

Varmennustarkastuksen perusosia ovat:

- käyttöönottotarkastuksen ja sen dokumenttien tarkastaminen
- aistinvaraiset tarkastukset
- mittaukset ja testaukset
- poikkeavien toteutustapojen vertaileminen (ST 51.24 2017, 4).

## 12 KUSTANNUSLASKELMAT

Kustannuslaskelmissa on laskettuna pelkästään tarvikkeet muuntamon keskijännitesyöttöä varten ja ne muodostuvat seuraavasti:

1. Kupariköysi - HK 70/19 K500 1000 m ~ 10818e
2. 2 x MK-HF C-PRo 70 KEVI K7/500 400 m ~ 12000e
3. Pistokepäätte - Raychem RSTI-5854 2kpl ~ 700e
4. Maadoituspakkaus - XVTWM 10240 95-240/20 150-300 ~ 220e
5. Kutistejatkos - XVRWM 49240 95-240/10-20 ~ 430e
6. Lisätarvikepakkaus - XVRMO 1002, 95-240/20 185-300 ~ 250e
7. Keskijännitekaapeli - REKA DryRex - AHXAMK-W 20 kV 3x185+35 Cu ~ 29000e

Hinnaksi tarvikeosuuksien osalta tulee noin ~55000e. Hintoihin ei ole laskettu itse puistomuuntamoita, pienjännitekeskusta, eikä sen kaapelointia, koska nämä olivat jo hankittuna.

Kustannuksia syntyisi myös suunnittelusta (SAP arkistointi), mahdollisesta releasettelulaskennasta, varmennustarkastuksesta sekä työsuuksista muodostuvista kustannuksista. Verkostolaskennan päivityksestä tulisi myös kustannuksia, mutta sen teettäminen tätä työtä varten ei ole tarpeellista.

### 13 POHDINTA

Opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella kaivoksen jakelumuuntamon keskijännitesyöttö sekä uudet ryhmämuutokset uudelle pienjännitekeskukselle. Työssä todettiin myös kojeistojen ja kaapeleiden kestoisuus laskennallisesti sekä jännitteenalenema eri kuormituksilla.

Tässä työssä käsiteltiin laajaa alan kirjallisuutta ja standardeja oman koulutuksesta saadun opin tukena. Laskennat opettivat ymmärtämään sähkölaitteiden ja kaapeleiden mitoitus yhdessä kirjoista saadun teorian sekä standardien kanssa. Työssä perehdyttiin muuntajan, kojeistojen, mittamuuntajien ja suojarleistyksen toimintaan. Työssä laskettiin kaapeleiden kuormitettavuutta asianmukaisella asennustavalla ja oikosulkuvirtoja keskijännite ja pienjännitekojeistolla. Laskennoilla todettiin kaapeleiden kuormitettavuus sekä keski- ja pienjännitekojeiston kestoisuus. Jännitteenalenema laskennoilla tarkasteltiin eri kuormituksella jännitteenalenemaa sekä muuntajan lähtöjännitettä.

Opinnäytetyössä oppi teollisuuden sähköjakelusta, kaapeleiden kuormitettavuuksista ja kertoimista sekä kojeistoista. Työ kehitti paljon ammatillista osaamista teoriaan perehtymisen ja erilaisten laskentojen ansiosta.

## LÄHTEET

ABB 2000a. ABB TTT-käsikirja. luku 11. Viitattu 05.01.2026 [https://heikki-laakso.com/opetus/abb/110\\_0007.pdf](https://heikki-laakso.com/opetus/abb/110_0007.pdf).

–2000b. ABB TTT-käsikirja. luku 7. Viitattu 07.01.2026 [https://heikki-laakso.com/opetus/abb/071\\_0007.pdf](https://heikki-laakso.com/opetus/abb/071_0007.pdf).

–2000c. ABB TTT-käsikirja. luku 8. Viitattu 20.1.2026 [https://heikki-laakso.com/opetus/abb/080\\_0007.pdf](https://heikki-laakso.com/opetus/abb/080_0007.pdf).

–2000d. ABB TTT-käsikirja. luku 10. Viitattu 22.1.2026 [https://heikki-laakso.com/opetus/abb/101\\_0007.pdf](https://heikki-laakso.com/opetus/abb/101_0007.pdf).

Aura, L. & Tonteri, AJ. 1993. Sähkölaitostekniikka: Helsinki: WSOY, 1993.

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011a. Sähköverkot 2. Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Helsinki: Otatieta Helsinki University Press, 2011.

–2011b. Sähkököverkot 1. Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. Helsinki: Otatieta Helsinki University Press, 2011.

Elovaata, J & Laiho, Y. 1999. Sähkölaitostekniikan perusteet. 4., uudistettu painos. Helsinki: Otatieta Helsinki University Press, 1999.

Hietalahti, L. 2013. Sähkövoimatekniikan perusteet. Tampere: Amk-Kustannus Oy, Tammertekniikka, 2013.

Huotari, K. & Partanen, J. 1998. Teollisuuden oikosulkuvirtojen laskeminen. Opetusmoniste 3. Viitattu 16.03.26 [https://www.uotila.cc/images/teollisuusverkkojen\\_oikosulkuvirrat.pdf](https://www.uotila.cc/images/teollisuusverkkojen_oikosulkuvirrat.pdf).

Korpinen, L. 1998a. Sähkövoimatekniikkaopus. 9 Muuntajat ja sähkölaitteet. Viitattu 12.12.25 [https://leenakorpinen.com/archive/svt\\_opus/9muuntajat\\_ja\\_sahkolaitteet.pdf](https://leenakorpinen.com/archive/svt_opus/9muuntajat_ja_sahkolaitteet.pdf).

–1998b. Sähkövoimatekniikkaopus. 5 Sähköverkon automaatio ja suojaus. Viitattu 22.12.25 [http://leenakorpinen.com/archive/svt\\_opus/5sahkoverkon\\_automatio\\_ja\\_suojaus.pdf](http://leenakorpinen.com/archive/svt_opus/5sahkoverkon_automatio_ja_suojaus.pdf)

–1998c. Sähkövoimatekniikkaopus. Sähköverkkojen laskentaa. Viitattu 10.02.2026 [https://leenakorpinen.com/archive/svt\\_opus/4sahkoverkkojen\\_laskenta.pdf](https://leenakorpinen.com/archive/svt_opus/4sahkoverkkojen_laskenta.pdf)

Lakervi, E & Partanen, J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki: Otatieto Helsinki University Press, 2008.

NKT 2022. Keskiännitekaapeli keskusköydellä Viitattu 13.12.25 [https://nkt.widen.net/content/awfa8tk1id/pdf/AHXAMK-W\\_24kV-FI-JUL2022\\_1.pdf?u=gj0n1y](https://nkt.widen.net/content/awfa8tk1id/pdf/AHXAMK-W_24kV-FI-JUL2022_1.pdf?u=gj0n1y).

Outokumpu 2025. Outokummun Kemin kaivoksen malmivarat kasvoivat 95 prosentilla. Viitattu 13.01.2025 <https://www.outokumpu.com/fi-fi/news/2025/outokummun-kemin-kaivoksen-malmivarat-kasvoivat-95-prosentilla-3536649>.

Prysmian 2024. Energia, teollisuus ja talonrakennuskaapelit. Viitattu 03.02.2026 <https://fi.prysmian.com/sites/fi.prysmian.com/files/2024-03/Prysmian-Energia-teollisuus-ja-talonrakennuskaapelit%202024.pdf>

Rexel 2026a. Alumiinivoimakaapeli. Viitattu 13.12.25 <https://www.rexel.fi/fin/Tuoteryhmat/Kaapelointi/06-Voimakaapelit/Alumiinivoimakaapeli---AMCMK-3x240-72-Eca---REKA-R/p/0622366>.

–2026b. Pistokepäätte RSTI 5854 Energy. Viitattu 06.02.2026 <https://www.rexel.fi/fin/Tuoteryhmat/S%C3%A4hk%C3%B6jakelu/52-Kaapelinsuojaus--ja-liitostarvikkeet/Pistokep%C3%A4te---RSTI-5854---Energy/p/5232234>.

Schneider 2024. Helen sähköverkko ja Schneider Electric kirittävät haitallisen SF6-kaasun korvaamista uudella teknologialla. Viitattu 02.01.2026 <https://www.se.com/fi-fi/about-us/newsroom/news/press-releases/helen-s%C3%A4hk%C3%B6verkko-ja-schneider-electric-kiritt%C3%A4v%C3%A4t-haitallisen-sf6-kaasun-korvaamista-uudella-teknologialla-664c558925ddac8d99015475>.

SFS 5636 2024. PEX-eristeiset 10, 20 ja 30 kV Al- ja Cu-voimakaapelit. Rakenne ja testaus. 5. painos. SFS Suomen Standardit.

SFS 6000-5-52 2022. Pienjännitesähköasennukset. Osa 5-52: Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Johtojärjestelmät. 5. painos. SFS Suomen Standardit.

SFS 6000-6 2022. Tarkastukset. 5. painos. SFS Suomen Standardit

SFS 6000-8-801 2022. Pienjänniteasennukset. Osa 8-801: Täydentävät vaatimukset. Jakeluverkot. 5. painos. SFS Suomen Standardit.

SFS 6001 2025. Suurjännitesähköasennukset. 6. painos. SFS Suomen Standardit.

ST-käsikirja 33 2023. Rakennusten Sähköasennusten Tarkastukset. 5. painos. Espoo. Kirjapaino Grano Oy 2023.

ST 51.24 2017. Varmennustarkastuksen suorittaminen. Sähkötieto ry.

Sähtöturvallisuuslaki 16.12.2016/1135. Viitattu 15.03.2026 [https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/2016/1135#chp\\_3\\_\\_sec\\_43](https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/2016/1135#chp_3__sec_43).

Wikipedia 2025. Elijärven kaivos. Viitattu 13.01.2026 [https://fi.wikipedia.org/wiki/Elij%C3%A4rven\\_kaivos](https://fi.wikipedia.org/wiki/Elij%C3%A4rven_kaivos).

## LIITTEET

- Liite 1. Keskijännitekaapelit
- Liite 2. Pienjännitekaapelit
- Liite 3. Muuntamon kuvat
- Liite 4. Kaapelireitti
- Liite 5. Oikosulkulaskelmat 400 muuntamo
- Liite 6. Kaapeleiden kuormitettavuudet
- Liite 7. Jännitteenalenema
- Liite 8. Kaapelin kääntö
- Liite 9. Keskijänniteosan käyttöönottotarkastuksia

## Liite 1 1(4). Keskijännitekaapelit

Taulukko 6. Kaapelivalmistajan (Prysmian) antamia arvoja keskijännitekaapeleille (Prysmian 2024, 108)

TUOTTEEN NIMI		AHXAMK-W 3x50Al+35Cu 20 kV	AHXAMK-W 3x95Al+35Cu 20 kV	AHXAMK-W 3x120Al+35Cu 20 kV	AHXAMK-W 3x150Al+35Cu 20 kV	AHXAMK-W 3x185Al+35Cu 20 kV	AHXAMK-W 3x240Al+70Cu 20 kV (8)	AHXAMK-W 3x300Al+70Cu 20 kV (8)	
Sähkönumero		0624250	0624252	0624253	0624254	0624255	0624256	0624257	
<b>RAKENNETIETOJA (1)</b>									
Johtimen halkaisija	mm	8,0	11,3	12,7	14,1	15,7	18,1	20,3	
Vaihevaipan halkaisija	mm	28	31	33	34	36	39	41	
Kaapelin ulkohalkaisija (ympäri piirretyr ympyrän halkaisija)	mm	62	69	72	75	78	87	92	
Kaapelin massa	kg/km	2250	2950	3300	3650	4100	5300	6000	
<b>TOIMITUSTIETOJA</b>									
Vakiotoimituspituus	m	500	500	500	500	500	500	500	
Toimituskela		K24	K24	K24	K26	K26	K28	K28	
<b>MEKAANISIA ARVOJA (3)</b>									
Pienin sallittu taivutussäde asennusvedossa	vaihe	m	0,42	0,48	0,50	0,53	0,54	0,60	0,63
	kaapeli	m	0,50	0,56	0,58	0,61	0,63	0,70	0,74
Pienin sallittu taivutussäde lopullisessa asennuksessa (4)	vaihe	m	0,29	0,34	0,35	0,37	0,38	0,42	0,44
	kaapeli	m	0,35	0,39	0,41	0,43	0,44	0,49	0,52
Suurin sallittu asennusvetovoima vetosukalla	kN	2,2	4,3	5,4	6,8	8,3	8,5	8,5	
Suurin sallittu asennusvetovoima vetopäällä	kN	7,5	14,3	18,0	20,0	20,0	20,0	20,0	
<b>SÄHKÖISIÄ ARVOJA (3)</b>									
Vaihejohtimen maks. tasavirtaresistanssi	johdin 20°C	Ω/km	0,641	0,320	0,253	0,206	0,164	0,125	0,100
Vaihejohtimen vaihtovirtaresistanssi (1) (2)	johdin 65°C	Ω/km	0,76	0,38	0,30	0,25	0,20	0,15	0,12
	johdin 90°C	Ω/km	0,82	0,41	0,33	0,27	0,21	0,16	0,13
Keskusköyden maks. tasavirtaresistanssi	johdin 20°C	Ω/km	0,524	0,524	0,524	0,524	0,524	0,268	0,268
Induktanssi vaihetta kohti (1)		mH/km	0,45	0,40	0,39	0,37	0,36	0,35	0,34
Käyttökapasitanssi (1)		μF/km	0,18	0,22	0,24	0,26	0,29	0,32	0,35
Varausvirta (1)		A/km	0,7	0,8	0,9	0,9	1,1	1,2	1,3
Maasulkuvirta (1)		A/km	2,0	2,4	2,6	2,8	3,2	3,5	3,8
<b>KUORMITETTAVUUS (3)</b>									
Maassa (2)	johdin 65°C	A	155	235	265	300	330	385	435
Ilmassa (2)	johdin 65°C	A	160	230	265	300	345	400	460
	johdin 90°C	A	195	280	325	370	425	490	565
<b>TERMINEN OIKOSULKUKESTOISUUS (3)</b>									
Suurin sallittu 1 sekunnin oikosulkuvirta	vaihejohdin (5)	kA	4,7	8,9	11,3	14,1	17,4	22,6	28,3
	kosketussuojat (6)	kA	2,4	2,7	2,9	3,0	3,2	4,4	4,8
	keskusköysi (7)	kA	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	9,7	9,7

