



# **KOULUTUSKÄYTTÖÖN TULEVAN KESKIJÄNNITEVERKON SUUNNITTELU**

Niko Välimäki

Opinnäytetyö  
Maaliskuu 2011  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Sähkövoimatekniikka  
Tampereen ammattikorkeakoulu

VÄLIMÄKI, NIKO: Koulutuskäyttöön tulevan keskijännitelinjan suunnittelu

Opinnäytetyö 43 s, liitteet 11 s.  
Maaliskuu 2011

---

## TIIVISTELMÄ

Tässä opinnäytetyössä pohditaan, miten toteutettaisiin mahdollisimman todenmukainen keskijänniteverkko koulutuskäyttöön. Tämän harjoituskentän avulla on tarkoitus kouluttaa jatkossa verkostoasentajia tuleviin työtehtäviin. Opinnäytetyön tarkoituksena on tarkastella, mitä asioita koulutuskäyttöön tulevassa verkossa tulee ottaa huomioon, ja miten se poikkeaa normaalista jakeluverkko käytössä olevasta verkosta.

Tämä opinnäytetyön tekeminen on aloitettu asemakaavaan perusteella, johon on piirretty harjoituskentänverkkoon alun perin mietittyjä komponentteja, ja pohditaan miten asemakaavan verkko toteutettaisiin. Tässä opinnäytetyössä käsitellään mitä toimenpiteitä tulee ottaa huomioon, jotta jakelujännite 400 voltia voidaan nostaa 20 kilovoltin suuriseksi kytkemällä jakelumuuntaja vastakkaiseen suuntaan toimimaan ns. jännitteenostomuuntajana. Tässä opinnäytetyössä käsitellään harjoituskentän verkon sähkötekniiset laskelmat, ja todistettiin, millä toimenpiteillä harjoituskentänverkko saataisiin toimimaan.

Tässä opinnäytetyössä pohdittiin myös opiskelijan näkökulmasta, minkälaisia käyttötarkoituksia harjoituskentän verkolla voitaisiin toteuttaa. Työn tavoitteena on antaa sen tilaajalle tärkeää tietoa koulutuskäyttöön tulevan keskijänniteverkon toteutuksesta, ja mitä vaatimuksia verkolle on asetettu.

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Electrical Engineering  
Sub-programme of electrical power engineering

VÄLIMÄKI, NIKO: Planning of the one coming into education use high tension network

Bachelor's thesis 43 pages, appendices 11 pages  
March 2011

---

## **ABSTRACT**

In the thesis work there is considered how it is possible to create a realistic high tension network for educational use. The purpose of this educational high tension network is to practice the train network fitters into the future assignments.

The purpose of the thesis work was to examine how the high tension can be carried out into educational use and how it differs from typical network. The dissertation is done according to the city plan. In the final thesis the operations which are used for raising the distribution tension from 400 volts to 20 kilovolts are handled. The distribution is raised by connecting the distribution transformer to the opposite direction to function as a transformer. It is called tension lifting. In the dissertation there are shown the electro technical calculations for the educational high tension network. Also the methods needed for operating the training network were proved.

In the dissertation there is also thought the possibilities for which purposes the educational network can be used. The main target of the work was to give its subscriber important information about the realization of educational high tension network.

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ .....	2
ABSTRACT .....	3
1 JOHDANTO .....	6
2 HARJOITUSKENTÄN VAATIMUKSET .....	7
2.1 Koulutuskäyttöön tuleva keskijänniteverkko .....	7
2.2 Harjoituskentän vaatimukset .....	7
2.3 Harjoituskentän käyttötoimenpiteet .....	8
2.4 Harjoituskentän käyttökytkimet .....	9
2.5 Jännitteen hätäpoiskytkentä.....	10
2.6 Harjoituskentän verkon rakenteelliset vaatimukset.....	11
2.6.1 Ilmajohtojen etäisyysvaatimukset.....	11
2.6.2 Maakaapelin asennus .....	12
3 HARJOITUSKENTÄN MAADOITUKSET .....	13
3.1 Keskijännitekojeiston maadoitukset.....	13
3.2 Muuntamoiden maadoitukset .....	13
3.3 Pylväserottimien maadoitukset.....	14
4 SÄHKÖINEN MITOITTAMINEN .....	15
4.1 Keskijänniteverkon mitoittamisen lähtökohdat.....	15
4.2 Johtojen kuormitettavuus .....	16
4.3 Jännitteenalenema .....	17
4.4 Jännitteennostomuuntajan toiminta .....	18
4.4.1 Jännitteennostomuuntajan kytkentä.....	19
4.4.2 Kytkentävirtasysäyksen rajoittaminen.....	20
4.4.3 Jakelumuuntajien verkkoon kytkentä .....	22
4.5 Keskijänniteverkon oikosulkusuojaus .....	23
4.5.1 Harjoituskentän oikosulkuvirtojen laskenta .....	24
4.5.2 Oikosulkuvirrat jakelumuuntajilla .....	28
4.6 Keskijänniteverkon maasulku .....	29
4.6.1 Maasulkusuojauksen ehdot.....	30
4.6.2 Harjoituskentän maasulkusuojaus .....	30
4.6.3 Sallittu kosketusjännite.....	32
4.6.4 Keskijänniteverkon jälleenkytkennät.....	34
5 HARJOITUSKENTÄN SUOJAKSIEN ASETTELU .....	36
5.1 Mittauksen toteutus .....	36
5.2 Oikosulkusuojauksen asettelu .....	37
5.2.1 Vakioaikareleen toiminta-arvot .....	38

5.3 Maasulkusuojauksen asettelu .....	40
6 HARJOITUSKENTÄN KÄYTTÖTARKOITUS .....	41
7 Yhteenveto .....	42
LÄHTEET .....	43
LIITTEET .....	44

# 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää, mitä asioita tulisi ottaa huomioon, kun rakennetaan keskijänniteverkkoa koulutuskäyttöön. Opinnäytetyössä pohditaan, miten toteutetaan normaalin jakeluverkon jännitteennosto yleisimmin Suomessa käytettävään keskijänniteverkon jännitteelle, käyttämällä jakelumuuntajaa vastakkaiseen suuntaan. Tärkeänä osana opinnäytetyötä on myös verkonsuojauksien toteutus harjoituskentällä, jotta mahdolliset vikatilanteet ei aiheuttaisi vaaraa harjoituskentän opiskelijoille eikä ulkopuolisille. Opinnäytetyössä tarkastellaan teknisiä laskenta-arvoja, ja miten asetella suojausten toiminta. Työssä käydään myös läpi verkon maadoitusten toteutus.

Opinnäytetyö on rajattu käsittelemään asioita, jotka tulee ottaa huomioon keskijänniteverkossa, ja sen rakentamisessa. Opinnäytetyö on tehty liitteen 1 olevan asemakaavan pohjalta, ja se on rajattu keskijänniteverkon osalle, koska pienjännite verkon rakennuksesta tehdään vastaavanlainen opinnäytetyö.

Opinnäytetyön tavoitteena on antaa sen tilaajalle käyttökelpoisia ehdotuksia verkon toteutuksesta, ja pohtia mitä asioita tulisi ottaa huomioon verkon suunnitteluvaiheessa. Opinnäytetyössä pohditaan opiskelijan näkökulmasta, minkälaiset koulutustilanteet sopisivat harjoituskentän verkolle, ja millaisia harjoituksia olisi hyvä toteuttaa sen avulla. Harjoituskentän tavoitteena on saada aikaan mahdollisimman monenlaisia tilanteita, mitkä tulisivat vastaan normaalin jakeluverkon kunnossapidossa, saneerausessa ja vianhoidossa.

## **2 HARJOITUSKENTÄN VAATIMUKSET**

### **2.1 Koulutuskäyttöön tuleva keskijänniteverkko**

Tampereen aikuiskoulutuskeskus on päättänyt rakentaa uuden rakennuksen nykyisten tilojen yhteyteen, jossa on tarkoituksena kouluttaa tulevaisuudessa verkostoasentajia. Tämän lisärakennuksen yhteyteen on tarkoitus rakentaa mahdollisimman todenmukainen jakeluverkko. Missä olisi Suomessa yleisimmin käytössä olevat jännitetasot, ja verkossa olevat laitteet ja komponentit. Komponenttien ja johtimien valinnassa on pyritty käyttämään vastaavia mitä Suomen jakeluverkossa käytetään.

Opinnäytetyössä tarkoituksena on pohtia komponenttien valintaa, ja tutkia komponenttien soveltuvuutta käyttökohteeseen, ja mitä toimenpiteitä tulee harjoituskentänverkolle tehdä, että se toimisi sen käyttötarkoituksessa. Tarkoituksena on myös pohtia tilanteita, ja käyttökohteita mitä harjoituskentän verkolla voisi toteuttaa.

### **2.2 Harjoituskentän vaatimukset**

Harjoituskenttä ja siihen liittyvä kojeisto luokitellaan sähkölaboratorioksi, ja sen käytössä on noudatettava sähkölaboratoriolle asetettuja turvallisuusvaatimuksia. Keskijännitekojeistoon ja siihen liittyvän harjoituskentän käyttö on järjestettävä niin, ettei sinne ole vapaata pääsyä. Eikä sitä ole mahdollista kytkeä käyttöön ilman opetuksesta vastaavan henkilön lupaa. Aina kun harjoituskenttää kytketään käyttöön tai sitä käytettäessä on sen valvonta järjestettävä vastuussa olevan henkilön toimesta.(SFS-6000, 2007)

Harjoituskentällä opiskelevien henkilöiden kanssa, pitää käydä läpi ennen töiden aloittamista alueella olevien laitteiden toiminta, ja miten toimia vaaratilanteissa. Opiskelijoille tulee opastaa, verkon hätä- poiskytkentä, ja kertoa mitkä käyttökytkimet ovat opiskelijoiden käytettävissä. Kaikissa komponenteissa pitää olla, ajan tasalla olevat käyttöohjeet. Opiskelijoille pitää myös järjestää toimipaikkakohtainen ensiapukoulutus, jossa kerrataan ensiaputaidot, ja toiminta hätätilanteessa harjoituskentällä.

(SFS-6001,2009)

## 2.3 Harjoituskentän käyttötoimenpiteet

Harjoituskentän käyttötoimenpiteillä tarkoitetaan tilanteita: joissa kytketään harjoituskenttä jännitteelliseksi tai jännitteettömäksi, erotetaan verkonosia toisistaan kuormanerotimella, kytketään verkonosia käyttöön, vaihdetaan kauko-ohjattavan erotinaseman erottimien tilaa, kytketään jakelumuuntajia käyttöön tai kytkemällä kojeistonlähtöjä jännitteelliseksi tai jännitteettömäksi.