(1) Likiarvo

(2) Kosketussuojat ja keskusköysi kytketty yhteen yhteyden molemmissa päissä.

(3) Katso taulukkoarvojen lähtöolettamukset kappaleesta Yleistä tuotetietoa.

(4) Taivutus on tehtävä varovaisena ja tasaisena kertataivutuksena.

(5) Johtimen lämpötila on ennen oikosulkua 90°C ja oikosulun päättyessä 250°C.

(6) Kosketussuojan lämpötila on ennen oikosulkua 85°C ja oikosulun päättyessä 250°C.

(7) Keskusköyden lämpötila on ennen oikosulkua 55 °C ja oikosulun päättyessä 200 °C.

(8) Kaapeli on saatavana myös 35 mm<sup>2</sup> keskusköydellä.

## Liite 1 2(4). Keskijännitekaapelit

Taulukko 7. Sallitut jatkuvat kuormitettavuusarvot PEX-eristeisille kolmijohdin-kaapeleille, alumiini- tai kuparijohtimet (SFS 5636 2024, 29)

Nominal cross-section of conductor mm <sup>2</sup>	Cu conductor			Al conductor		
	Cable laid in ground of 15 °C	Cable laid in ground of 15 °C	Cable laid in air of 25 °C	Cable laid in ground of 15 °C	Cable laid in ground of 15 °C	Cable laid in air of 25 °C
	Conductor temperature 40 °C	Conductor temperature 65 °C	Conductor temperature 90 °C	Conductor temperature 40 °C	Conductor temperature 65 °C	Conductor temperature 90 °C
	A	A	A	A	A	A
35	105	140	165	80	110	135
50	135	175	205	110	145	160
70	155	210	250	130	175	190
95	185	250	295	160	205	230
120	210	285	340	170	230	265
150	240	325	390	205	260	305
185	265	360	435	215	290	340
240	340	415	515	270	340	400
300	345	470	590	280	380	460

Taulukko 8. Suoraan maassa olevien rinnakkaisten kaapelien korjauskertoimet (SFS 5636 2024, 30)

Mutual spacing between cables or groups of cables mm	Number of multicore cables or groups of single-core cables beside each other						
	2	3	4	5	6	8	10
0 (touching)	0,79	0,69	0,63	0,58	0,55	0,50	0,46
70	0,85	0,75	0,68	0,64	0,60	0,56	0,53
250	0,87	0,79	0,75	0,72	0,69	0,66	0,64

Taulukko 9. Asennussyvyyden korjauskertoimet (SFS 5636 2024, 30)

Depth of laying, m	0,50 - 0,70	0,71 - 0,90	0,91 - 1,10	1,11 - 1,30	1,31 - 1,50
6 - 30 kV cables	1,00	0,99	0,98	0,96	0,95

Taulukko 10. Maan resistiivisyydestä johtuvat korjauskertoimet (SFS 5636 2024, 30)

Thermal resistivity of soil, K.m/W	0,7	1,0	1,2	1,5	2,0	2,5	3,0
Correction factor	1,10	1,00	0,92	0,85	0,75	0,69	0,63
Examples of thermal resistivities of soil:							
– dry sand (moisture content 0 %) 3,0 K.m/W							
– dry gravel and clay 1,5 K.m/W							
– semi-dry and moist gravel 1,0 K.m/W							
– moist clay and sand 0,7 K.m/W (moisture content 25 %).							

## Liite 1 3(4). Keskijännitekaapelit

Taulukko 11. Maan lämpötilan korjauskertoimet (SFS 5636 2024, 30)

Conductor temperature °C	Ground temperature °C										
	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
90	1,13	1,10	1,06	1,03	1,00	0,96	0,93	0,89	0,86	0,82	0,77
80	1,14	1,11	1,07	1,04	1,00	0,96	0,92	0,88	0,83	0,78	0,73
70	1,17	1,13	1,09	1,04	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,73	0,67
65	1,18	1,14	1,10	1,05	1,00	0,95	0,89	0,84	0,77	0,71	0,63

Taulukko 12. Muoviputkiin asennettujen kaapelien korjauskertoimet (SFS 5636 2024, 31)

Mutual spacing between tubes mm	Number of tubes beside each other									
	1	2	3	4	5	6	8	10		
0 (touching)	0,80	0,75	0,65	0,60	0,60	0,55	0,55	0,50		
70	-	0,75	0,70	0,65	0,60	0,60	0,55	0,55		
250	-	0,75	0,70	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65		

Taulukko 13. Monijohdinkaapelien korjauskertoimet vapaassa ilmassa (SFS 5636 2024, 33)

Type of laying	Mutual spacing = One cable diameter (d) Distance from the wall not less than 20 mm							Cables touching each other Cable in contact with the wall					
	Number of cables	1	2	3	6	9	Fig.	1	2	3	6	9	Fig.
On floor	Correction factor						C.1	Correction factor					D.1
		0,95	0,90	0,88	0,85	0,84			0,90	0,84	0,80	0,75	
On metal trays (restricted air circulation)	Number of trays						C.2						D.2
	1	0,95	0,90	0,88	0,85	0,84		0,95	0,84	0,80	0,75	0,73	
	2	0,90	0,85	0,83	0,81	0,80		0,95	0,80	0,76	0,71	0,69	
	3	0,88	0,83	0,81	0,79	0,78		0,95	0,78	0,74	0,70	0,68	
	6	0,86	0,81	0,79	0,77	0,76		0,95	0,76	0,72	0,68	0,66	
On metal ladders	Number of ladders						C.3						D.3
	1	1,00	0,98	0,96	0,93	0,92		0,95	0,84	0,80	0,75	0,73	
	2	1,00	0,95	0,93	0,90	0,89		0,95	0,80	0,76	0,71	0,69	
	3	1,00	0,94	0,92	0,89	0,88		0,95	0,78	0,74	0,70	0,68	
	6	1,00	0,93	0,90	0,87	0,86		0,95	0,76	0,72	0,68	0,66	
On structures or on wall	1,00	0,93	0,90	0,87	0,86	C.4	0,95	0,78	0,73	0,68	0,66	D.4	
Arrangement where reduction of current is not necessary	Number of cables laid one above the other is not restricted						C.5	Number of cables laid side by side is not restricted					D.5

## Liite 1 4(4). Keskijännitekaapelit

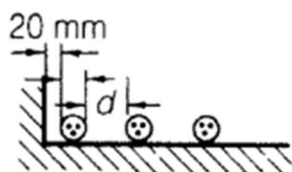


Figure C.1



Figure D.1

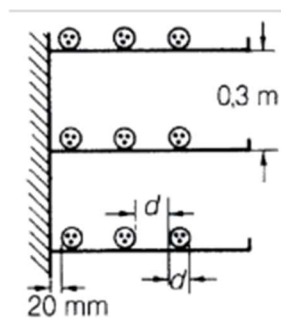


Figure C.2

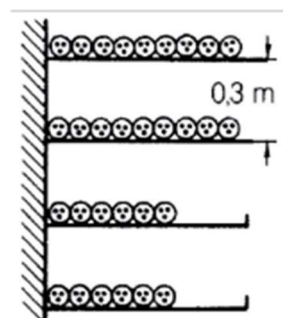


Figure D.2

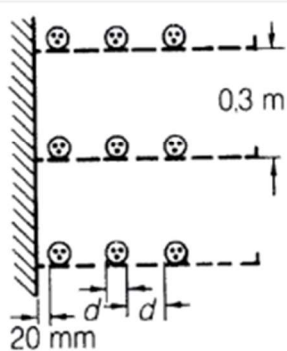


Figure C.3

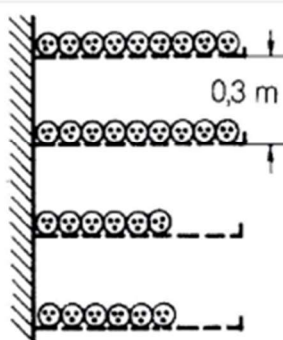


Figure D.3

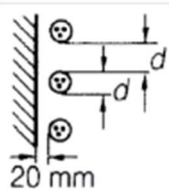
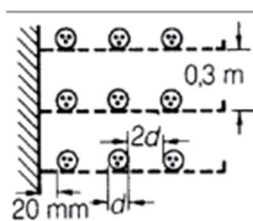
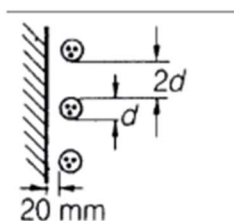


Figure C.4



Figure D.4



Kuvio 39. Vierekkäisten kaapelien asennustapoja (SFS 5636 2024, 34)

## Liite 2 1(4) Pienjännitekaapelit

Taulukko 14. Prysmian pienjännitekaapeleiden ominaisuuksia (Prysmian 2024, 46)

TUOTTEEN NIMI		AMCMK 3x16/10 RM 1 kV	AMCMK 3x25/16 RM 1 kV	AMCMK 3x35/16 AN 1 kV	AMCMK 3x50/16 AN 1 kV	AMCMK 3x70/21 AN 1 kV	AMCMK 3x95/29 AN 1 kV	AMCMK 3x120/41 AN 1 kV	AMCMK 3x150/41 AN 1 kV	AMCMK 3x185/57 AN 1 kV	AMCMK 3x240/72 AN 1 kV	
Sähkönumero		0622157	0622158	0622159	0622160	0622161	0622162	0622163	0622164	0622165	0622166	
<b>RAKENNETIETOJA (1)</b>												
Kaapelin ulkohalkaisija	mm	20	24	23	26	30	33	38	41	46	51	
Kaapelin massa	kg/km	440	620	700	850	1200	1550	2000	2300	2900	3700	
<b>TOIMITUSTIETOJA</b>												
Vakiotoimituspituus	m	1000	1000	1000	500	500	500	500	500	500	500	
Toimituskela		K12	K14	K14	K12	K12	K14	K16	K18	K20	K22	
<b>MEKAANISIA ARVOJA (2)</b>												
Pienin sallittu taivutussäde asennusvedossa	m	0,25	0,29	0,29	0,33	0,36	0,42	0,47	0,52	0,57	0,64	
Pienin sallittu taivutussäde lopullisessa asennuksessa (3)	m	0,17	0,19	0,21	0,23	0,25	0,30	0,32	0,36	0,39	0,44	
Suurin sallittu asennusvetovoima vetosukalla	kN	0,7	1,1	1,5	2,2	3,1	4,2	5,4	6,7	8,3	8,5	
Suurin sallittu asennusvetovoima vetopäällä	kN	1,4	2,2	3,1	4,5	6,3	8,5	10,8	13,5	16,6	20,0	
<b>SÄHKÖISIÄ ARVOJA (2)</b>												
Vaihejohtimen maks. tasavirtaresistanssi	johdin 20°C	Ω/km	1,91	1,20	0,868	0,641	0,443	0,320	0,253	0,206	0,164	0,125
Vaihejohtimen vaihtovirtaresistanssi (1)	johdin 70°C	Ω/km	2,3	1,4	1,0	0,77	0,53	0,39	0,31	0,25	0,20	0,15
PE-johtimen maks. tasavirtaresistanssi	johdin 20°C	Ω/km	1,83	1,15	1,15	1,15	0,868	0,641	0,443	0,443	0,320	0,253
Induktanssi vaihetta kohti (1)		mH/km	0,28	0,28	0,26	0,25	0,24	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23
Käyttökapasitanssi (1)		μF/km	0,29	0,29	0,32	0,35	0,40	0,42	0,44	0,46	0,49	0,52
<b>KUORMITETTAVUUS (2)</b>												
Maassa, asennustapa D	johdin 65°C	A	78	100	125	150	185	220	255	280	330	375
Ilmassa, asennustapa E	johdin 90°C	A	80	101	125	152	194	236	274	316	361	425
<b>TERMINEN OIKOSULKUKESTOISUUS (2)</b>												
Suurin sallittu 1 sekunnin oikosulkuvirta	vaihejohdin (4) PE-johdin (5)	kA kA	1,5 1,5	2,4 2,4	3,4 2,4	4,8 2,4	6,7 3,3	9,0 4,4	11,4 6,0	14,2 6,0	17,5 8,1	22,6 10,2

(1) Likiarvo

(2) Katso taulukkoarvojen lähtöolettamukset kappaleesta Yleistä tuotetietoa.


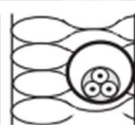
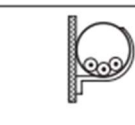


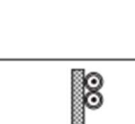
(3) Taivutus on tehtävä varovaisena ja tasaisena kertataivutuksena.

(4) Johtimen lämpötila on ennen oikosulkua 90°C ja oikosulun päättyessä 250°C.

(5) PE-johtimen lämpötila on ennen oikosulkua 85°C ja oikosulun päättyessä enintään 250°C.

## Liite 2 2(4) Pienjännitekaapelit

Taulukko 15. Pienjännitekaapeleiden asennustapoja (SFS 6000-5-52 2022, 34)

Referenssiasennustapa		Taulukko ja sarake							Lämpötilan korjauskerroin	Ryhmästä johtuva korjauskerroin
		Yksittäisen piirin kuormitettavuus					2 ja 3			
		Termoplastinen eristys (PVC)		Silloitettu eristys (PEX, EPR)		Mineaali-eristys				
		2	3	2	3					
1	2	3	4	5	6	7	8	9		
	Eristetyt johtimet lämpöeristettyyn seinään upotetussa putkessa Huone	A1	<a href="#">B.52.2</a> Sarake. 2	<a href="#">B.52.4</a> Sarake. 2	<a href="#">B.52.3</a> Sarake. 2	<a href="#">B.52.5</a> Sarake. 2	-	<a href="#">B.52.14</a>	<a href="#">B.52.17</a>	
	Monijohdinkaapeli eristettyyn seinään upotetussa putkessa Huone	A2	<a href="#">B.52.2</a> Sarake. 3	<a href="#">B.52.4</a> Sarake. 3	<a href="#">B.52.3</a> Sarake. 3	<a href="#">B.52.5</a> Sarake. 3	-	<a href="#">B.52.14</a>	<a href="#">B.52.17</a> paitsi D ( <a href="#">taulukko B.52.19</a> on voimassa)	
	Eristetyt johtimet (yksijohdinkaapelit) putkessa puuseinän pinnalla	B1	Eristetyt johtimet lämpöeristettyyn seinään upotetussa putkessa	<a href="#">B.52.4</a> Sarake. 4	<a href="#">B.52.3</a> Sarake. 4	<a href="#">B.52.5</a> Sarake. 4	-	<a href="#">B.52.14</a>	<a href="#">B.52.17</a>	
	Monijohdinkaapeli putkessa puuseinän pinnalla	B2	Monijohdinkaapeli eristettyyn seinään upotetussa putkessa	<a href="#">B.52.4</a> Sarake. 5	<a href="#">B.52.3</a> Sarake. 5	<a href="#">B.52.5</a> Sarake. 5	-	<a href="#">B.52.14</a>	<a href="#">B.52.17</a>	
	Yksi- tai monijohdinkaapelit puuseinän pinnalla	C	<a href="#">B.52.2</a> Sarake. 6	<a href="#">B.52.4</a> Sarake. 6	<a href="#">B.52.3</a> Sarake. 6	<a href="#">B.52.5</a> Sarake. 6	70 °C vaipassa <a href="#">B.52.6</a> 105 °C vaipassa <a href="#">B.52.7</a>	<a href="#">B.52.14</a>	<a href="#">B.52.17</a>	
	Monijohdinkaapelit putkessa maassa	D	<a href="#">B.52.2</a> Sarake. 7	<a href="#">B.52.4</a> Sarake. 7	<a href="#">B.52.3</a> Sarake. 7	<a href="#">B.52.5</a> Sarake. 7	-	<a href="#">B.52.15</a>	<a href="#">B.52.19</a>	

## Liite 2 3(4) Pienjännitekaapelit

Taulukko 16. Kaapeleiden kuormitettavuus johdinkoon ja asennustavan mukaan (SFS 6000-5-52 2022, 39)

Johtimen nimellis- poikkipinta mm <sup>2</sup>	Taulukon B.52.1 mukaiset asennustavat						
	A1	A2	B1	B2	C	D1	D2
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>Kupari</b>							
1,5	17	16,5	20	19,5	22	21	23
2,5	23	22	28	26	30	28	30
4	31	30	37	35	40	36	39
6	40	38	48	44	52	44	49
10	54	51	66	60	71	58	65
16	73	68	88	80	96	75	84
25	95	89	117	105	119	96	107
35	117	109	144	128	147	115	129
50	141	130	175	154	179	135	153
70	179	164	222	194	229	167	188
95	216	197	269	233	278	197	226
120	249	227	312	268	322	223	257
150	285	259	342	300	371	251	287
185	324	295	384	340	424	281	324
240	380	346	450	398	500	324	375
300	435	396	514	455	576	365	419
<b>Alumiini</b>							
2,5	19	18	22	21	24	22	
4	25	24	29	28	32	28	
6	32	31	38	35	41	35	
10	44	41	52	48	57	46	
16	58	55	71	64	76	59	64
25	76	71	93	84	90	75	82
35	94	87	116	103	112	90	98
50	113	104	140	124	136	106	117
70	142	131	179	156	174	130	144
95	171	157	217	188	211	154	172
120	197	180	251	216	245	174	197
150	226	206	267	240	283	197	220
185	256	233	300	272	323	220	250
240	300	273	351	318	382	253	290
300	344	313	402	364	440	286	326
<p>HUOM. 1 Sarakkeissa 3, 5, 6, 7 ja 8 oletetaan johtimien olevan pyöreitä poikkipinta-alaan 16 mm<sup>2</sup> saakka. Suuremmilla poikkipinta-aloilla arvot viittaavat muun muotoisiin johtimiin ja niitä voi turvallisesti käyttää pyöreisiin johtimiin.</p> <p>HUOM. 2 PEX-eristeen kaapelin vaipan lämpötila, katso <a href="#">Taulukko 52.1</a>.</p>							

## Liite 2 4(4) Pienjännitekaapelit

Taulukko 17. Vapaasti ilmassa olevien kaapeleiden kertoimet muille lämpötiloille kuin 30 astetta (SFS 6000-5-52 2022, 48)

Ympäristön lämpötila <sup>a</sup> °C	Eristys			
	PVC	PEX ja EPR	Mineraali <sup>a</sup>	
			PVC:llä päällystetty tai paljas ja kosketeltavissa 70 °C	Paljas, ei kosketeltavissa 105 °C
10	1,22	1,15	1,26	1,14
15	1,17	1,12	1,20	1,11
20	1,12	1,08	1,14	1,07
25	1,06	1,04	1,07	1,04
30	1,00	1,00	1,00	1,00
35	0,94	0,96	0,93	0,96
40	0,87	0,91	0,85	0,92
45	0,79	0,87	0,78	0,88
50	0,71	0,82	0,67	0,84
55	0,61	0,76	0,57	0,80
60	0,50	0,71	0,45	0,75
65	-	0,65	-	0,70
70	-	0,58	-	0,65
75	-	0,50	-	0,60
80	-	0,41	-	0,54
85	-	-	-	0,47
90	-	-	-	0,40
95	-	-	-	0,32

<sup>a</sup> Korkeammilla ympäristön lämpötiloilla sovelletaan valmistajan antamia arvoja.

Taulukko 18. Korjauskertoimet monijohdinkaapelien ryhmille vapaasti ilmassa, asennustapa C (SFS 6000-5-52 2022, 49)

Kohta	Sijointus (kaapelit koskettavat toisiaan)	Piirien tai monijohdinkaapelien lukumäärä												Käytetään kuormitettavuustaulukon kanssa
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	12	16	20	
1	Nipussa ilmassa, pinnalla, upotettuna tai kotelon sisällä	1,0	0,80	0,70	0,65	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,45	0,41	0,38	B.52.2 - B.52.13 Tavat A - F
2	Yhdessä kerroksessa seinällä, lattialla tai rei'ittämättömällä kaapelihyllyllä	1,0	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,70	Ei korjauskertoimia useammalle kuin yhdessä piirille tai monijohdinkaapelille	B.52.2 - B.52.7 Tapa C		
3	Yhdessä kerroksessa kiinnitettynä suoraan puiseen alakaton pinnalle	0,95	0,81	0,72	0,68	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61		B.52.8 - B.52.13 Tavat E ja F		
4	Yhdessä kerroksessa rei'itettyllä kaapelihyllyllä vaakatai pystysuunnassa	1,0	0,88	0,82	0,77	0,75	0,73	0,73	0,72	0,72				
5	Yhdessä kerroksessa tikkailla, tuilla tai kiinnikkeillä jne.	1,0	0,87	0,82	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78				

HUOM. 1 Nämä kertoimet soveltuvat samanlaisille tai samalla tavalla kuormitettuille kaapeliryhmille.

HUOM. 2 Jos lähellä toisiaan olevien kaapelien vaakasuora etäisyys ylittää kaksi kertaa niiden halkaisijan mitan, korjauskertoimia ei tarvitse soveltaa.

HUOM. 3 Samoja kertoimia sovelletaan:  
- Kahden tai kolmen yksijohdinkaapelien ryhmiin  
- Monijohdinkaapeleihin.

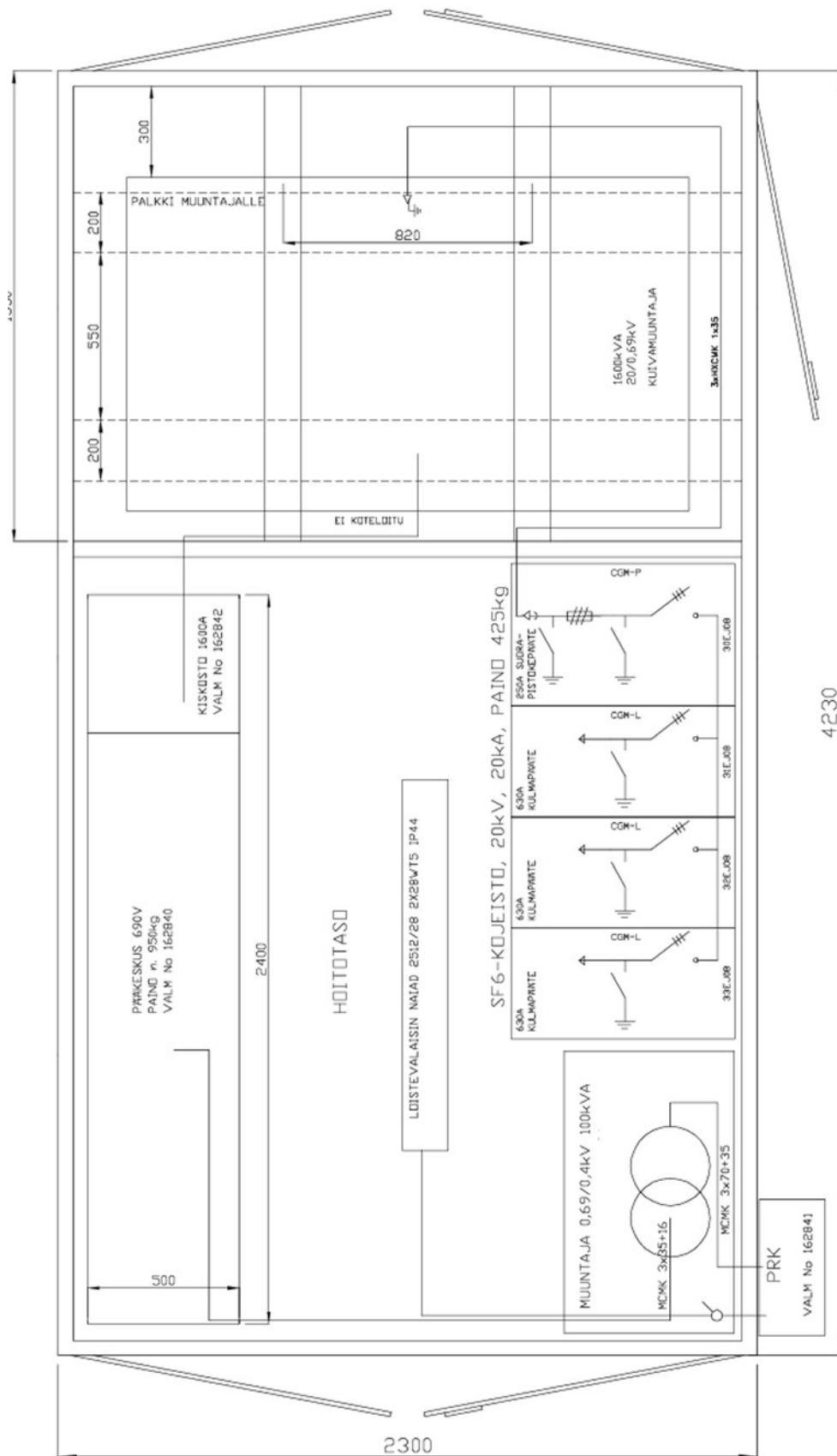
HUOM. 4 Jos järjestelmään kuuluu sekä kaksi- että kolmi- ja nelijohdittaisia kaapeleita, kaapelien kokonaislukumäärä vastaa piirien lukumäärää ja vastaavasti sovelletaan kahden kuormitetun johtimen arvoja kaksijohdinkaapeleille ja kolmen kuormitetun johtimen arvoja kolmi- ja nelijohdinkaapeleille.