Harjoituskentällä tehtävissä käyttötoimenpiteissä on täyttyvä seuraavat vaatimukset:

- Ennen harjoituskentällä tehtävää käyttötoimenpidettä on suoritettava jokaista erilaista käyttötoimenpidettä ohjaava opastus. Käyttötoimenpiteen opastuksen jälkeen toimenpide on suoritettava jatkuvan valvonnan alaisuudessa. Valvonnasta vastaa koulutuksesta vastaava henkilö.
- Ennen laitteistoa kytkettäessä jännitteelliseksi on annettava äänimerkki, joka varoittaa ulkopuolisia jännitteiden kytkeytymisestä. Merkkiäänäni pitää kuulua koko harjoituskentän alueella, missä esiintyy jännitteellisiä, ja vaaralliseksi katsottuja osia.
- Harjoituskentälle on asennettava punainen merkkivalo. Sellaiselle paikalle, missä se näkyy varmasti koko harjoituskentän alueella. Merkkivalon pitää syttyä, ennen kuin jännitteitä kytketään päälle, ja varoittaa jännitteen kytkeytymisestä. Kojeistotilassa pitää myös olla jännitteellisyyden osoittava merkkivalo. (SFS-600, 2007)



## 2.4 Harjoituskentän käyttökytkimet

Harjoituskentän jokaista erillistä laitetta, ja verkonosaa tulee voida ohjata käyttökytkimen avulla. Keskijännitekojeistossa tulee olla käyttökytkin, joka yhdellä toimenpiteellä katkaisee sähköt koko harjoituskentän alueelta. Käyttökytkimet on pystyttävä lukitsemaan tahattoman kytkemisen estämiseksi, mikä estää myös oppilaiden pääsyn työskentelemään ilman valvontaa. Harjoituskentän pääkäyttökytkin, tulee sijoittaa ennen jännitteennostomuuntajaa. Jokaisessa keskijännitelähdössä tulee olla oma käyttökytkin, jonka avulla voidaan kytkeä erikseen jokainen keskijännitelähtö turvallisesti jännitteelliseksi tai jännitteettömäksi. Harjoituskentällä olevat kuormanerotinimet ovat myös käyttökytkimiä. Kuormanerotinien avulla verkonosia voidaan ohjata jännitteelliseksi ja jännitteettömäksi, ja muuttaa verkon kytkentätilannetta. Harjoituskentällä olevissa jakelumuuntajissa, pitää olla oma käyttökytkin, jonka avulla jakelumuuntajat voidaan erottaa tai kytkeä verkkoon turvallisesti.(SFS-600, 2007)

Harjoituskentän käyttökytkimiä käytettäessä, pitää niiden erottaa kaikki kolme jännitteellistä johdinta toisistaan yhdellä toimenpiteellä. Erityistä tarkkuutta tulee noudattaa tilanteissa, joissa kytketään verkonosia tai kojeistonlähtöjä käyttöön, jotta ei syntyisi rinnansyöttötilannetta. Harjoituskentällä ei saa tehdä, kuin yhtä harjoitusta tai kytkennänmuutosta kerrallaan turvallisuuden varmistamiseksi. Ennen jokaista kytkennänmuutosta tulee käydä läpi jännitteelliseksi tulevat johtimet, ettei mahdollisia rinnansyöttötilanteita syntyisi. Ennen verkon käyttöönottoa pitää tarkistaa kuormanerotinien asennot, sekä jännitteelliseksi tulevat verkonosat. Harjoituskentän turvallisuutta voidaan lisätä kytkemällä yhtä kojeistonlähtöä kerrallaan, ja käyttämällä vain mahdollisimman yksinkertaisia kytkentöjä.(SFS-600, 2007)

Harjoituskentälle valittavien käyttökytkimien toiminta-arvot, pitää olla suuremmat kuin harjoituskentän verkon virranmaksimi-arvot, jotta käyttökytkimet pystyisivät katkaisemaan jännitteen syötön kaikissa tilanteissa. Verkonosia kytkettäessä poiskäytöstä käyttökytkimien avulla, pitää syntyä näkyvä erotusväli jännitteellisten ja jännitteettömien osien välille. Pelkän käyttökytkimen avulla ei kuitenkaan saada riittävän luetettavaa jännitteetöntä kytkentää. Lisäksi tulee noudattaa SFS-6002, liitteessä X mainittuja tarkempia vaatimuksia verkon jännitteettömäksi tekemiselle: Täydellinen erottaminen, jännitteen kytkemisen estäminen, laitteiston jännitteettömyyden toteaminen, työmaadoittaminen ja suojaus lähellä olevilta jännitteisiltä osilta.(SFS-600, 2007)

## 2.5 Jännitteen hätäpoiskytkentä

Harjoituskentällä ja siihen liittyvässä kojeistossa, sekä paikoissa missä voidaan muuttaa verkon sähköistä tilaa, pitää olla kaikkien käyttökytkimien läheisyyksissä hätä/seis-kytkimet. Hätäpoiskytkentä tulee toteuttaa niin, että sähkönsyöttö katkeaa yhdellä toimenpiteellä suoraan päävirtapiiristä. Pienjännitepuolen käyttöpaikat tulee myös varustaa hätä/seis-kytkimillä. Hätä/seis-kytkennän toiminta ei saa aiheuttaa lisävaaraa tai estää muita vaaran poistamiseksi tarpeellisia toimenpiteitä toimimasta, minkä avulla esim. estetään moottoria tahaton toiminta häiriötilanteessa. Hätä/seis-kytkimen on pystyttävä katkaisemaan jännitteensyöttö kaikilta laitteilta, ja johtimilta koko harjoituskentän alueella. Käytettäessä hätä/seis-kytkintä sen täytyy katkaista sähkönsyöttö suoraan päävirtapiiristä. Käytettäessä hätä/seis-kytkimen pitää pystyä katkaisemaan sähkönsyöttö koko harjoituskentän alueelta, vaikka harjoituskenttä olisi täydessä kuormitustilanteessa. (SFS-600, 2007)

Hätä/seis-kytkin pitää olla kojeistossa, muuntajilla, kauko-ohjattavalla erotinasemalla, sekä jännitetyöalueilla. Hätä/seis-kytkimen käytön jälkeen pitää kojeistosta kuitata sen käyttö, ennen sähköjen uudelleen kytkentää. Hätä/seis-kuittauksen saa tehdä vain koulutuksesta vastaava henkilö. Hätä/seis-piirille pitää rakentaa oma sähkönsyöttö, jotta aina harjoituskenttää käytettäessä pystyttäisiin sen avulla katkaisemaan sähkönsyöttö koko harjoituskentän alueelta. Kaikkien Hätä/seis-kytkimien pitää pystyä katkaisemaan sähkönsyöttö koko harjoituskentän alueelta. (SFS-600, 2007)

Hätä/seis-piiriä käytettäessä se ei saa kytkeä toisistaan irti TN-C-järjestelmän PEN-johdinta, eikä TN-S-järjestelmän nollajohdinta. Suojajohtimia ei saa missään järjestelmässä erottaa tai kytkeä irti toisistaan. Harjoituskentän Hätä/seis-piirin on katkaistava sähkönsyöttö ennen jännitteennostomuuntajaa, jotta koko harjoituskenttä tulee jännitteettömäksi. Hätä/seis-kytkin on oltava helposti tunnistettavissa, ensisijaisesti käyttäen punaista väriä kontrastin luovaa taustaa vasten. Hätä/seis-kytkin pitää lukkiutua ”auki”-tai ”seis”-asentoon. Hätä/seis-kytkimen vapauttaminen ei saa tehdä harjoituskentän verkkoa uudelleen jännitteiseksi, ennen Hätä/seis-piirin kuittausta. (SFS-600, 2007)

## 2.6 Harjoituskentän verkon rakenteelliset vaatimukset

Harjoituskentän verkko tulee toteuttaa mahdollisimman yksinkertaisesti, että voidaan helposti seurata mitkä osat ovat jännitteellisiä. Näin pystytään seuramaan kytkentöjen muutoksia tehdessä, mahdollisimman tarkasti mitkä verkonosat tulevat jännitteelliseksi. Harjoituskentän verkonrakennetta kuvataan liitteen 2 pääjohtokaaviossa. Harjoituskentän käyttökytkimet tulee olla lukittuina, ettei niitä voida käyttää opiskelun ulkopuolisena aikana. Lukittavan kojeistotilan ulkopuolella olevat käyttökytkinlaitteet pitää olla lukittuina tai asennettuina lukollisiin koteloihin, ja ne on pidettävä normaalitilanteessa lukittuna. Käyttökytkinlaitteet pitää varustaa kytkennästä varottavilla kylteillä. (SFS-600, 2007)

Harjoituskentän verkolla tulee noudattaa samoja etäisyysvaatimuksia, kuin normaalissa käytössä olevalla jakeluverkolla. Erityisen tärkeää on noudattaa etäisyysvaatimuksia maahan tien ylityskohdissa ja rakennuksiin. Muuntajien vaakasuora etäisyysvaatimus rakennuksiin on sama kuin keskijännitejohtimilla. Maakaapeliverkkoa rakennettaessa on otettava huomioon maaston aiheuttamat ongelmat kaivuille. Ilmajohtimien etäisyysvaatimuksissa on otettavan huomioon johdon riippuma eri sää- ja kuormitustiloissa, jännitelisä sekä lumen, roudan tai maanpinnan nousu. (Vakiorakenteet, 2009)

### 2.6.1 Ilmajohtojen etäisyysvaatimukset

Ilmajohtimien etäisyysvaatimukset maahan on 5,6 metriä käytettäessä 20 kV:n kj-avojohtoa, PAS- johtoa tai kj- ilmakaapelia. Rakennuksiin ilmajohdon etäisyys tulee ylittää pystysuunnassa 4,22 metriä, ja vaakasuunnassa 3,22 metriä, paitsi ikkunan tai parvekkeen kohdalla 5,22 m. Teiden läheisyydessä pylvää tukirakenteineen on pyrittävä sijoittamaan pääsääntöisesti tiealueen ulkopuolelle. Tiehallinnon teitä ylitettäessä keskijänniteilmajohdolla on etäisyysvaatimus tienpintaan 8,3 metriä, ja pylvään minimietäisyys tien reunaan vähintään 2 metriä. Yleisillä ja yksityisillä teillä olisi hyvä noudattaa tiehallinnon teille asetettuja etäisyysvaatimuksia, vaikka etäisyys vaatimukset ei olisikaan niin vaativat. (Vakiorakenteet, 2009)

Yhteiskäyttöpylväällä missä on asennettuna keskijännitejohdon lisäksi toinen keskijännite, pienjännite tai heikkovirtajohdin samansuuntaisesti keskijännitejohtimien kanssa, tulee keskijännite avojohdolla tai PAS- johdolla noudattaa vähintään 2,72 metrin etäisyysvaatimusta muihin johtimiin. Johtimien kulkiessa risteävästi toisiinsa nähden on keskijännitejohtimilla ja muilla keskijännite-, pienjännite tai heikkovirtajohtimien etäisyysvaatimus 1,72 metriä, ja pylväällä 1,5 metriä.(Vakiorakenteet, 2009)