HUOM. 5 Jos ryhmä koostuu n kappaleesta yksijohdinkaapeleita, sitä voidaan käsitellä n/2 kahden kuormitetun johtimen piirinä tai n/3 kolmen kuormitetun johtimen piirinä.

HUOM. 6 Tässä annetut arvot ovat keskiarvoja erilaisten taulukkojen B.52.2 - B.52.7 mukaisten kaapelityyppien ja asennustapojen arvoista. Arvojen yleinen tarkkuus on 5%.

HUOM. 7 Joillekin asennuksille ja muille menetelmille, joihin yllä oleva taulukko ei ole tarkoitettu, voi olla tarpeen käyttää erityistapauksia varten laskettuja taulukkoja, katso esim. taulukot B.52.20 ja B.52.21.

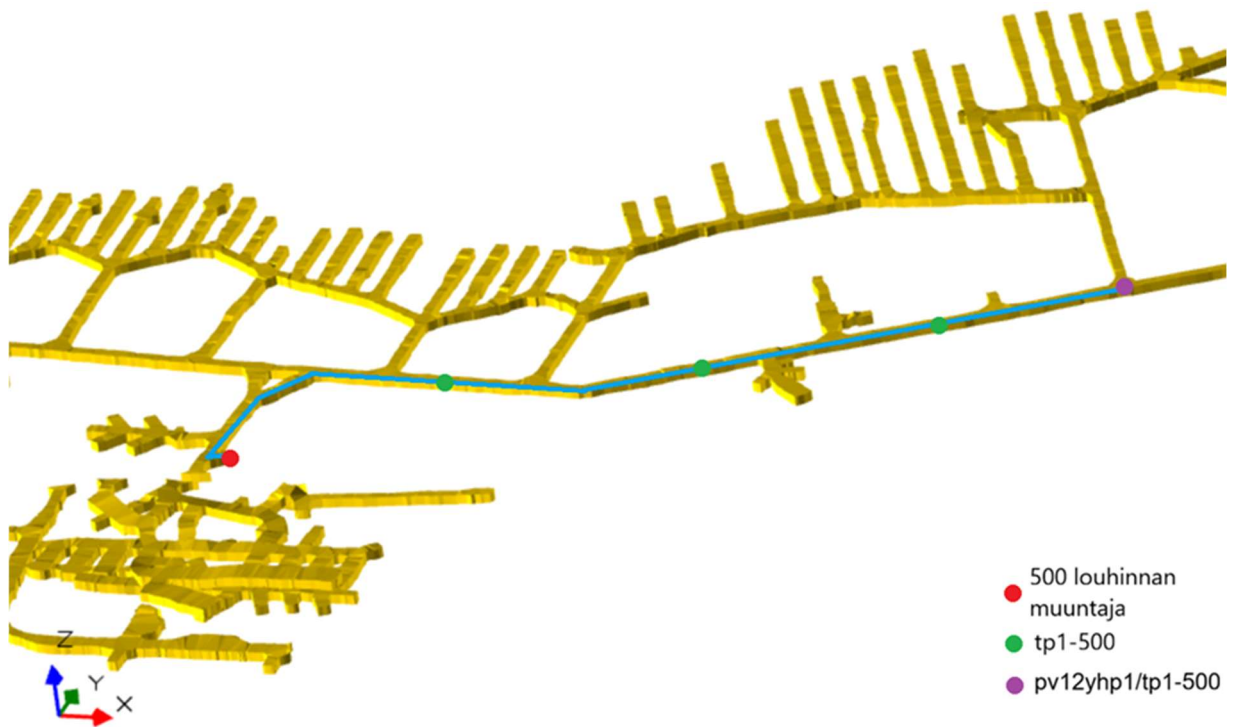
## Liite 3 1(2). Muuntamon kuvat



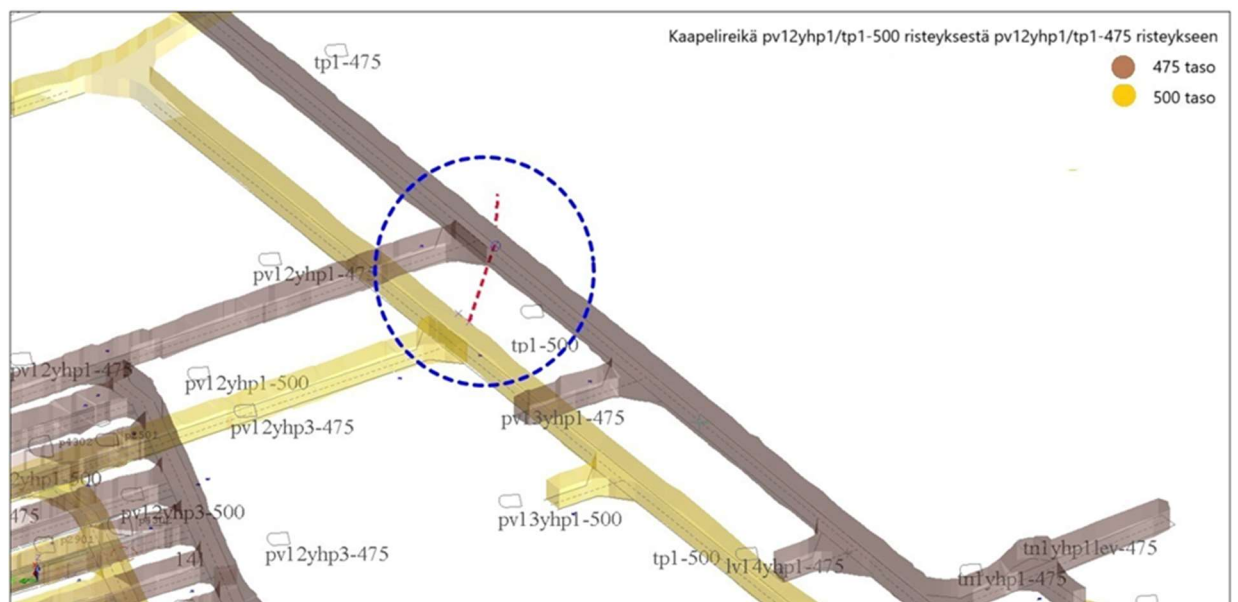
Kuvio 40. Muuntamon komponenttien sijoittelu



## Liite 4 1(5). Kaapelireitti

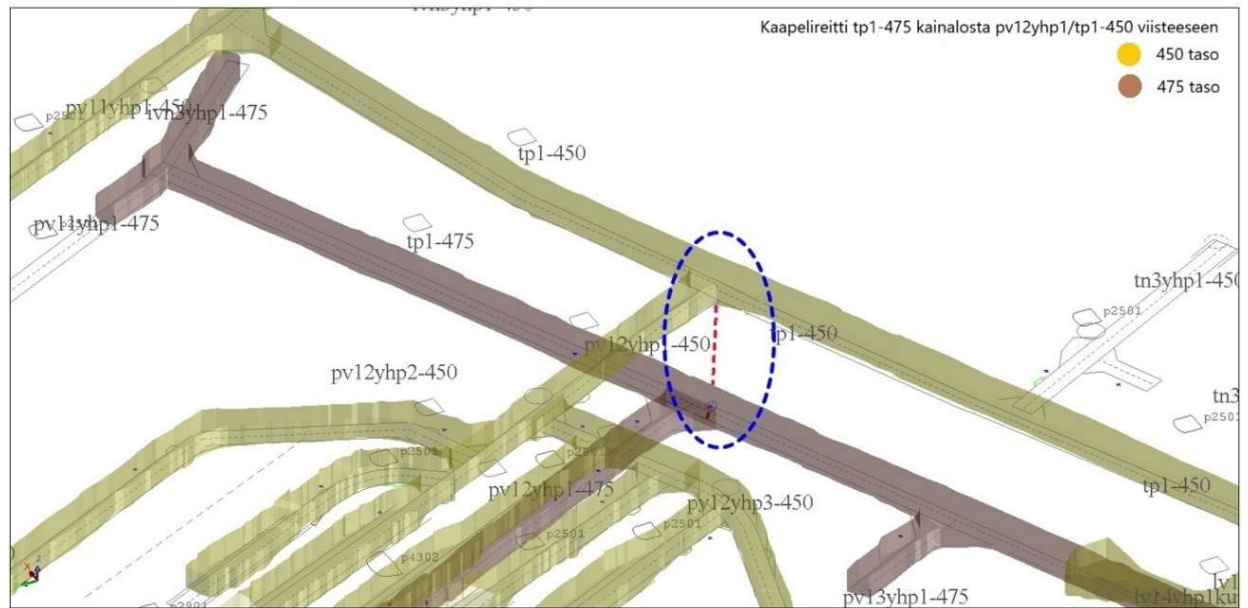


Kuvio 42. 500 louhinnan muuntamolta pv12 risteykseen

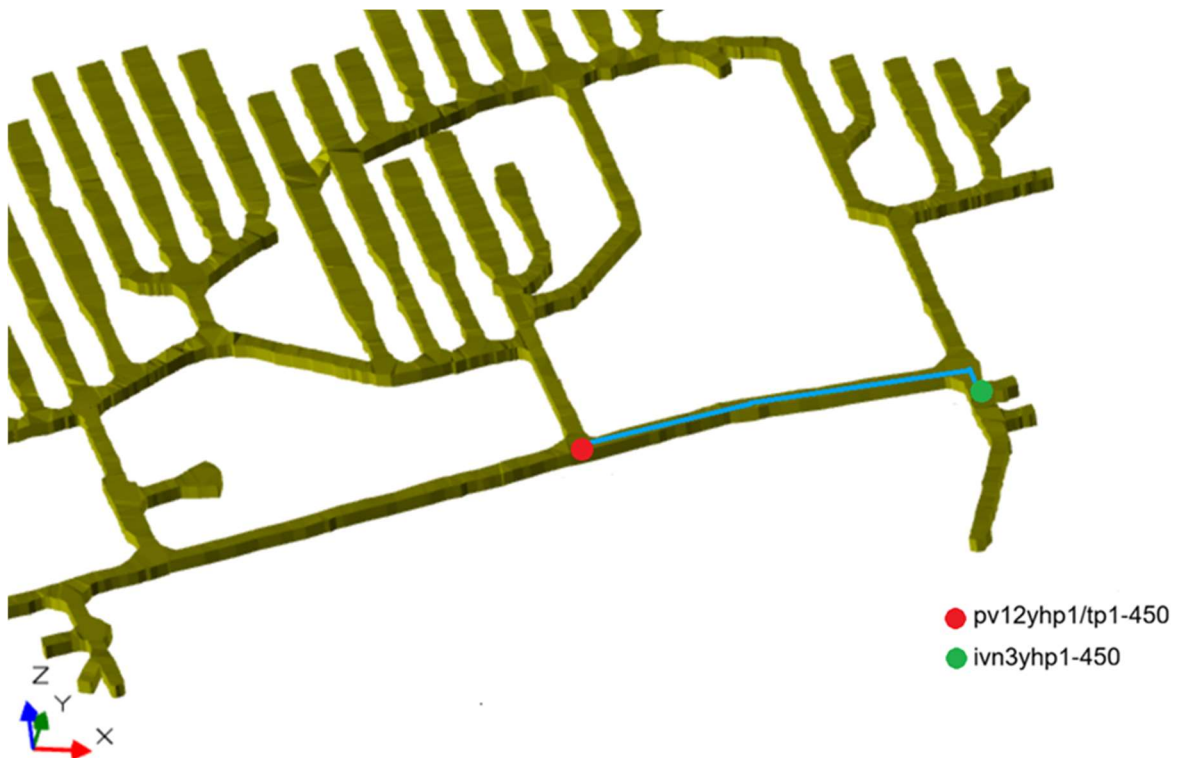


Kuvio 43. Kaapelireitti porareikää pitkin 500 tasolta 475 tasolle

## Liite 4 2(5). Kaapelireitti



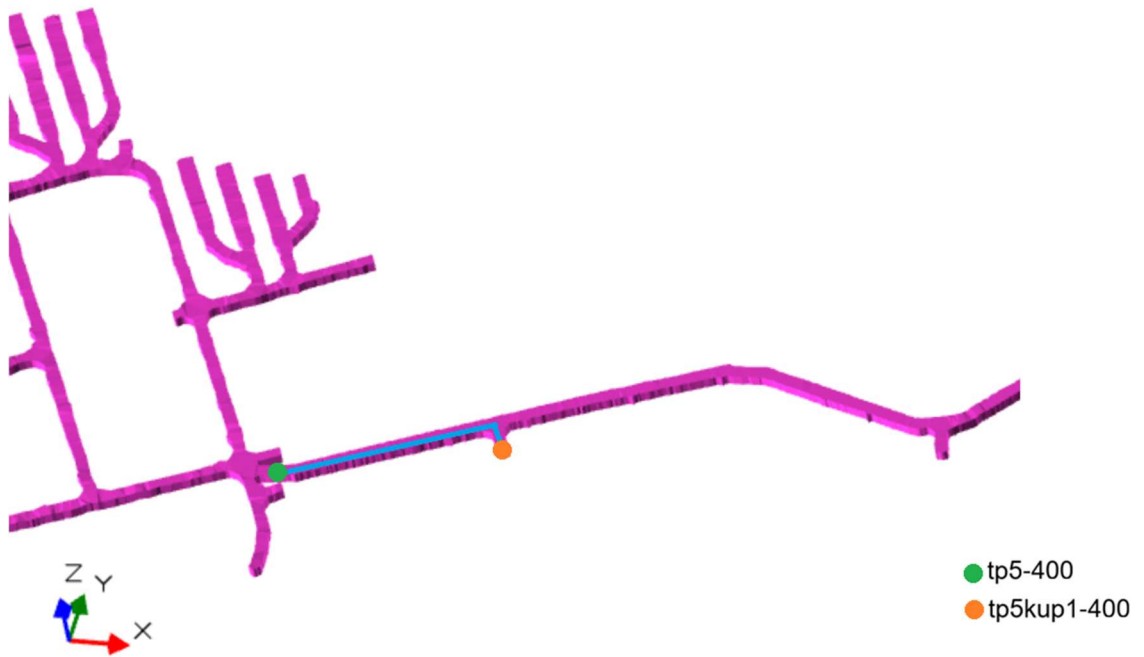
Kuvio 44. Kaapelireitti porareikää pitkin 475 tasolta 450 tasolle



Kuvio 45. Kaapelireitti 450 tasoperää pitkin ivn3:selle

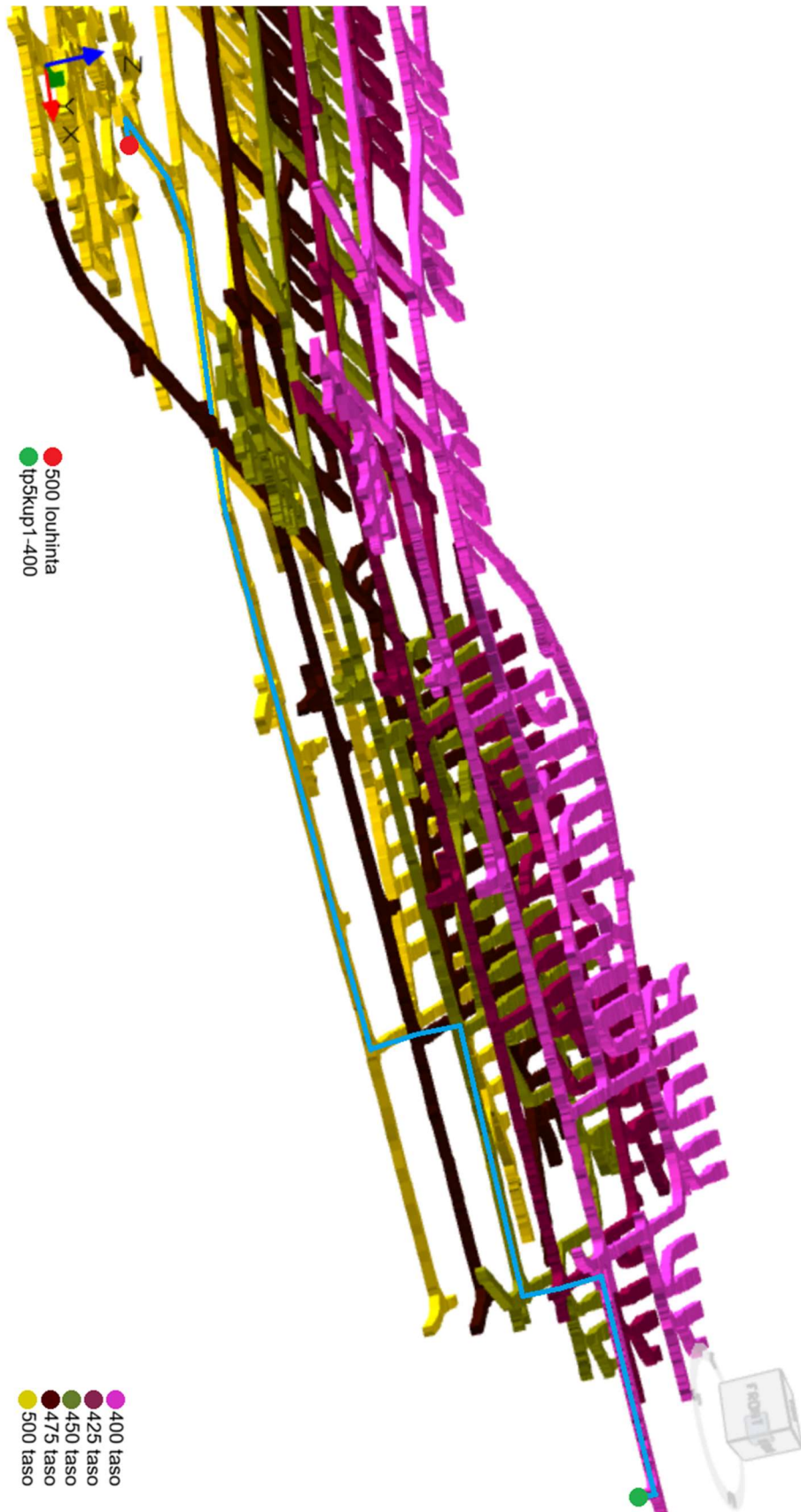


## Liite 4 4(5). Kaapelireitti



Kuvio 48. tp5-400 lähtevä kaapelireitti tp5kup1-400 muuntamolle

## Liite 4 5(5). Koko kaapelireitti



Kuvio 49. Keskiännitesyötön koko kaapelireitti

## Liite 5 1(4). Oikosulkulaskelmat 400 muuntamo

Oikosulkuvirta laskelmat 400 muuntamo	$L_{1km} := 0.35 \cdot 10^{-3}$	$R_{1km} := 0.162$	$f := 50$
$S_N := 1600 \cdot 10^3$	$U_{N1} := 20 \cdot 10^3$	$U_{N2} := 690$	$z_k := 0.06$
$S_{kPT1} := 506 \cdot 10^6$	$I_{kPT1} := 14.6 \cdot 10^3$	$S_{k500} := 357 \cdot 10^6$	$L_{690} := 0.23 \cdot 10^{-3}$
			$R_{690} := 0.125$
Impedanssin laskeminen 500 louhinta			
$Z_{k500} := \frac{U_{N1}^2}{S_{k500}} = 1.12$	Impedanssi 500 louhinnan muuntamolla		
Lasketaan kaapelin impedanssi (AHXAMK-W 3X185)			
$X_{1km} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{1km} = 0.11$	Kaapelin reaktanssi 1km		
$Z_{1km} := \sqrt{R_{1km}^2 + X_{1km}^2} = 0.2$	Kaapelin impedanssi 1km		
3 vaiheinen oikosulkuvirta 400 muuntamolla (ensiö minimi ja maksimi)			
$I_{k3min} := \frac{1 \cdot U_{N1}}{\sqrt{3} \cdot (Z_{k500} + Z_{1km})} = 8.8 \cdot 10^3$	8.8 <u>kA</u> MIN		
$I_{k3max} := \frac{1.1 \cdot U_{N1}}{\sqrt{3} \cdot (Z_{k500} + Z_{1km})} = 9.65 \cdot 10^3$	9.65 <u>kA</u> MAX		
$Z_{kv} := \frac{U_{N1}}{\sqrt{3} \cdot I_{k3max}} \cdot \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}}\right)^2 = 0.001$	Syöttävän verkon impedanssi alajännitepuolelle redusoituna		
$Z_m := z_k \cdot \frac{U_{N1}^2}{S_N} \cdot \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}}\right)^2 = 0.018$	Muuntajan impedanssi alajännitepuolelle redusoituna		
$I_{k3t} := \frac{1.05 \cdot U_{N2}}{\sqrt{3} \cdot (Z_{kv} + Z_m)} = 21.7 \cdot 10^3$	Toisiopuolen 3 vaiheinen oikosulkuvirta 21.7 <u>kA</u>		
Kaapelimatka muuntajalta pienjännitekeskukselle 690 V on noin 30m. Kaapeli on AMCMK 3x240 tupla kaapeloinnilla			
$X_{30m} := \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{690} \cdot 0.03}{2} = 0.001$	Tuplasyötön reaktanssi 30m		
$R_{30m} := \frac{R_{690} \cdot 0.03}{2} = 0.002$	Tuplasyötön resistanssi 30m		
$Z_{30m} := \sqrt{R_{30m}^2 + X_{30m}^2} = 0.002$	Tuplasyötön impedanssi 30m		
Jatkuu..			