## **2.6.2 Maakaapelin asennus**

Maakaapelin asennustapaa valittaessa on varmistettava ennalta ulkoisten olosuhteiden vaikutukset, jotta maakaapelin asennuksen turvallisuustaso olisi riittävä. Suurjännitekaapelin asennuksen mekaanisensuojaus on harkittava kussakin tapauksessa erikseen. Maahan asennettavat kaapelit on sijoitettava vaaditulle vähintään 0,7 metrin syvyydelle. Jos vaaditulle syvyydelle ei pystytä kaivamaan ulkoisten olosuhteiden vuoksi, pitää kaapeli suojata suojaputkilla, laatoilla, kouruilla tai vastaavilla. Olosuhteista tai kaapelin lisäsuojauksesta riippuen voidaan maadoitettavalla metallisella kosketussuojalla varustettua kaapelia käyttää asennuksen tekijän tai haltijan harkinnan mukaan pienempää asennussyvyyttä.(SFS-600, 2007)

Maahan kaivetun kaapelin yläpuolelle 0,2 - 0,4 metrin syvyydelle maanpinnasta on suositeltavaa asettaa varoitusnauha osoittamaan kaapelin sijaintia. Maanpinnalla oleva kaapeli on varustettava luotettavasti kiinnitetyllä mekaanisella lisäsuojuksella, kuten raskaan käytön suojaputkella (SFS 5608 luokka A), betonikourulla, betonivalulla tai vastaavalla tavalla. Kallion pintaan kiinnitetyn kaapelin suojana suositellaan käytettäväksi muototerästä tai putkea/kourua, ja sen päälle tehtävää betonivalua. Kaapelin noustessa maasta tai vedestä ylös, se pitää suojata vähintään lujuusluokan 4 muototeräksellä, asennusputkella tai samanarvoisella tavalla vähintään 1,5 metrin korkeudelle ja liikenneväylän varrella vähintään 2 metrin korkeudelle maanpinnasta. Suojuksen on ulotuttava 0,2 metriä maan pinnanalle tai 2 metriä veden pinnanalle.(SFS-600, 2007)

## 3 HARJOITUSKENTÄN MAADOITUKSET

### 3.1 Keskijännitekojeiston maadoitukset

Harjoituskentän kojeisto ja siihen liittyvät käyttökytkimet, mittamuuntajat, kaapelipäätteet ja jännitteen nostomuuntaja on maadoitettava liitteen 3 mukaisella maadoituskaavion tavalla. Harjoituskentän kojeistonmaadoitus tulee toteuttaa omalla maadoituskiskolla, joka yhdistetään potentiaalintasausjohtimen *Cu 50* avulla kiinteistön päämaadoituskiskoon. Harjoituskentän maadoituskiskosta pitää lähteä oma potentiaalinhjousrenkas *Cu 50* johtimella maahan. Harjoituskentän kojeiston maadoituskiskoon tulee maadoitusjohtimet, jokaiselta keskijännitelähdön kaapelipäätteestä, jännitteenostomuuntajan rungosta, mittamuuntajista, katkasijoista ja kaikista keskijännitelähtöjen maadoitus erottimien maadoituksesta.(Verkostosuositus RJ 19:06, 2005)

Suunnitteluvaiheessa pitää maadoitusten ympäristö tutkia 20 metrin säteellä. Jos rajatulla alueella on maassa pienjännite-, puhelin-, tai muita maakaapeleita tai johtavia putkistoja, pitää ryhtyä toimenpiteisiin, joko maadoitusten siirtämiseksi tai maassa olevien kaapelien tai putkien eristämiseksi. Eristäminen voidaan hoitaa halkaistavalla kaapelisuojuputkella, joka tulee ulottua vähintään 20 metrin etäisyydelle maadoituksesta.(Verkostosuositus RJ 19:06, 2005)

### 3.2 Muuntamoiden maadoitukset

Harjoituskentällä oleville jakelumuuntajille keski- ja pienjännitepuolelle on rakennettava yhteismaadoitus, jossa on yhdistetty muuntajan suojamaadoitus, sekä pienjännitepuolen käyttömaadoitus. Oletettaessa että SFS 6001 kohdan 9.4.1 vaatimukset täyttyvät yhteismaadoitukselle. Puistomuuntamonmaadoitus on toteutettava niin, että maadoituselektroni tuodaan suoraan yhteiseen maadoituskiskoon, jossa on muuntajan suojamaadoitus, sekä pienjännitepuolen käyttömaadoitus. Pylväältä alas tuleva maadoitusjohdin suojataan koskettamiselta, ja mekaaniselta vahingoittumiselta eristävästä materiaalista tehdyllä suojalla, joka ulottuu vähintään 2,3 metrin korkeudelle ja vähintään 0,2 metrin syvyydelle maahan.(SFS-6001, 2009)

Pylväsmuuntamolle pyritään aina rakentamaan maadoitus, joka muodostuu pylvään tyvimaadoituselektrodista tai noin 2 metrin pituisesta syvämaadoituselektrodista ja potentiaaliohjausrenkaasta, jos pylväsmuuntamolle ei pystytä kallion tms. syyn takia rakentamaan maadoitusta. Pitää se rakennetaan mahdollisimman lähelle muunta-moa esim. seuraaville pylväälle, mutta maksimissaan 200 metrin päähän muuntamosta. Pylväsmuuntajan maadoituksen toteutuksesta on kuva liitteessä 4. Muuntamolla käytet-tävän maadoituselektrodin minimi poikkipinta on  $Cu 16 mm^2$ . Muuntamon maadoituk-sen tulee olla kytkettynä jokaiseen pienjännitelähdön PEN- johtimeen, myös muuntaja-vaihdon aikana. Johtimien kytkennät on suoritettava niin, ettei maadoitusten yhteyttä toisiinsa jouduta muuntajanvaihdon aikana katkaisemaan. Muuntamon maadoitusresis-tanssi tulee mitata ennen muuntamon käyttöönottoa. (Verkostosuositus RM 5:03, 2005)

### 3.3 Pylväserottimien maadoitukset

Käsin ohjattavalle pylväserottimelle tulee rakentaa oma maadoitusjärjestelmä. Erotti-men ohjaustangossa tulee olla käyttöjännitteelle mitoitettu eristin, eikä Erottimen kä-siohjainta ei saa maadoittaa. Maadoitusjohtimella ei saa oikosulkea erottimen ohjaus-tangon eristintä. Käytettäessä vähintään eristämätöntä *Cu 16* maadoitusjohdinta, tulee ohjaintukien ja maadoitusjohtimen väliin jäädä vähintään *50 mm* ilmaa tai *100 mm* puu-ta. Käsiikäyttöisen pylväserottimen maadoitus on esitetty liitteessä 5.

(Verkostosuositus RJ 19:06, 2005)

Kauko-ohjatun pylväserotinaseman maadoitusjärjestelmä tulee rakentaa samoilla eh-doilla kuin käsiikäyttöisenkin. Kauko-ohjattavan pylväserottimen maadoitus on esitetty liitteessä 6.(Verkostosuositus RJ 19:06, 2005)

## 4 SÄHKÖINEN MITOITTAMINEN

### 4.1 Keskijänniteverkon mitoittamisen lähtökohdat

Rakennettaessa normaaliin jakelukäyttöön tulevaa verkkoa, sen mitoittamisessa on otettava huomioon seuraavat asiat: taloudellisuus, käyttövarmuus, tekniset reunaehdot ja luontoon aiheutuvat rasitukset. Keskijänniteverkko tulee mitoittaa niin, ettei sen kuormitus ylittäisi missään tilanteessa johtimien maksimikuormitusvirran arvoja, myös varasyöttöyhteyksiä käytettäessä. Keskijänniteverkon käyttövarmuus pitää olla niin korkea, että sähkönjakelun keskeytyksien pituudet eivät ylittäisi verkkoyhtiöille asetettuja 12 tunnin korvauspituuksia. Verkon käyttövarmuutta saadaan pienentämällä keskijännite johtolähtöjen kokonaispituuksia, ja rakentamalla verkko sellaisiin olosuhteisiin, mistä on poistettu ulkopuoliset vaaratekijät. Nykyaikainen automaattinen vianrajaus ja havaitsemisjärjestelmät lyhentävät keskeytyksien pituuksia merkittävästi. (Verkostosuositus SA 5:94, 2005)

Keskijännitelähtöjen vikasuojaus mitoitetaan niin, ettei se ylitä johtimien maksimi vikavirta-arvoja ja aikaa oikosulkutilanteessa. Vikasuojauksen toiminta-arvot mitoitetaan oikosulkuvirran suuruuden mukaan niin, että se pystyy havaitsemaan vikatilanteen myös kj- verkon etäisimmässä kohdassa. Keskijänniteverkon suunnittelussa pitää ottaa huomioon kj- johtimissa syntyvää jännitteenalenema, koska keskijännitelinjan jännitteenalenema vaikuttaa myös pienjännitepuolelle kuluttajille. Keskijänniteverkon suunnittelussa on otettava huomioon myös turvallisuusvaatimukset, jotta verkon käytöstä ei syntyisi henkilö tai omaisuus vaaraa. Verkon taloudellisuutta olisi hyvä tarkastella jo suunnittelu vaiheessa, jotta mahdollinen tuleva kulutuksen kasvu olisi jo valmiiksi otettu huomioon johtimia valittaessa. Turha verkon ylimitoittaminen lisää verkon käyttökustannuksia koko sen elinkaaren ajan. (Verkostosuositus SA 5:94, 2005)

Harjoituskentän mitoittamisen lähtökohdat poikkeavat normaaliin käyttöön tulevasta verkosta, koska se on tarkoitettu vain koulutuksen aikaiseen opetukseen, eikä sen kautta ole tarkoitusta syöttää jatkuvasti käytössä olevia laitteita. Sen tarkoituksena on muistuttaa normaalia jakeluverkkoa, jonka avulla pyritään luomaan todellisia jakeluverkon tilanteita. Harjoituskentän verkon tärkeimpänä suunnittelu lähtökohtana on sähköturvallisuus, jotta koulutustilanteet voitaisiin harjoituskentällä toteuttaa mahdollisimman tur-

vallisesti. Harjoituskentän verkkoa suunniteltaessa on käytettävä samoja teknisiä reuna-  
ehtoja, kuin normaalissakin jakeluverkossa.(Verkostosuositus SA 5:94, 2005)

## 4.2 Johtojen kuormitettavuus

Keskijännitejohdot tulisi standardin mukaan mitoittaa kuormitusta vastaavaksi. Ilma-  
johdot mitoitetaan suurimman sallitun käyttölämpötilan mukaan, jonka perusteella on  
määritelty johtojen sallitut kuormitusvirrat. Maakaapelien mitoitus perustuu myös suu-  
rimpaan sallittuun kuormitusvirrasta aiheutuvaan käyttölämpötilaan, joka määritellään  
johtimen eristyksen mukaan. Kaapeleiden lämpeneminen riippuu kuormitusvirran lisäk-  
si asennusolosuhteista ja kuormituksen vaihtelusta. Kaapelien maksimi kuormitusvirta  
on määritettävä reitin jäähdytysolosuhteiden kannalta epäedullisimman osuuden mu-  
kaan. Maakaapelin mitoituksessa tulee huomioida hitaampi jäähtyminen verratessa il-  
majohdtoon vikatilanteessa.(Verkostosuositus SA 5:94, 2005)

Maakaapelien maksimikuormitusvirtaa määritettäessä, tulee ottaa huomioon asennus-  
olosuhteista aiheutuvat korjauskertoimet, jonka avulla voidaan määrittää johtimen mak-  
simi kuormitusvirta asennusolosuhteiden perusteella. Korjauskertoimen suuruuteen vai-  
kuttaa myös kuormituksen vaihtelu eri tilanteissa. Tyypillisesti keskijännitejohdolla  
korjauskertoimet ovat noin  $1,1- 1,15$  verratessa jatkuvaan kuormitettavuuden arvoon.  
Poikkeustilanteissa voidaan palonkestävästi asennetulle kaapelille määritellä  
häätäkuormitettavuus arvo, jolloin kaapelin normaalissa käytössä sallittu lämpötila  
voidaan ylittää hetkellisesti. Tämä johtaa kaapelin eristysten normaalia nopeampaan  
vanhenemiseen, minkä vuoksi häätäkuormituksen kesto, ja määrä on syytä rajoittaa niin  
pieneksi kuin mahdollista. Korkeintaan  $50 h$  kerralla tai  $500 h$  koko johtimen  
käyttöaikana. Häätäkuormitettavuudelle voidaan laskea kertoimet ottaen huomioon  
johdin-, ympäristö- ja hätäkäyttölämpötilat sekä vaihtovirtaresistanssit. Kaapeleiden  
häätäkuormitettavuutta ei ole syytä ylittää, sillä sen ylittäminen voi aiheuttaa kaapelin  
tuhoutumisen varsin lyhyessä ajassa. Lisäksi riski maan kuivumiselle on erityisen suuri,  
kun kaapelia häätäkuormitetaan. Ilmajohdolle ei ole määritetty häätäkuormitettavuuksia.  
(Verkostosuositus SA 5:94, 2005)



Harjoituskentän keskijänniteverkon maksimikuormitusvirran arvo on mitoitettava käytettävien johtimien pienimmän kuormitusvirran perusteella. Tarkistamalla kaikkien käytettävien keskijännitejohtimien kuormitusvirran arvot liiteistä 10 ja 11 taulukoista, ja verrataan niitä toisiinsa. Maksimikuormitusvirta ei ole tärkeä mitoitusperuste harjoituskentän keskijänniteverkossa, koska harjoituskentällä ei pystyty käyttämään missään tilanteessa niin suurta kuormaa, että se ylittäisi johtimen kuormitettavuuden keskijänniteverkossa.

Verratessa käytettävien keskijännitejohtimien maksimikuormitusvirta-arvoja liitteiden 7 ja 8 taulukoista on pienin maksimikuormitusvirran arvo maakaapelilla *AHXAMK 3x70*, jonka suurin sallittu kuormitusvirta maassa ilman korjauskertoimia on *200 A*. Näin suuri kuormitusvirta keskijännitejohtimessa tarkoittasi, että kuormaa harjoituskentän verkossa olisi yhteensä noin *700 MVA*: n verran. Todellisuudessa tällaiseen kuormitukseen ei ole mahdollista päästä, koska harjoituskenttää syöttävä pienjänniteverkko rajoittaa harjoituskentän maksimi kuormitustehoa. Suurin kuormituksen rajoittaja on *100 kVA*: n jännitteennostomuuntaja. Jännitteennostomuuntajan pienen nimellistehon vuoksi keskijännitejohtimien maksimikuormitusvirtoja ei tarvitse ottaa mitoituksessa huomioon. Mitoituksessa on kuitenkin otettava huomioon keskijännitejohtimien oikosulkukestoisuus vikatilanteissa ettei ne ylittäisi johtimien maksimiarvoja.

### 4.3 Jännitteenalenema

Suomessa sallitaan keskijänniteverkossa yli 10 % jännitteenalenema, jos pienjänniteverkon jännite pysyy sallituissa rajoissa. Pitkissä siirtoyhteyksissä onkin tärkeää suorittaa jännitteensäätö muuntajien muuntosuhdetta muuttamalla, jotta pienjänniteverkossa oleva jännite pysyy standardin rajoissa. (Verkostosuositus SA 5:94, 2005)

Harjoituskentän keskijänniteverkossa jännitteenalenema voidaan olettaa nolllaksi, koska se on suoraan verrannollinen kuormitusvirran suhteesta johdon impedanssiin. Kuormitusvirta on harjoituskentän keskijännitejohdoissa niin pieni, ettei se aiheuta merkittävää jännitteenalenemaa. Harjoituskentän keskijänniteverkon jännitteenvaihtelu riippuu syöttävän verkon jännitteenvaihtelusta, koska muutettaessa jännite keskijännitepuolelle jännitteenalenema on viisikymmentäkertainen pienjännitepuolelle verrattaessa.

Suomessa jakeluverkon vaihejännitteen vaihteluväliksi sallitaan  $230 \text{ v} \pm 10 \%$ . Tämä tarkoittaa että harjoituskentän keskijänniteverkossa jännite voi vaihdella  $20 \text{ kV} \pm 2 \text{ kV}$ . Alimmillaan keskijänniteverkon vaihejännite voi olla  $10,35 \text{ kV}$ : n suuruinen. Keskijänniteverkon jännitteenalenema pitää ottaa huomioon pienjänniteverkon suunnittelussa, jotta pääjännite jakelumuuntajien toisiossa olisi noin  $400 \text{ V}$ : n suuruinen. Harjoituskentää kytkettäessä ensimmäisiä kertoja käyttöön on suositeltavaa tarkastaa jännitetasot keskijänniteverkon yli pienjännitepuolelta. (Verkostosuositus SA 5:94, 2005)

#### 4.4 Jännitteennostomuuntajan toiminta

Muuntajaa kytkettäessä jännitteelliseksi tapahtuu suuri virrannousu, jota kutsutaan kytkentävirtasysäykseksi. ABB: n TTT-käsikirjassa mainitaan kytkentävirtasysäyksestä seuraavaa:

Muuntajan jännitteen ja magneettivuon välinen vaihesiirtokulma on jatkuvuustilassa noin  $90^\circ$ . Kun jännitteetön muuntaja, jonka sydämessä vuo on noin nolla, kytketään verkkoon, tapahtuu siirtyminen tähän jatkuvuustilaan aina (pienemmän tai suuremman) tasoitusilmiön kautta johtuen rautasydämen magneettisesta hitaudesta. Tasoitusilmiö on suurimmillaan, jos jännitteen hetkellisarvo kytkemishetkellä on nolla. Vuo lähtee tällöin nousemaan sinimuotoisena epäsymmetrisesti nolasta ensimmäiseen huippuarvoonsa, joka tällöin tulee olemaan kaksinkertainen jatkuvuustilan vuon huippuarvoon nähden, tai jopa vähän suurempi, jos sydämessä kytkemishetkellä on samansuuntainen remanenssivuo. Tällä vuontiheydellä muuntajan sydän kyllästyy ja magnetoimisvirta nousee voimakkaasti. Tätä ilmiötä kutsutaan kytkentävirtasysäykseksi. Piirissä olevan resistanssin ansiosta vaimenee virta nopeasti ja saavuttaa jatkuvuustilaa vastaavan pienen arvonsa noin sekunnin kuluttua.

Jakelumuuntajilla on todettu ensiövirran ensimmäisen huippuarvon olevan pahimmassa tapauksessa noin 8...12 kertaa muuntajan nimellisvirran huippuarvo, ja vaimennuksen puoleen arvoonsa tapahtuvan noin 0,30...0,05 sekunnissa. Virta on melkein täysin induktiivinen. Kytkentävirtasysäys voi aiheuttaa muuntajan suojalaitteiden toimimisen, ellei tätä ilmiötä ole otettu huomioon sulakkeiden valinnassa tai releitten asettelussa. (ABB TTT, 2000)

Harjoituskentällä kytkentävirtasysäys tulee ottaa huomioon kytkettäessä jakelumuuntajia jännitteelliseksi, sekä jännitteennostomuuntajaa kytkettäessä verkkoon. Erityisen tarkkana täytyy olla suojauksien asettelussa, ettei kytkentävirtasysäys aiheuta suojauksien toimintaa.

#### 4.4.1 Jännitteennostomuuntajan kytkentä

Jännitteennosto 400 voltin pienjännitteestä 20 kV: n keskijännitteeksi toteutetaan 100 kVA: n jännitteennostomuuntajan avulla, kytkemällä muuntaja toimimaan vastakkaiseen suuntaan. Jakelujännite 400 V tuodaan ensiöpuolen pienjänniteliittimille, ja keskijännitejohtimet muuntajan toisiopuolen keskijänniteliittimille. Jännitteennostomuuntajaksi valitsin liitteen 9 taulukosta ABB: n valmistaman 100 kVA: n jakelumuuntajan.

Jännitteennostomuuntajaksi tulisi valita sellainen muuntaja, jonka muuntosuhdetta pystyisi muuttamaan väliottokytkimen avulla, koska ei saada varmuutta pienjänniteverkosta ja jännitteennostomuuntajasta aiheutuvista jännitealenemistä. Väliottokytkimen asento tulee varmistaa mittaamalla jännitetasoja harjoituskentän keskijänniteverkon yli jakelumuuntajien pienjännitepuolelta. Pienjännitepuolen pääjännite tulisi olla noin 400 V, jotta verkkoon pystyisi liittämään normaalilla jakelujännitteellä toimivia laitteita.