Kuvio 50. Kolmivaiheinen oikosulkuvirta minimi ja maksimi kojeistolla sekä muuntajan toisiopuolen kolmivaiheinen oikosulkuvirta

## Liite 5 2(4). Oikosulkulaskelmat 400 muuntamo

$$I_{kkeskus} := \frac{1.05 \cdot U_{N2}}{\sqrt{3} \cdot (Z_{kv} + Z_m + Z_{30m})} = 19.5 \cdot 10^3 \quad \text{Keskuksen oikosulkuvirta } 19.5 \text{ kA}$$

Lasketaan ryhmäjohdon 1 vaiheinen oikosulkuvirta kauimmaisessa pisteessä tp5-400. Kaapelimatka noin 600m. Laskennassa on käytetty kahta vaihejohdinta.

$$R_{400m} := R_{690} \cdot 0.6 = 0.075$$

$$X_{400m} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{690} \cdot 0.6 = 0.043$$

$$Z_{400m} := \sqrt{R_{400m}^2 + X_{400m}^2} \cdot 2 = 0.173$$

$$I_{k400m} := \frac{0.95 \cdot U_{N2}}{\sqrt{3} \cdot (Z_{kv} + Z_m + Z_{30m} + Z_{400m})} = 1.94 \cdot 10^3 \quad \text{Oikosulkuvirta } 1.94 \text{ kA}$$

Lasketaan ryhmäjohdon pisin matka, että 250 gG sulake toimii vielä 5s. Verkko luokitellaan jakeluverkoksi, jolloin yli 63A sulakkeen pienin oikosulkuvirta on 3xIn. Laskennassa täytyy käyttää vähintään 40 asteen johdin lämpötilaa. Maajohdin on 72cu.

$$I_{kgG250} := 250 \cdot 3 \quad R_{40} := 0.127 \quad (40 \text{ astetta}) \quad I_{kgG250b} := 1650$$

$$Z_{krj} := \frac{0.95 \cdot U_{N2}}{\sqrt{3} \cdot I_{kgG250}} = 0.505 \quad Z_k := \frac{0.95 \cdot U_{N2}}{\sqrt{3} \cdot I_{kkeskus}} = 0.019 \quad l_{40} := \frac{Z_{krj} - Z_k}{2 \cdot R_{40}} = 1.91$$

Pisin kaapelimatka 3xIn olisi noin 1900m johdinlämpötila 40 astetta.

$$Z_{krj2} := \frac{0.95 \cdot U_{N2}}{\sqrt{3} \cdot I_{kgG250b}} = 0.229 \quad l_{1650} := \frac{Z_{krj2} - Z_k}{2 \cdot R_{40}} = 0.827$$

Kaapelimatka jotta oikosulkuvirta pysyy standardin vaaditussa arvossa 250gG sulakkeella, joka on 1650 A/5s. Kaapelipituus tällöin olisi noin 800m

Kuvio 51. Kauimmaisen pisteen oikosulkuvirta ja pisin kaapelimatka, että oikosulkuvirrat täyttyvät

## Liite 5 3(4). Oikosulkulaskelmat 400 muuntamo

Dynaaminen oikosulkuvirta laskelmat

$$S_{kPT1} := 506 \cdot 10^6 \quad U_{N1} := 20 \cdot 10^3 \quad U_{N2} := 690 \quad I_{kPT1} := 14.6 \cdot 10^3 \quad f := 50$$

$$I_{k3400} := 9.65 \cdot 10^3 \quad I_{N2} := 1338 \quad P_k := 13 \cdot 10^3 \quad S_N := 1.6 \cdot 10^6 \quad z_k := 0.06$$

$$Z_{kv} := \frac{U_{N1}^2}{S_{kPT1}} = 0.791 \quad I_{kt} := 21.698 \cdot 10^3 \quad \text{syöttävän verkon impedanssi}$$

Erotetaan syöttävän verkon impedanssista resistanssi ja reaktanssi

$$R_{kv} := Z_{kv} \cdot 0.1 = 0.079 \quad \text{resistanssi}$$

$$X_{kv} := Z_{kv} \cdot 0.995 = 0.79 \quad \text{reaktanssi}$$

Lasketaan kaapelien resistanssit ja reaktanssit (kaapelimatka noin 3km)

$$R_{3km} := 0.162 \cdot 3 \quad L_{3km} := 0.35 \cdot 10^{-3} \cdot 3$$

Lasketaan kaapelin reaktanssi

$$X_{3km} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{3km} = 0.33 \quad \text{kaapelin reaktanssi 3 km}$$

$$X_{kok} := X_{kv} + X_{3km} = 1.12 \quad \text{reaktanssi 3 km}$$

$$R_{kok} := R_{kv} + R_{3km} = 0.57 \quad \text{resistanssi 3 km}$$

$$X_{N2} := \frac{X_{kok}}{\left(\frac{U_{N1}}{U_{N2}}\right)^2} = 0.0013 \quad R_{N2} := \frac{R_{kok}}{\left(\frac{U_{N1}}{U_{N2}}\right)^2} = 0.00067 \quad \text{arvot toisipuolella}$$

Sysäysvirran kertoimen k laskeminen

$$k := \frac{R_{kok}}{X_{kok}} = 0.51 \quad k_2 := 1.02 + 0.98^{-3 \cdot 0.506} = 2.05$$

Ratkaistaan sysäysoikosulkuvirta 400 kojeistolla

$$I_p := k_2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k3400} = 28 \cdot 10^3 \quad \text{sysäysoikosulkuvirta kojeisto 28 kA}$$

Ratkaistaan sysäysoikosulkuvirta pienjännitekeskuksella, jossa laskentaan lisätään muuntajan resistanssi ja reaktanssi

$$r_k := \frac{P_k}{S_N} = 0.008 \quad x_k := \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = 0.059 \quad X_k := x_k \cdot \frac{U_{N2}^2}{S_N} = 0.018$$

$$R_k := r_k \cdot \frac{U_{N2}^2}{S_N} = 0.002 \quad X_{kok2} := X_k + X_{N2} = 0.019 \quad R_{kok2} := R_k + R_{N2} = 0.003$$

$$k_2 := \frac{R_{kok2}}{X_{kok2}} = 0.162 \quad k_{22} := 1.02 + 0.98^{-3 \cdot 0.162} = 2.03$$

$$I_{p2} := k_{22} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{kt} = 62.3 \cdot 10^3 \quad \text{sysäysoikosulkuvirta pienjännitekeskus 62.3 kA}$$

Kuvio 52. Dynaaminen oikosulkuvirta kojeistolla ja pienjännitekeskuksella

## Liite 5 4(4). Oikosulkulaskelmat 400 muuntamo

Kojeistolla oli ilmoitettuna 3s arvot, jotka tarkoittavat termisen oikosulkuvirran kestoisuutta. Termisen oikosulkuvirran arvot m ja n saadaan kuvioista 11 ja 12. Generaattoreita ja moottoreita ei laskennassa huomioida.

Lasketaan ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta keskijännitekojeistolla

$$I_{th3sK} := I_{k3400} \cdot \sqrt{0.08 + 1} = 10 \cdot 10^3 \quad \text{terminen oikosulkuvirta } 10 \text{ kA}$$

Lasketaan ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta pienjännitekojeistolla

$$I_{th3sP} := I_{kt} \cdot \sqrt{0.08 + 1} = 22.5 \cdot 10^3 \quad \text{terminen oikosulkuvirta } 22.5 \text{ kA}$$

Kuvio 53. Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta keskijännitekojeistolla ja pienjännitekojeistolla

## Liite 6. Kaapeleiden kuormitettavuudet

Lasketaan keskijännitekaapelin AHXAMK-W 3x185 kuormitettavuus. Standardien mukainen kuormitettavuus ilma-asennuksessa oli 340 A PEX/90 °C.		
Kuormitettavuuteen tulevat korjauskertoimet: -ympäristön lämpötila 25 °C kerroin 1 -tikashyllyillä 3 kaapelia vierekkäin seinää vasten 0.80		
$K_1 := 340 \cdot 0.8 = 272$		kaapelin kuormitettavuus
Kaapelin kuormitettavuudeksi jää 272 A, joka riittää releasettelulle (>215 A/0.8s).		
Lasketaan pienjännitekeskuksen syöttökaapeli AMCMK 3x240 kuormitettavuudet. Asennustavaksi tuli C yksi- tai monijohdin kaapelit seinäpinnalla PEX eristeisenä. Lähtöarvo oli kaapelille 382A johtimen lämpötilassa 90 astetta ja ilman 30 astetta.		
Kuormitettavuuden tulevat korjauskertoimet: -ympäristön lämpötila 15 °C kerroin 1,12 -yhdessä kerroksessa seinällä neljä kaapelia kerroin 0.75		
$K_2 := 382 \cdot 1.12 \cdot 0.75 = 320.88$	$K_2 \cdot 2 = 641.76$	kuormitettavuus keskuksen tupla syötölle
Lasketaan ryhmäjohdon kuormitettavuus sulakkeena 250 gG. Asennustavaksi tuli C yksi- tai monijohdin kaapeli seinäpinnalla PEX eristeisenä ja kaapelina AMCMK 3x240. Lähtöarvo 382A, johdinlämpötila 90 astetta ja ilman 30 astetta.		
Kuormitettavuuteen tulevat korjauskertoimet: -ympäristön lämpötila 15 °C korjauskerroin 1,12 -yhdessä kerroksessa seinällä 5 kaapelia 0,73		
$K_3 := 382 \cdot 1.12 \cdot 0.73 = 312.323$		kuormitettavuus ryhmäjohtolle

Kuvio 54. Kaapeleiden kuormitettavuudet

## Liite 7 1(4) Jännitteenalenema

Lasketaan jännitteenalenema keskijännitejohdolla 400 muuntajalle ja pienjännitejohdolla kauimmaiseen pisteeseen asti oletetulla kuormalla porakone ja puhallin 180 kW.

$$U_{N1} := 20 \cdot 10^3 \quad U_{N2} := 690 \quad f := 50 \quad S_N := 1 \cdot 10^6 \quad z_k := 0.06 \quad P_k := 13 \cdot 10^3$$

$$\cos\varphi := 0.8 \quad \sin\varphi := \sqrt{1 - 0.8^2} \quad I := 470 \quad \mu := \frac{19.475}{0.69} = 28.225 \quad S_{N2} := 1600 \cdot 10^3$$

Muuntajan jännitteenaleneman laskeminen 1000 kVA (500 louhinta)

$$r_k := \frac{P_k}{S_N} = 0.013 \quad x_k := \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = 0.059 \quad \mu_2 := \frac{U_{N1}}{U_{N2}} = 28.99$$

$$X_k := x_k \cdot \frac{U_{N2}^2}{S_N} = 0.028 \text{ reaktanssi toisiossa} \quad R_k := r_k \cdot \frac{U_{N2}^2}{S_N} = 0.006 \text{ resistanssi toisiossa}$$

Lasketaan jännitteen alenema muuntajassa 450 kW kuormalla

$$U_h := (I \cdot \cos\varphi \cdot R_k + I \cdot \sin\varphi \cdot X_k) = 10.2 \quad \text{alenema vaihetta kohti } 10.2V$$

$$U_{h2} := U_h \cdot \sqrt{3} = 17.7 \quad \text{pääjännitteellinen alenema } 17.7V$$

Mitattu jännite toisiossa oli 684 V, lasketaan ensiöpuolen jännite 20 kV (käämi asetus 19.475/0.69)

$$U_t := 684 + U_{h2} = 701.7 \quad \text{korjattu toisiojännite} \quad U_{N12} := U_t \cdot \mu = 19.8 \cdot 10^3 \quad \text{ensiöjännite}$$

Lasketaan keskijännitekaapelin AHXAMK-W 3x185 reaktanssi:

$$R_{1km} := 0.162 \quad L_{1km} := 0.35 \cdot 10^{-3}$$

Lasketaan reaktanssi kaapelille

$$X_{1km} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{1km} = 0.11 \quad \text{Reaktanssi on 0.11 ohmia kilometri}$$

Lasketaan jännitteenalenema alkuaajan todellisella kuormalla 400 tp5 180 kW.

$$P := 180 \cdot 10^3 \quad \cos\varphi_2 := 0.95 \quad \sin\varphi_2 := \sqrt{1 - 0.95^2} \quad \tan\varphi := \frac{\sqrt{1 - 0.9^2}}{0.9}$$

$$I_{690} := \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_{N2} \cdot \cos\varphi_2} = 158.5 \quad \text{virta pienjännitepuolella } 158.5 \text{ A}$$

Redusoidaan ensiöpuolelle

$$I_{20} := I_{690} \cdot \frac{0.69}{20} = 5.5 \quad \text{virta ensiö redusoituna } 5.5 \text{ A}$$

Lasketaan kyseisellä kuormalla alenema keskijännitekaapelissa

$$U_{h20kV} := \sqrt{3} \cdot I_{20} \cdot (R_{1km} \cdot \cos\varphi_2 + X_{1km} \cdot \sin\varphi_2) = 1.8 \quad \text{alenema } 1.8 \text{ V}$$

Jatkuu..