Muuntajan käytöstä johtuen kytkentävirtasysäyksen aiheuttama virtapiikki on suurempi kuin edellä mainittu 12 kertaa muuntajan nimellisvirran huippuarvo. Tämä johtuu siitä, että muuntajan pylväillä syntyvä hajavuo synnyttää liikkueessaan toiseen suuntaan huomattavasti pienemmän hajainduktanssin, jonka seurauksena kytkentävirtasysäys on noin 25 kertaa suurempi kuin muuntajan nimellisvirran huippuarvo. Tästä johtuen muuntajan kytkentävirtasysäyksestä aiheutuvaa virtaa tulee rajoittaa ajastetun etuvastuksen avulla. (Pihlakari, 2010)

#### 4.4.2 Kytkentävirtasysäyksen rajoittaminen

Jännitteennostomuuntajalle tulee mitoittaa ajastetut etuvastukset kytkentävirtasysäyksen ajaksi. Etuvastukset tulee mitoittaa niin, ettei kytkentävirtasysäys aiheuttaisi harjoituskentän 250 ampeerin pääsulakesuojauksen toimimista. Jännitteennostomuuntajaa pitää syöttää etuvastuksien läpi niin pitkän aikaa, että kytkentävirtasysäys on varmasti mennyt ohi. ABB:n TTT-käsikirja antaa arvon kytkentävirtasysäyksen vaimennukselle. Sen mukaan kytkentävirtasysäyksen arvo pienentyy puoleen 0,05 - 0,30 sekunnissa. Ajustuksen toiminta-aika kytkee jännitteennostomuuntaja suoraan verkkoon ohi etuvastuksien 5 sekunnin kohdalla, jotta kytkentävirtasysäys olisi varmasti vaimentunut. Näin voidaan varmistua, että kytkentävirtasysäyksen virta-arvo on vaimentunut alle 250 Ampeerin suuruiseksi, ettei sulakesuojaus toimisi kytkettäessä jännitteennostomuuntajaa verkkoon. (ABB TTT, 2000)

Jännitteennostomuuntajan kytkentävirtasysäyksen maksimi arvo:

$$S = \sqrt{3} * U_N * I \quad (1)$$

$$I_N = \frac{100 \text{ kVA}}{\sqrt{3} * 400 \text{ v}} = 144 \text{ A} \quad (1)$$

$$I_{k_{yt}} = I_N * 25 \quad (2)$$

$$I_{k_{yt}} = 144 * 25 = 3600 \text{ A} \quad (2)$$

Mitoitetaan jännitteennostomuuntajan etuvastukset harjoituskentän pienjännite pääsulakkeiden perusteella  $3 \times 250 \text{ A}$ , koska ei ole varmuutta kytkentävirtasysäyksen todellisesta suuruudesta. Kytkentävirtasysäyksen  $I_{k_{yt}} = 3600 \text{ A}$ :n laskennallinen arvo on todella lähellä kohteen maksimioikosulkuvirtaa. Etuvastuksien suuruus pitää mitoittaa niin, että kytkentävirtasysäys rajoitetaan alle  $250 \text{ A}$ :n suuruiseksi oikosulkutehon perusteella.

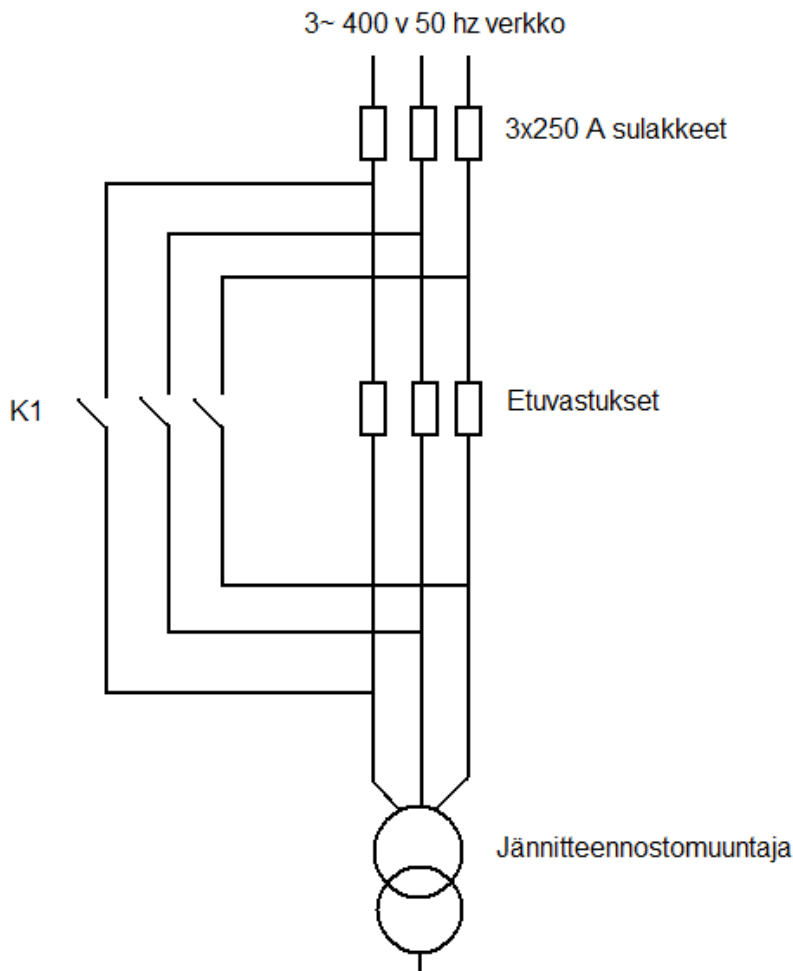
Oikosulkuteho  $S_k$  250 A:n virralla:

$$S_k = \sqrt{3} * 400 \text{ v} * 250 \text{ A} = 173 \text{ kVA} \quad (1)$$

Etuvastuksen koko, jotta Kytkentävirtasysäys rajoittuu alle 250 ampeeriin:

$$R_{etuvastus} = \frac{400 \text{ v}^2}{173 \text{ kVA}} = 0,9 \Omega \quad (1)$$

Etuvastuksien avulla rajoitetaan kytkentävirtasysäyksen suuruutta kytkemällä  $1 \Omega$ : n etuvastukset jännitteennostomuuntajan syöttöön. Ajastimen aika käynnistyy kytkettäessä jännitteennostomuuntaja jännitteelliseksi. Ajastimen avulla ohjataan ensimmäiset 5 sekuntia jännitteennostomuuntajan sähkönsyötöstä kulkemaan etuvastuksien läpi, jotta kytkentävirtasysäys rajoittuisi alle 250 A: n. Viiden sekunnin kuluttu jännitteennostomuuntaja kytketään suoraan verkkoon ohi etuvastuksien. Kuvioista 4.1 nähdään ajastetun kytkentävirtasysäyksen rajoituksen toimintaperiaate.



Kuvio 4.1 Kytkentävirtasysäyksen rajoituksen toimintaperiaate

Jännitteennostomuuntajan kytkentä verkkoon tulee toteuttaa niin, ettei sen perässä olevassa verkossa ole kytkettynä minkäänlaista kuormitusta. Jännitteennostomuuntajan kytkennän jälkeen kytketään vasta keskijännitekojeisto jännitteelliseksi, koska pienjänniteverkosta ei saada riittävää määrää oikosulkutehoa suojauksen toimimiselle keskijänniteverkon vikatilanteessa, kun virta kulkee ajastettujen etuvastuksien läpi.

#### 4.4.3 Jakelumuuntajien verkkoon kytkentä

Jakelumuuntajia kytkettäessä verkkoon syntyy 8 - 12 kertaa muuntajan nimellisvirtaa suurempi kytkentävirtasysäys. Tästä syystä harjoituskentän verkkoa kytkettäessä jännitteelliseksi tarvitsee kiinnittää huomiota kytkentävirtasysäysten rajoitukseen, ettei suojaus toimisi tilanteessa, jossa kytketään harjoituskenttä jännitteelliseksi. Kytkentävirtasysäyksiä tulee rajoittaa, koska pienjänniteverkosta ei voida ottaa kytkentävirtasysäyksen aiheuttamaa virtaa ilman, että suojaus havahtuisi. (ABB TTT, 2000)

Harjoituskentän jakelumuuntajien kytkentä jännitteelliseksi tulee toteuttaa yksi kerrallaan. Vasta sen jälkeen kun jännitteennostomuuntaja, kj- kojeisto ja keskijännitejohtimet on kytketty jännitteelliseksi. Jakelumuuntajat tulee kytkeä verkkoon yksitellen myös tilanteissa, joissa halutaan useampi muuntaja jännitteelliseksi, koska useamman muuntajan samanaikainen kytkentä verkkoon aiheuttaisi suojauksen havahtumisen. Harjoituskentän keskijänniteverkkoon kytkettävien jakelumuuntajien nimellisteho joudutaan rajoittamaan, jottei niiden jännitteelliseksi kytkennästä aiheutuva kytkentävirtasysäys johtaisi suojauksen havahtumiseen. (ABB TTT, 2000)

200 kVA: n muuntajan nimellisvirta  $I_N$  redusoituna 20 kV: n verkkoon:

$$I'_k = \mu * I \quad (2)$$

$$I_N = \frac{200 \text{ kVA}}{\sqrt{3*400 \text{ V}}} * \frac{0,4 \text{ kV}}{20 \text{ kV}} = 5,8 \text{ A} \quad (1), (2)$$

Muuntajan kytkentävirtasysäyksestä  $I_{k_{yt}}$  aiheutuva virta 0,3 sekunnin kohdalla:

$$I_{k_{yt}} = \frac{12*5,8}{2} = 34.5 \text{ A} \quad (1)$$

Kytkentävirtasysäyksen  $I_{kyl}$  virran laskiessa lineaarisesti 2 sekunnin jälkeen:

$$I_{kyl} = \frac{12 \cdot 34,5}{7} = 10 \text{ A} \quad (1)$$

Muuntajan kytkentävirtasysäyksestä aiheutuva virta redusoituna pienjänniteverkkoon 2 sekunnin kohdalla:

$$I_N = 10 \text{ A} \cdot \frac{20 \text{ kV}}{0,4 \text{ kv}} = 500 \text{ A} \quad (2)$$

Muuntajan kytkentävirtasysäyksestä aiheutuva virta, tulee ottaa huomioon keskijänniteverkon suojana toimivan releen toiminta-arvoja aseteltaessa. Releen toiminta-arvot pitää mitoittaa niin, ettei se havahdu harjoituskentän verkossa olevan suurimmankaan jakelumuuntajan kytkeytyessä verkkoon, mutta pystyy havaitsemaan kj- verkossa tapahtuvat vikatilanteen. Harjoituskenttää syöttävässä pienjännitelähdössä tulisi käyttää  $3 \times 250 \text{ A}$  gG- sulakkeita, jotka kestävät 2 sekunnin ajan  $1 \text{ kA}$  virtaa. Relesuojauksen pitää toimia selektiivisesti jänniteennostomuuntajan lähdön  $3 \times 250 \text{ A}$ : n sulakesuojauksen kanssa. Harjoituskentän verkossa olevan suuriman  $200 \text{ kVA}$ : n jakelumuuntajan pitäisi olla sellaisenaan kytkettävissä harjoituskentän keskijänniteverkkoon.

## 4.5 Keskijänniteverkon oikosulkusuojaus

Keskijänniteverkon oikosulkusuojauksen tehtävänä on ehkäistä oikosulkuvirran johdolle, ja laitteille aiheuttamat lämpenemisvauriot, sekä erottaa vioittunut johto-osa verkosta. Oikosulkuvika laskee myös syöttävän verkon jännitettä merkittävästi, joka voi aiheuttaa käyttäjille alijännitettä, koska normaalissa jakeluverkossa oikosulkuvirta on noin 20 kertaa suurempi kuin kuormitusvirta. Tämä aiheuttaa korkeamman virran vuoksi johtimien resistanssissa syntyvää suurempaa jänniteenalenemää. Laskemalla oikosulkuvirtojen arvot jo suunnitteluvaiheessa voidaan tarkistaa komponenttien soveltuvuutta kohteeseen, jotta varmistutaan niiden toimivuudesta myös vikatilanteissa. Oikosulkuvirran arvoa laskettaessa otetaan huomioon syöttävän verkon impedanssit muuntajalta viikapaikkaan. (Verkostosuositus SA 5:94, 2005)

Suomessa keskijänniteverkon oikosulkusuojana käytetään yleisimmin sähköaseman keskijännitelähdössä olevaa vakioaikarelettä. Lähdön releen toiminta perustuu jatkuvaan virran mittaukseen. Releeseen asetetaan virta toiminta-arvot joilla se havahtuu, ja antaa ohjauskäskyn kj- lähdön katkaisijalle, joka erottaa lähdön verkosta toiminta-arvojen ylittyessä. Toiminta-arvoja asetetaan yleensä kj- lähdön relesuojaan kaksi, jos käytössä on jälleenkytkentäyksikkö. Toiminta-arvoiksi asetetaan pieni katkaisu, joka reagoi pienempiin ja pidempi aikaisiin toiminta-arvojen ylityksiin, sekä iso katkaisu reagoimaan korkeampiin virtaraja-arvojen ylitykseen nopeasti. Yleensä jakeluverkko käytössä oleva pieni katkaisu antaa käskyn jälleenkytkentäyksikölle, joka aloittaa siihen ohjelmoidun kytkentäsyklin. Iso katkaisu katkaisee suoraan sähkön syötön, eikä jälleenkytkentäyksikkö käynnistä kytkentäsykliä. (Verkostosuositus SA 5:94, 2005)

Oikosulkusuojana toimivan releen havahtumisarvo asetellaan yleensä käytössä olevien johtimien maksimikuormitusvirtojen perusteella niin, että se havahtuu myös johtolähdön päässä tapahtuvassa vikatilanteessa. Jälleenkytkentöjä käytettäessä on otettava huomioon avojohtojen ja maakaapeleiden eripituisten jäähtymisaikojen vaikutus. (SFS-6001, 2009)

Harjoituskentällä käytetään vikatilanteiden oikosulkusuojana, ja käytettävän virran rajoitukseen keskijännitekojeistojen lähdöissä vakioaikarelettä. Releen toimintavirta-arvot pitää asetella niin, että se toimii selektiivisesti ennen pienjännitepuolen harjoituskentän pääsulakkeiden toimintaa, eikä johtimien kuormitusten mukaan. Yksittäisen Releen havahtuminen pitää katkaista koko harjoituskentän keskijänniteverkon sähkönsyöttö kojeistonkiskon etupuolelta, eikä vain vian havainneen releen lähdön sähkönsyöttöä.

#### **4.5.1 Harjoituskentän oikosulkuvirtojen laskenta**

Harjoituskentän päärakennuksen sähkönsyöttö tulee 800 kVA: n Kiinteistömuuntajasta. Harjoituskentän päärakennuksen kaapelin ylikuormitus- ja oikosulkusuojaksi on varattu 3x630 A lähtö, josta lähtee 2x4x240 Al kaapeli harjoituskentän päärakennukselle. Liitteessä 10 on esitetty sähkönsyötön kulkureitti kiinteistömuuntajalta harjoituskentän päärakennukselle. Kokonaismatkaa maakaapelille tulee noin 250 metriä. Kaapelin Lähdössä oleva 3x630 A gG- tyyppin sulake vaatii johdon sallitukseksi kuormitukseksi 695 A. Käytettävää AXMK 2x4x240 Al kaapelia saa kuormittaa ilman korjauskertoimia maassa



$2 \times 375 \text{ A} = 750 \text{ A}$ :n suuruisella virralla. Harjoituskentän keskijännitekojeiston ja pääkeskuksen välisen kaapelin impedanssi voidaan olettaa nolllaksi, koska ne on sijoitettu samaan tilaan. (Lakervi, 2008)

Kiinteistömuuntajan ominaisarvot:

$S_n = 800 \text{ kVA}$ ,  $U_1 = 20 \text{ kV}$ ,  $U_2 = 400 \text{ v}$ , oikosulkuimpedanssi (%)  $z_k = 5,0$ , Kuormitushäviöt  $P_k = 6500 \text{ W}$ , Tyhjäkäyntihäviöt  $P_0 = 1400 \text{ W}$ . Arvot otettu muuntamotilasta.

Kiinteistömuuntajan oisulkuimpedanssi  $Z_k$

$$Z_k = z_k * \frac{U_n^2}{S_n} \quad (3)$$

$$Z_k = 0,05 * \frac{400 \text{ v}^2}{800 \text{ KVA}} = 0,01 \Omega \quad (3)$$

Kiinteistömuuntajan resistanssi  $R_m$ :

$$R_k = \frac{6500 \text{ w}}{800 \text{ KVA}} * \frac{400 \text{ v}^2}{800 \text{ KVA}} = 0,00163 \Omega \quad (3)$$

Kiinteistömuuntajan reaktanssi  $X_m$ :

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (4)$$

$$X_k = \sqrt{0,01 \Omega^2 - 0,001625 \Omega^2} = 0,01 \Omega \quad (4)$$

Harjoituskentän päärakennuksen ja kiinteistömuuntamon välisen maakaapelin  $AXMK$   $2 \times 4 \times 240$  impedanssi. Kaapelin pituus 250 metriä kiinteistömuuntajalta pääkeskuksella:  $R_k = 0,07 \text{ } [\Omega/\text{km}]$ ,  $X_k = 0,0395 \text{ } [\Omega/\text{km}]$ .

Kaapelin AXMK 2x4x240S 250 m resistanssi  $R_k$ :

$$R_k = l \cdot R_k \cdot 2 \quad (5)$$

$$R_k = 0,25 \text{ km} \cdot 0,07 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 2 = 0,036 \Omega \quad (5)$$

Kaapelin AXMK 2x4x240S 250 m reaktanssi  $X_k$ :

$$X_k = l \cdot X_k \cdot 2 \quad (5)$$

$$X_k = 0,25 \text{ km} \cdot 0,0395 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 2 = 0,02 \Omega \quad (5)$$

Kokonaisimpedanssi  $Z_{kok}$  harjoituskentän pääkeskuksella:

$$Z_{kok} = Z_{pääm} + Z_{välik} \quad (6)$$

$$Z_{kok} = (0,00163 \Omega + j0,01 \Omega) + (0,036 \Omega + j0,02 \Omega) = 0,048 \Omega \quad (6)$$

Oikosulkuvirta  $I_{k1}$  harjoituskentän päärakennuksen pääkeskuksella

$$I_{k1} = \frac{400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 0,048 \Omega} = 4,8 \text{ kA} \quad (1)$$

Jännitteennostomuuntajan 100 kVA: n ominaisoikosulkuteho  $S_{km}$ :

$$S_{km} = \frac{S_n}{z_k} \quad (7)$$

$$S_{km} = \frac{100 \text{ kVA}}{0,04} = 2,5 \text{ MVA} \quad (7)$$

Syöttävän verkon oikosulkuteho  $S_k$  lisärakennuksen pääkeskuksella:

$$S_k = \sqrt{3} \cdot 4,8 \text{ kA} \cdot 400 \text{ V} = 3,33 \text{ MVA} \quad (1)$$

Jännitteennostomuuntajan jälkeen oikosulkuteho  $S_k$  ottaen huomioon syöttävä pienjänniteverkko ja jännitteennostomuuntaja:

$$S_k = \frac{S_k \cdot S_{km}}{S_k + S_{km}} \quad (8)$$

$$S_k = \frac{3,33 \text{ MVA} \cdot 2,5 \text{ MVA}}{3,33 \text{ MVA} + 2,5 \text{ MVA}} = 1,43 \text{ MVA} \quad (8)$$

Oikosulkutehon avulla voidaan laskea keskijännitekojeistolle ja johtimille oikosulkuvirran  $I_{k1}$  arvo ilman korjauskertoimia:

$$I_{k1} = \frac{1,43 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 20 \text{ kV}} = 41 \text{ A} \quad (1)$$

Kaksivaiheisen oikosulkuvirran  $I_{k2}$  suuruus harjoituskentän keskijännite verkossa:

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_k \quad (9)$$

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 41 \text{ A} = 35 \text{ A} \quad (9)$$

Yksivaiheisen oikosulkuvirran  $I_{k1}$  suuruus harjoituskentän  $20 \text{ kV}$ : n verkossa on  $41 \text{ A}$ . Oikosulkuvirtaa eniten rajoittaa jännitteennostomuuntajan nimellistehoteho, ja syöttävä pienjänniteverkko. Voidaan olettaa, että  $41 \text{ A}$ : n oikosulkuvirta on koko harjoituskentän keskijänniteverkossa kytkennästä riippumatta, koska keskijännitejohtimien kokonaispituudet ovat niin lyhyitä. Kaksivaiheisen oikosulkuvirran suuruus harjoituskentän keskijänniteverkossa on  $I_{k2} = 35 \text{ A}$ . Suojauksen mitoitus tulee tehdä kaksivaiheisen oikosulkuvirran arvon perusteella, jotta suojaus toimisi kaikissa tilanteissa.

Normaalissa jakelukäytössä olevassa verkossa oikosulkuvirtoja rajoitetaan sähköasemien läheisyydessä, jotta suuret oikosulkuvirrat ei hajottaisi komponentteja. Oikosulkuvirran rajoitus lisää merkittävästi häviötä, koska oikosulkuvirran rajoitus tapahtuu sarjakuristimen tai suuremman muuntajan häviöiden avulla. Harjoituskentällä yksivaiheisen oikosulkuvirran arvon ollessa  $41 \text{ A}$  ei ole järkevää lähteä rajoittamaan oikosulkuvirran suuruutta esim. sarjakuristimen avulla. Varmuutta ei ole myöskään siitä miten  $0,4/20$

kV: n jännitteennostomuuntaja pystyy syöttämään oikosulkuvirtaa keskijänniteverkkoon.(SFS-6001, 2009)

#### 4.5.2 Oikosulkuvirrat jakelumuuntajilla

Oikosulkuvirran suuruus 200 kVA: n jakelumuuntajien pienjännite liittimillä:

$$S_{km} = \frac{200 \text{ kVA}}{0,04} = 2,5 \text{ MVA} \quad (7)$$

$$S_k = \frac{2 \text{ MVA} * 2,5 \text{ MVA}}{2 \text{ MVA} + 2,5 \text{ MVA}} = 1,11 \text{ MVA} \quad (8)$$

$$I_k = \frac{1,11 \text{ MVA}}{\sqrt{3} * 400 \text{ V}} = 1,6 \text{ kA} \quad (1)$$

Oikosulkuvirran suuruus 50 kVA: n jakelumuuntajien pienjännite liittimillä:

$$S_{km} = \frac{50 \text{ kVA}}{0,04} = 1,25 \text{ MVA} \quad (7)$$

$$S_k = \frac{2,5 \text{ MVA} * 1,25 \text{ MVA}}{2,5 \text{ MVA} + 1,25 \text{ MVA}} = 830 \text{ kVA} \quad (8)$$

$$I_k = \frac{770 \text{ kVA}}{\sqrt{3} * 400 \text{ V}} = 1,2 \text{ kA} \quad (1)$$

Jakelumuuntajien pienjännitepuolen maksimi oikosulkuvirta-arvoja tulisi käyttää, kun suunnitellaan pienjänniteverkon oikosulkusuojasta, jotta oikosulkusuojaus toimisi myös harjoituskentän pienjänniteverkossa.