Kuvio 55. Jännitteenalenema 400 muuntamolle ja ryhmäjohton kauimmaiseen pisteeseen oletetulla kuormituksella 1

## Liite 7 2(4) Jännitteenalenema

$U_{h2} := \frac{P}{U_{N1}^2} (1 \cdot R_{1km} + 1 \cdot X_{1km} \cdot \tan\varphi) \cdot 100 = 0.01$	alenemaprocentti 20 kV
400 muuntajan (1600 kVA) suhteellisessa oikosulkuresistanssissa ja reaktanssissa jännitteenalenema kuormalla	
$r_{k2} := \frac{P_k}{S_{N2}} = 0.008 \quad x_{k2} := \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = 0.059$	$\mu_{22} := \frac{U_{N1}}{U_{N2}} = 28.99$
$X_{k2} := x_k \cdot \frac{U_{N2}^2}{S_{N2}} = 0.02$	reaktanssi <u>toisiossa</u> $R_{k2} := r_k \cdot \frac{U_{N2}^2}{S_{N2}} = 0.004$ resistanssi <u>toisiossa</u>
Lasketaan jännitteen alenema muuntajassa kuormalla	
$U_{hm} := (I_{690} \cdot \cos\varphi \cdot R_{k2} + I_{690} \cdot \sin\varphi \cdot X_{k2}) = 2.15$	alenema vaihetta kohti 2.15V
$U_{hm2} := U_{hm} \cdot \sqrt{3} = 3.72$	pääjännitteellinen alenema 3.72V
Lähtöjännite kuormalla, jolla lähdetään laskemaan ryhmäjohdon jännitteenalenemaa	
$U_{Na} := \frac{U_{N12} - U_{h20kV}}{\mu_2} - U_{hm2} = 679.5$	toisiojännite vakioasetuksella
$U_{Nb} := U_{Na} \cdot 1.025 = 696.4$	-2.5% asetuksella
$U_{Nc} := U_{Na} \cdot 1.05 = 713.4$	-5% asetuksella
Lasketaan nyt ryhmäjohdon kauimmaiseen päähän jännitteenalenema	
$R_{690} := 0.125 \quad L_{690} := 0.13 \cdot 10^{-3} \quad X_{690} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{690} = 0.041$	
$R_{400} := R_{690} \cdot 0.6 = 0.075$	ryhmäjohdon resistanssi 600m
$X_{400} := X_{690} \cdot 0.6 = 0.025$	ryhmäjohdon reaktanssi 600m
$R_{kes} := \frac{R_{690} \cdot 0.03}{2} = 0.002$	resistanssi keskukselle 30m
$X_{kes} := \frac{X_{690} \cdot 0.03}{2} = 0.001$	reaktanssi keskukselle 30m
$X_{kok} := X_{400} + X_{kes} = 0.025$	$R_{kok} := R_{400} + R_{kes} = 0.077$
$U_{h690} := \sqrt{3} \cdot I_{690} \cdot (R_{kok} \cdot \cos\varphi_2 + X_{kok} \cdot \sin\varphi_2) = 22.2$	alenema 22.2 V
$U_{toda} := U_{Na} - U_{h690} = 657.2$	jännite kuormalla johdon päässä vakio asetus
$U_{todb} := U_{Nb} - U_{h690} = 674.2$	jännite kuormalla johdon päässä -2.5%
$U_{todc} := U_{Nc} - U_{h690} = 691.2$	jännite kuormalla johdon päässä -5%

Kuvio 56. Jännitteenalenema 400 muuntamolle ja ryhmäjohdon kauimmaiseen pisteeseen oletetulla kuormituksella 2

## Liite 7 3(4) Jännitteenalenema

Lasketaan jännitteenalenema 30%, 50% ja 70% muuntajan kuormituksella keskijännitekaapelissa

$$S_{N30} := S_{N2} \cdot 0.30 = 480 \cdot 10^3 \quad S_{N50} := S_{N2} \cdot 0.50 = 800 \cdot 10^3 \quad S_{N70} := S_{N2} \cdot 0.70 = 1.12 \cdot 10^6$$

30% 
$$I_{30} := \frac{S_{N30}}{\sqrt{3} \cdot U_{N12} \cdot \cos\varphi_2} = 14.7$$

$$\Delta U_{30} := \sqrt{3} \cdot I_{30} \cdot (R_{1km} \cdot \cos\varphi_2 + X_{1km} \cdot \sin\varphi_2) = 4.8$$
 Jännitteen alenema 4.8V

50% 
$$I_{50} := \frac{S_{N50}}{\sqrt{3} \cdot U_{N12} \cdot \cos\varphi} = 29.153$$

$$\Delta U_{50} := \sqrt{3} \cdot I_{50} \cdot (R_{1km} \cdot \cos\varphi_2 + X_{1km} \cdot \sin\varphi_2) = 9.5$$
 Jännitteen alenema 9.5V

70% 
$$I_{70} := \frac{S_{N70}}{\sqrt{3} \cdot U_{N12} \cdot \cos\varphi} = 40.815$$

$$\Delta U_{70} := \sqrt{3} \cdot I_{70} \cdot (R_{1km} \cdot \cos\varphi_2 + X_{1km} \cdot \sin\varphi_2) = 13.3$$
 Jännitteen alenema 13.3V

$$P_m := U_{N1} \cdot I_{70} \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\varphi_2 = 1.343 \cdot 10^6$$

$$U_{h70} := \frac{P_m}{U_{N1}^2} (1 \cdot R_{1km} + 1 \cdot X_{1km} \cdot \tan\varphi) \cdot 100 = 0.07$$
 alenemaprocentti 70% kuormituksella 0.07%

Kuvio 57. Jännitteenalenema keskijännitejohdossa muuntajan eri kuormituksilla

## Liite 7 4(4) Jännitteenalenema

Lasketaan lähtöjännite 400 muuntamon toisiopuolelle ja mahdollinen tarvittava ensiökäämin jänniteasetuksen muutos (kuorma 450 kW oli tarkasteluhetkellä)

$$U_{N1} := 20 \cdot 10^3 \quad U_{N2} := 690 \quad f := 50 \quad S_N := 1 \cdot 10^6 \quad z_k := 0.06 \quad P_k := 13 \cdot 10^3$$

$$\cos\varphi := 0.8 \quad \sin\varphi := \sqrt{1 - 0.8^2} \quad I := 470 \quad \mu := \frac{19.475}{0.69} = 28.225 \quad S_{N2} := 1600 \cdot 10^3$$

Muuntajan 1000 kVA suhteellinen oikosulkuresistanssi ja reaktanssi (500 louhinta)

$$r_k := \frac{P_k}{S_N} = 0.013 \quad x_k := \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = 0.059 \quad \mu_2 := \frac{U_{N1}}{U_{N2}}$$

$$X_k := x_k \cdot \frac{U_{N2}^2}{S_N} = 0.028 \quad \text{reaktanssi toisiossa } R_k := r_k \cdot \frac{U_{N2}^2}{S_N} = 0.006 \quad \text{resistanssi toisiossa}$$

Lasketaan jännitteen alenema muuntajassa 450 kW kuormalla

$$U_h := (I \cdot \cos\varphi \cdot R_k + I \cdot \sin\varphi \cdot X_k) \cdot \sqrt{3} = 17.652 \quad \text{alenema muuntajassa kuormalla } 17.7V$$

Mitattu jännite toisiossa oli 684V, lasketaan ensiöpuolen jännite (käämi asetus 19.475/0.69)

$$U_t := 684 + U_h = 701.652 \quad \text{korjattu toisiojännite} \quad U_{N12} := U_t \cdot \mu = 19.804 \cdot 10^3 \quad \text{ensiöjännite}$$

Lasketaan mikä olisi kuormaton lähtöjännite toisiopuolella 690 V. Muuntaja 20 kV +2x2.5%,-2x2.5%/0.69 kV, eli molempiin suuntiin ensiöjännitteen säätö 2x2.5%

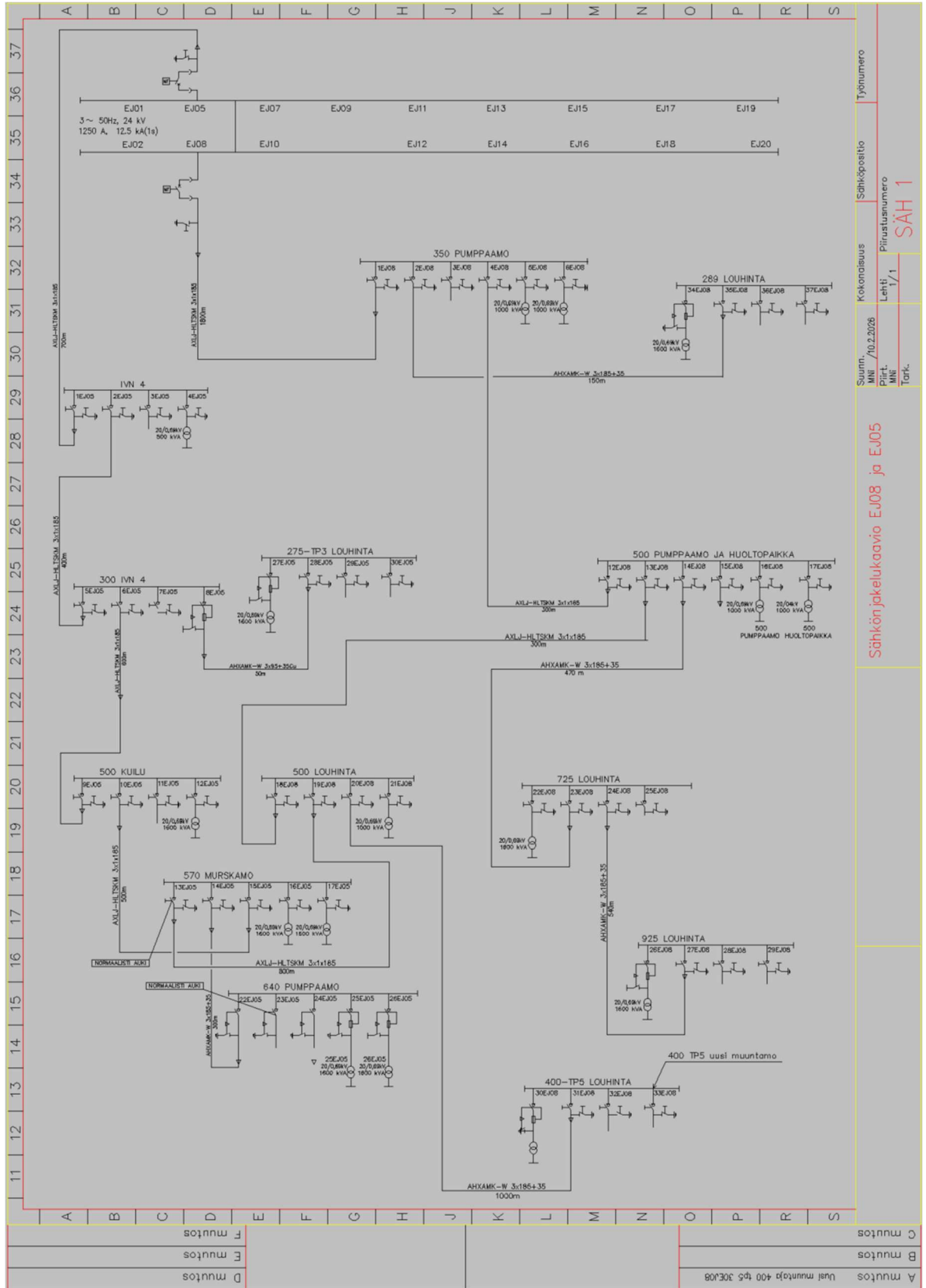
$$U_{690a} := \frac{U_{N12}}{\mu_2} = 683.2 \quad \text{jänniteasetus vakio}$$