## 4.6 Keskijänniteverkon maasulku

Maasulku on johtava yhteys päävirtapiirin vaihejohtimen, ja maan tai maadoitetun osan välillä. Johtava yhteys voi syntyä myös valokaaren kautta. Kahden tai useamman vaihejohtimen maasulkua saman järjestelmän eri kohdissa kutsutaan kaksois- tai moninker-  
taisiksi maasuluiksi. Maasulkutilanteen vikavirran suuruuteen vaikuttaa verkon maadoi-  
tustapa, ja muuntajan perään kytkeytyneen galvaanisesti yhtenäisen verkon laajuus.  
Maasulku tapahtuu usein vaihejohtimen valokaaresta tai kosketuksesta suojamaadoitet-  
tuun osaan. Tällöin kosketusjännite riippuu maasulkuvirrasta ja suojamaadoituksen re-  
sistanssista.(SFS-600,2007)

Keskijänniteverkon maadoitustapoja on kolme erilaista: maasta erotettu-, sammutettu-  
ja impedanssin kautta maadoitettu järjestelmä. Jokainen sähköisesti erillinen järjestelmä  
on varustettava automaattisella maasulkusuojauksella, jonka avulla maasulku havaitaan  
tai kytketään pois. Automaattinen maasulkusuojaus voidaan toteuttaa automaattisella  
poiskytkennällä tai maasulusta hälyttävänä järjestelmänä.(SFS-600,2007)

Maasta erotetussa verkossa maasulkuvirta kulkee vikapaikasta maahan vaihejohtimien  
impedanssien, ja vikaresistanssin kautta päämuuntajan käämityksiin, ja sieltä vaiheim-  
pedanssien kautta vikapaikkaan. Maasulku laskelmissa johtimien ja muuntajien impe-  
danssit voidaan olettaa nolliksi, koska ne ovat suhteessa maaresistanssiin nähden hyvin  
pieniä. Kuviossa 4.2 on esitetty maasta erotetun verkon maasulkutilanne. Sammutetussa  
verkossa asennetaan muuntajan tähtipisteeseen sammutuskuristin. Sammutuskuristin  
mitoitetaan niin, että johtimissa syntyvä maakapasitanssi olisi yhtä suuri kuin kuristi-  
men induktanssi. Sammutuskuristimen avulla saadaan pienennettyä maasulkuvirtaa ja -  
jännitettä maasulkutilanteessa. (Verkostosuositus SA 5:94, 2005), (SFS-600,2007)

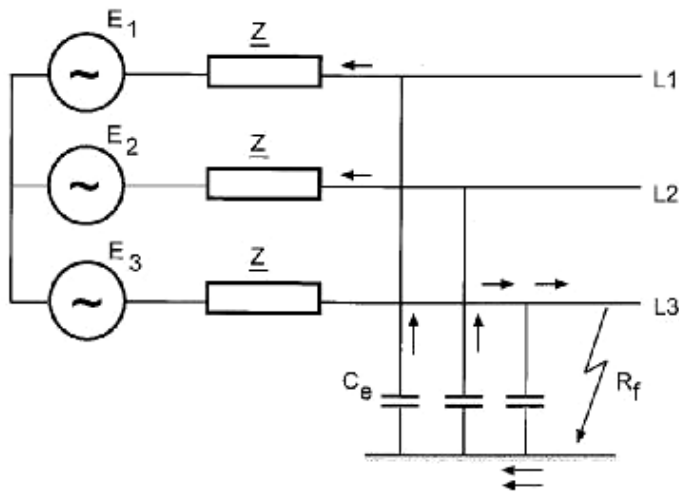
#### 4.6.1 Maasulkusuojauksen ehdot

Maasulkusuojauksen suunnittelussa on otettava huomioon sille asetetut vaatimukset, jotta käyttäjille ja ulkopuolisille ei aiheutuisi vaaraa maasulkutilanteessa. Suojauksen on toimittava suojamaadoittamattomaan paikkaan tapatuvasa maasulussa, kun maasulku-resistanssi  $R_f$  on alle  $500 \Omega$ . Maasulkusuojaus voidaan järjestää myös tiettyjä ehtoja noudatettaessa pelkästään hälyttäväksi. Maasulkusuojaukselle on asetettu kosketusjänniterajat, ja aika jonka aikana suojauksen on toimittava. (Verkostosuositus SA 5:94, 2005)

Kosketusjännitettä voidaan pienentää parantamalla maadoituksia, lyhentämällä maasulkusuojan laukaisuaikaa tai maasulkuvirtaa pienentämällä. Maasulkuvirran pienentäminen onnistuu jakamalla verkko pienempiin johtolähtöihin tai käyttämällä maasulkuvirran sammutuskuristinta. Suomen huonojen maadoitusolosuhteiden takia maasulkusuojaus on haastavaa. (Verkostosuositus SA 5:94)

#### 4.6.2 Harjoituskentän maasulkusuojaus

Harjoituskentän maasulkuvirrat jäävät pieniksi lyhyiden johtopituuksien vuoksi, koska maasulkuvirta on verrannollinen johdoissa syntyvään maakapasitanssiin  $C_0$ . Lyhyiden johtopituuksien vuoksi sammutuskuristimen käyttö ei ole järkevää, koska sammutuskuristimen mitoitus on verrannollinen johtojen maakapasitanssiin, ja sammutuskuristimen laskennallinen arvo olisi jäänyt todella pieneksi. Sammutuskuristimen käyttö ei lisäisi harjoituskentän turvallisuutta, koska se pyrkii estämään maasulkutilanteessa suojauksen havahtumisen. Näin mahdollinen maasulkuvikatilanne voisi jäädä suojalta havaitsematta, eikä suojaus toimisi maasulkutilanteessa. Näistä syistä harjoituskentän keskijänniteverkko toteutetaan maasta erotettuna. Maasulkuvirran suuruus tulee laskea pienimmällä mahdollisella verkon kytkentätilanteella, koska silloin maasulkuvirta  $i_f$  on pienimmillään, ja maasulkujännite  $U_0$  suurimmillaan.



Kuvio 4.2 Maasta erotetun verkon maasulkutilanne (SFS-600, 2007)

Liitteiden 7 ja 8 avulla lasketut käytettävien johtimien maakapasitanssien arvot suurimmillaan:

$$\text{Al-132 } C_0 \ 0,0061 \frac{\mu\text{F}}{\text{km}}, \text{ Sp-40 } C_0 \ 0,0061 \frac{\mu\text{F}}{\text{km}}, \text{ Rv-63 } C_0 \ 0,0061 \frac{\mu\text{F}}{\text{km}}, \text{ Pas-70 } C_0 \ 0,005 \frac{\mu\text{F}}{\text{km}}$$

$$\text{AHXAMK-W 3x70 } C_0 \ 0,18 \frac{\mu\text{F}}{\text{km}}$$

Yksivaiheinen maakapasitanssi suuruus keskijänniteverkossa suurimmillaan:

$$C_{01\text{kok}} = 460 \text{ m} \cdot 0,0061 \frac{\mu\text{F}}{\text{km}} + 70 \text{ m} \cdot 0,005 \frac{\mu\text{F}}{\text{km}} + 200 \text{ m} \cdot 0,18 \frac{\mu\text{F}}{\text{km}} = 39,2 \text{ nF}$$

Yksivaiheinen kapasitanssi suuruus keskijänniteverkossa pienimmillään:

$$C_{01\text{pienin}} = 50 \text{ m} \cdot 0,18 \frac{\mu\text{F}}{\text{km}} = 9 \text{ nF} \quad (5)$$

Harjoituskentän Maasta erotetun verkon maasulkuvirta  $I_f$  pienimmillään:

$$I_f = \frac{j3\omega C}{1+j3\omega C R_f} U_v \quad (10)$$

$$I_f = \frac{j3 \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 9 \text{ nF}}{1+j \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 9 \text{ nF} \cdot 500 \ \Omega} * \frac{20 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 0,1 \text{ A} \quad (10)$$

Harjoituskentän Maasta erotetun verkon maasulkuvirta  $I_f$  Suurimmillaan:

$$I_f = \frac{j3 \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 39,2 \text{ nF}}{1 + j \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 39,2 \text{ nF} \cdot 500 \Omega} * \frac{20 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 0,43 \text{ A} \quad (10)$$

Harjoituskentän Maasta erotetun verkon nollajännite  $U_0$  maasulkutilanteessa Suurimmillaan:

$$U_0 = \frac{-1}{1 + j3\omega CR_f} U_v \quad (11)$$

$$U_0 = \frac{-1}{1 + j3 \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 9 \text{ nF} \cdot 500 \Omega} \frac{20 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 11,5 \text{ kV} \quad (11)$$

Harjoituskentän jännitteennostomuuntajan sammutuskuristimen  $L$  induktanssin suuruus:

$$\omega L = \frac{1}{3\omega C_0} \quad (12)$$

$$L = \frac{1}{3 \cdot 39,2 \text{ nF}} = 8,5 \text{ pH} \quad (12)$$

#### 4.6.3 Sallittu kosketusjännite

Maasulussa maasulkuvirta  $I_f$  aiheuttaa vikapaikalle maadoitusjännitteen  $U_{maad}$ , joka lasketaan yhtälön 14 perusteella. Maadoitusjännite aiheuttaa vaarallisen kosketusjännitteen  $UTP$ . Sallitut kosketusjännitteen arvo määritetään standardissa, jonka mukaan kosketusjännite ei saa ylittää yhtälön 14 mukaista arvoa missään tilanteessa. Yhtälöön 13  $R_{maad}$ :ksi on aseteltu maksimi toiminta-arvo, jossa maasulkusuojaus on toimittava sen suurimmalla arvolla  $R_f=500 \Omega$ . Valitaan standardin asettelemasta taulukosta 4.1 0,5 sekunnin kohta, ja saadaan sallitun kosketusjännitteen arvoksi 215 V.