$$U_{690b} := U_{690a} \cdot 1.025 = 700.3 \quad \text{jänniteasetus -2.5\%}$$

$$U_{690c} := U_{690a} \cdot 1.05 = 717.4 \quad \text{jänniteasetus -5\%}$$

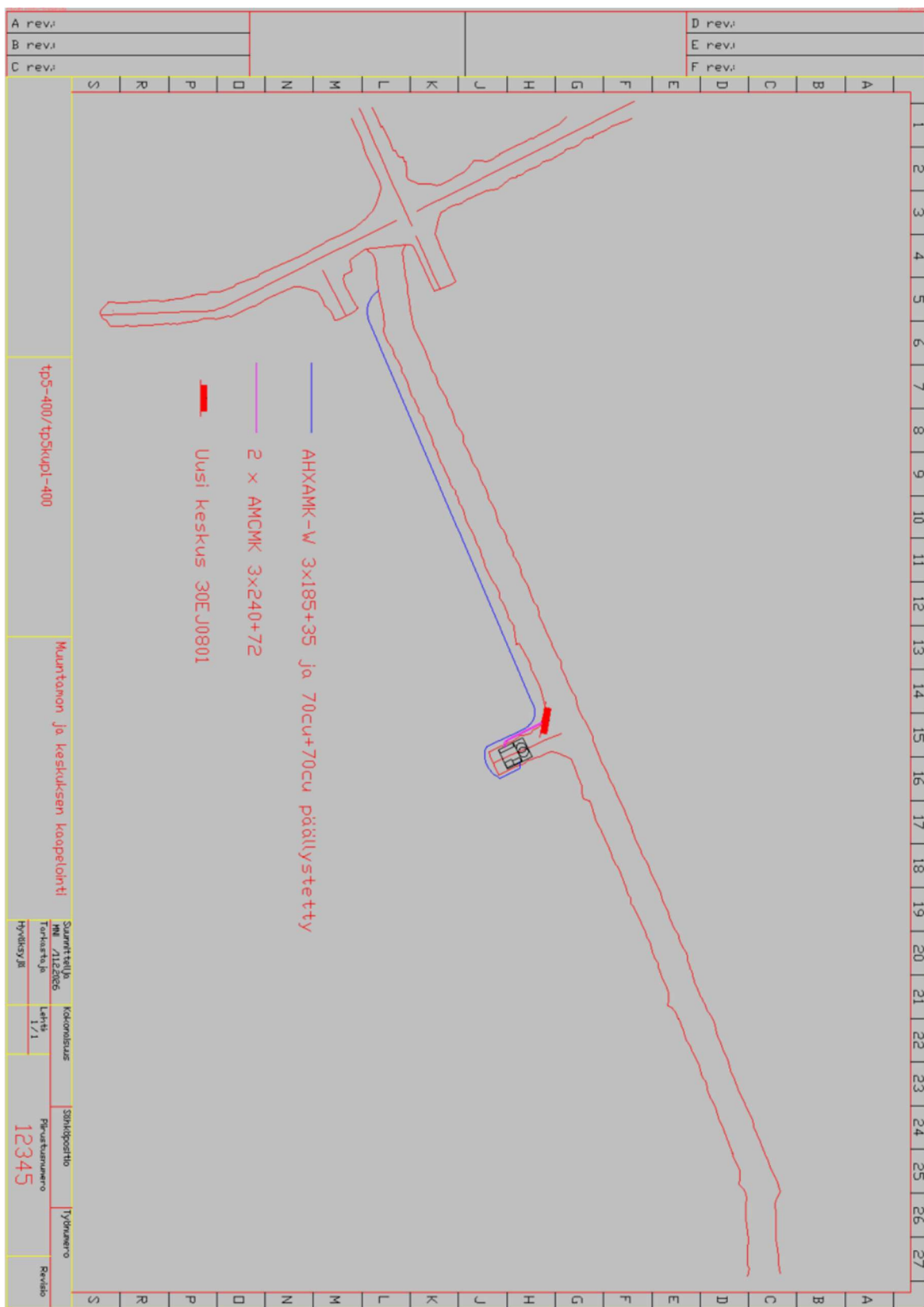
Kuvio 57. 400 muuntajan toisiopuolen kuormittamaton lähtöjännite

Liite 8 1(4). Kaapelien vedot ja kääntö



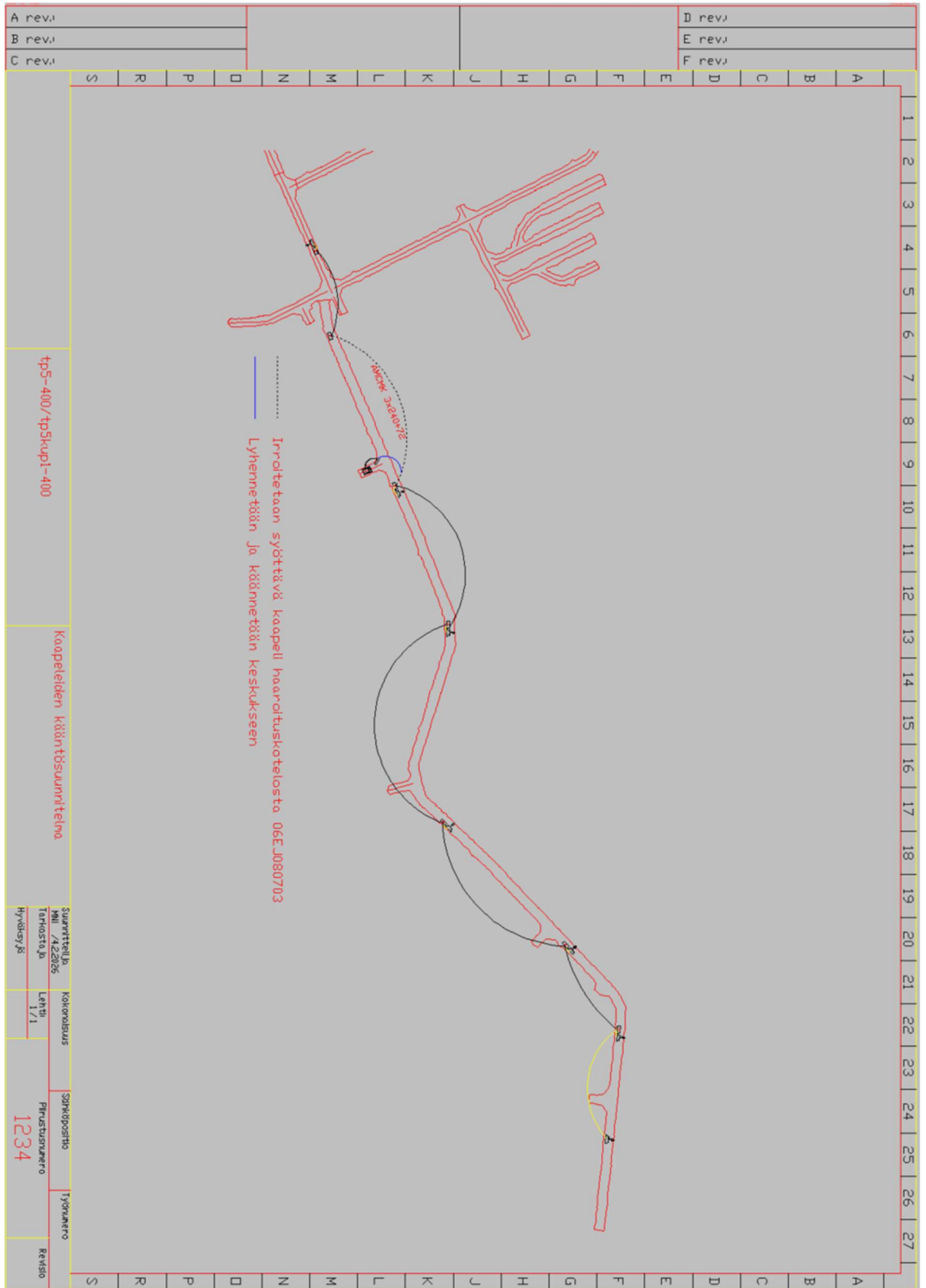
Kuvio 59. Jakelukaavio EJ08 ja EJ05 sekä uuden muuntajan syöttö

## Liite 8 2(4). Kaapelien vedot ja kääntö



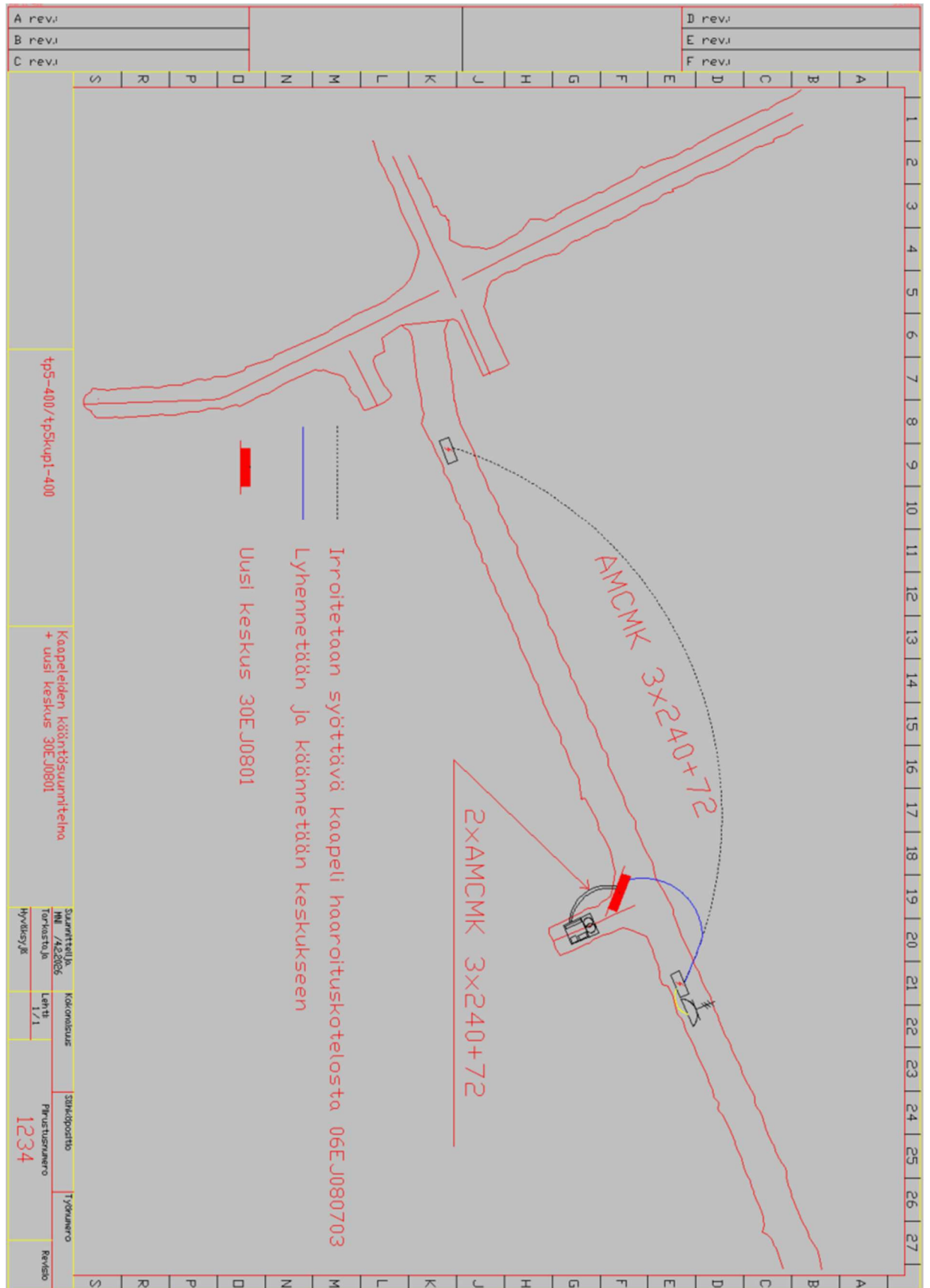
Kuvio 60. Muuntamon ja keskuksen syötöt

Liite 8 3(4). Kaapelien vedot ja kääntö



Kuva 61. Koko ryhmä ja kaapelin kääntö tp5kup1-400 uudelle keskukselle

## Liite 8 4(4) Kaapelien vedot ja kääntö



Kuvio 62. Kaapelin kääntö tp5kup1-400 uudelle keskukselle

## Liite 9 Keskijänniteosan käyttöönottotarkastuksia

<b>Aistinvaraiset tarkistukset</b>	<u>Kunnossa</u>	<u>Ei kuulu työhön</u>	<b>Testaukset</b>	<u>Kunnossa</u>	<u>Ei kuulu työhön</u>
Dokumentointi sekä käyttö- ja huolto ohjeet			Testaa erottimien toiminta		
Puistomuuntamorakennus varusteineen			Testaa katkaisijoiden toiminta		
Muuntaja asiakirjan mittaukset/tarkastukset			Testaa mahdolliset lukitukset		
Muut dokumenteissa vaaditut mittaukset/tarkastukset			Testaa painikelaukaisu		
Katkaisijoiden tarkastus			Testaa/totea pyörintäsuunta		
Katkaisijoiden asennon osoituksen tarkastus					
Tarkasta erottimet					
SF6 kennojen tarkastus					
Mahdolliset lukitukset			<b>Mittaukset</b>		
Nimellisarvojen tarkastus				<u>Saatu arvo</u>	
Mahdolliset ylijännitesuojat			Suojajohtimen jatkuvuus		
Varokeytkimien ja sulakkeiden tarkastus			Maadoituselektrodi		
Tarkasta työskeneläsuojat			Eristyvästusmittaus		
Tarkasta kosketussuojaus			L1-PEN		
Tarkasta eristimet			L2-PEN		
Tarkasta kipinävälit			L3-PEN		
Kaapeleiden soveltuvuuden ja merkintöjen tarkastus			L1-L2		
Kaapeleiden mekaanisen suojauksen tarkastus			L1-L3		
Kaapeleiden vaipan ja taivutussäteiden tarkastus			L2-L3		
Päätteiden ja niiden kireyden tarkastus			Jännitemittaus alajännite		
Läpivientien tarkastus			L1-PEN		
Maadoitusten tarkastus			L2-PEN		
Laajan maadoitusjärjestelmän tarkastus			L3-PEN		
Tarkasta työmaadoitusvälineet ja niiden paikat			L1-L2		
Tarkasta käyttö ja suojavälineet			L1-L3		
Tarkasta tunnuksat ja merkinnät			L2-L3		
Tarkasta varoituskilvet ja merkinnät					
Tarkasta työvalaistus					
Muita tarkastuksia:					

Kuvio 63. Keskijänniteosaan liittyviä tarkastuksia.