Harjoituskentän keskijänniteverkossa voidaan käyttää kaavassa 14 kerrointa  $k=2$ , olettaen että seuraavat määräykset toteutuvat:



Standardissa mainitaan kosketusjännitesuojauksen vaatimuksista SFS-600:

Yhtälön kerroin  $k$  määräytyy maadoitusolosuhteista. Tavoitetasolla siitä käytetään arvoa  $k=2$ . Tämä tavoitetaso tarkoittaa, että muuntajan maadoituksen lisäksi pienjänniteverkko on maadoitettu standardien mukaisesti. Jos tavoitetasoa ei voida saavuttaa teknisin tai taloudellisin perustein, käytetään  $k$ :n arvoa 4. Arvoa  $k=5$  käytetään, kun koko muuntopiirin alue on huonosti johtavaa. Tällaisessa tilanteessa on tehtävä muuntajalle potentiaaliohjaus ja jokainen liittymä tulisi maadoittaa. Laskennassa pitää todeta että  $U_{maad}$  on pienempi kuin kertoimella kerrottu kosketusjännite. Laskenta tulee laskea maasulkuvirran  $I_f$  suurimmalla arvolla, jotta se täyttää kosketusjännite vaatimukset joka tilanteessa, kytkentätilanteesta riippumatta. (SFS-600, 2007)

Taulukko 4.1 Sallitut kosketusjännitteet(SFS-600, 2007)

Laukaisuaika (s)	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
U <sub>tp</sub> (V)	500	390	280	215	160	132	120	110	102

$$U_{maad} = I_f \cdot R_{maad} \quad (13)$$

$$215 \text{ V} = 0,43 \text{ A} \cdot 500 \text{ } \Omega \quad (13)$$

$$U_{maad} \leq k \cdot U_{TP} \quad (14)$$

$$215 \text{ V} \leq 430 \text{ V} \quad (14)$$

Harjoituskentän verkon suurin sallittu maadoitusresistanssin suuruus:

$$R = \frac{430 \text{ V}}{0,43 \text{ A}} = 1000 \text{ } \Omega$$

Harjoituskentän keskijänniteverkon ollessa kokonaan kytkettynä, ja  $0,43 \text{ A}$  maasulkuvirralla on suurin sallittu maadoitusresistanssi arvo  $1000 \text{ } \Omega$ .

Maasulun havaitsemiskeinoja on tähtipistejännitteen ja vaihejännitteen muutoksen mitaus sekä summavirta, virran ja jännitteen yliaallot, sekä suurtaajuiset muutosvirtojen mitaus. Virran epäsymmetriaa kuvaava nollavirta saadaan lähdön vaihevirtojen osoitinsummasta, joka saadaan kolmen vaiheen virtamuuntajien summakytkenästä tai kaape-

livirtamuuntajasta. Tähtipistejännite saadaan mitattua vaihejännitteisiin kytkettyjen jännitemuuntajien toisiokäämien avokolmiokytkennän avulla.(SFS-600, 2007)

Harjoituskentän maasulkusuojaus toteutetaan käyttämällä vakioaikareleen yhteyteen asennettavaan tähtipisteen jännitettä mittaava maasulkurele. Tähtipistejännitteen mittauksen toimintaperiaate perustuu vaihejännitteisiin kytkettyjen jännitemuuntajien toisiokäämien avokolmiokytkennän mittaukseen. Harjoituskentän maasulkusuojaus voidaan toteuttaa yhdellä maasulkureleellä niin, että mittaustieto tuodaan ennen keskijännitekojeistoa. Releen toiminta-arvon ylittyessä sen tulee katkaista sähkönsyöttö ennen jännitteennostomuuntajaa. Näin saadaan maasulkutilanteessa koko harjoituskenttä jännitteettömäksi.(SFS-600, 2007)

Maasulkusuojaus voidaan toteuttaa myös jokaiseen keskijännitelähtöön asennettavalla omalla maasulkureleen avulla. Myös useamman releen avulla toteutetussa maasulkusuojuuksessa tulee releen toiminta-arvojen ylittyessä sähkönsyötön katkaisun tapahtua ennen jännitteennostomuuntajaa. Tähtipisteenjännitteen mittaustieto kannattaa tuoda samalta jännitemittamuuntajalta ennen keskijännitekiskoa, vaikka jokaisella lähdöllä olisikin omat maasulkureleet.

Jakeluverkon käytössä olevan keskijänniteverkon maasulkusuojausyksikkö on yleensä liitetty yhteyteen jälleenkytkentäyksikön kanssa niin, että maasulkureleen havahtuessa se antaa käskyn jälleenkytkentäyksikölle, joka käynnistää jälleenkytkentäyksikköön ohjelmoidun kytkentäsyklin. Harjoituskentän maasulkurelettä ei tule liittää jälleenkytkentä toimintoa sähköturvallisuus syistä.

#### **4.6.4 Keskijänniteverkon jälleenkytkennät**

Keskijännite avojohto- ja sekaverkoissa, joissa on käytetty maa- ja ilmajohtoja käytetään automaattista jälleenkytkentää, joka toimii maasulku- ja vikatilanteissa. Maakaapeliverkossa ei yleensä käytetä jälleenkytkentöjä, koska maakaapeli on suojassa maan sisällä, ja siihen kohdistuvat viat eivät poistu yleensä automaattisesti. Harjoituskentän keskijänniteverkossa ei ole tarkoitusta käyttää jälleenkytkentäyksikköä sähköturvallisuus syistä.

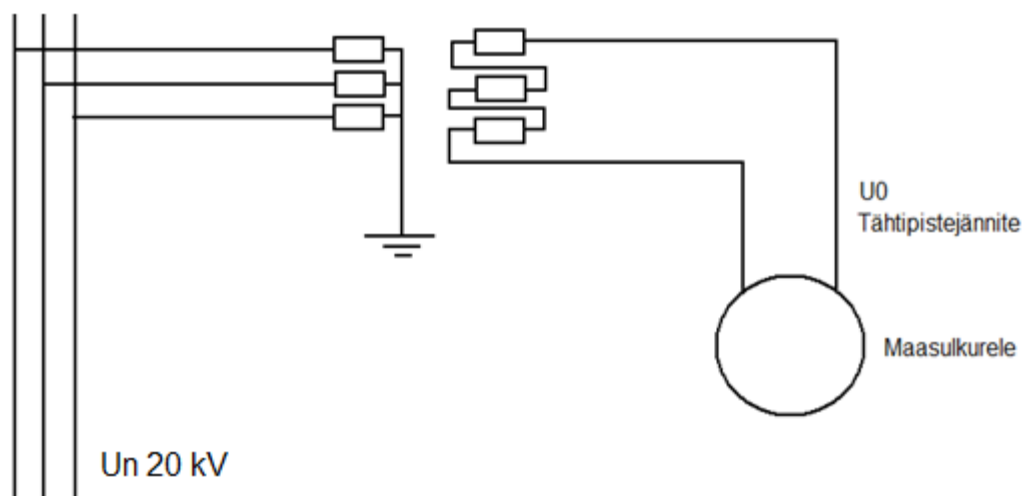
Jälleenkytkentäyksikkö saa käskyn ylivirta- tai maasulkureleeltä, ja käynnistää jälleenkytkentäsyklin. Vikatilanne yritetään korjata ensin pikajälleenkytkennällä (PJK). PJK tekee verkon noin sekunnin ajaksi jännitteettömäksi, minkä tarkoituksena on sammuttaa ohimenevän vian valokaari. Lyhytkestoinen PJK näkyy pienjännitepuolella hetkellisenä jännitekuoppana, jos vika ei poistu pikajälleenkytkennän aikana, sitä seuraa aikajälleenkytkentä (AJK). AJK tekee verkon noin minuutin ajaksi jännitteettömäksi, minkä tarkoituksena on odottaa, että vikatilanne poistuisi tänä aikana automaattisesti. Molemmat jälleenkytkennät voidaan toistaa useampaan kertaan, jos vika ei poistu jälleenkytkentöjen avulla tulee lopullinen jännitteen katkaisu, ja sähköjä jännitteen palauttaa takaisin manuaalisesti. Johtojen oikosulkukestoisuutta tarkistettaessa on otettava huomioon mahdollisten jälleenkytkentöjen johtimia lämmittävä vaikutus. Käytettäessä suuri poikkipintaisia johtimia ja maakaapeleita on jälleenkytkennöillä merkittävä johtimia lämmittävä vaikutus. (Lakervi, 2008)

## 5 HARJOITUSKENTÄN SUOJUKSIEN ASETTELU

### 5.1 Mittauksen toteutus

Harjoituskentän keskijänniteverkon virran mittaus toteutetaan virtamuuntaja mittauksen avulla. Virtamuuntajien muuntosuhde tulee asetella jännitteennostomuuntajan näennäis-tehon  $100\text{ kVA}$ :n perusteella, ja siitä laskettu nimellisvirta redusoituna keskijänniteverkkoon. Jännitteennostomuuntajan nimellisvirta  $I_n$  redusoituna keskijänniteverkkoon on  $3\text{ A}$ , ja virtamuuntajien muuntosuhteena voidaan käyttää  $1:1$ . (Vattenfall, 2011)

Harjoituskentän jännitteen mittaukseen käytettävät jännitemittamuuntajat on sijoitettava ennen virtamuuntajia niiden suojaustoimialueen vuoksi. Tähtipisteen jännitemittaus kytketään jännitteenmuuntajien kautta keskijänniteverkon vaihejännitteisiin. Tätä kytkentää kutsutaan avokolmiokytkennäksi. Kolmioon kytkettyjen jännitemuuntajien yksi kulma jätetään avoimeksi. Harjoituskentän keskijänniteverkossa tähtipistejännitteen suuruus nousee maasulkutilanteessa vaihejännitteen tasolle. Jännitemittamuuntajien muuntosuhde tuleeikin mitoittaa niin, että vikavastuksettomassa maasulussa tähtipisteen jännite on vaihejännitteen suuruinen, ja jännitemittamuuntajan toision avokolmion jännite on  $100$  volttia. Jännitemittamuuntajan muuntosuhteena tulisi käyttää  $200:1$ , mikä rajoittaa jännitemittamuuntajan avokolmion jännitteen  $100$  volttiin. Tähtipistejännitteen kytkentäkuva on esitetty kuvassa 5.1. (Smeds, 2010)



Kuva 5.1 Keskijänniteverkon tähtipistejännitteen mittaus

## 5.2 Oikosulkusuojauksen asettelu

Oikosulkusuojauksen tulee toimia kaikissa tilanteissa selektiivisesti niin, että vikapaikka lähinnä oleva sulake tai rele toimii ennen seuraavaa. Jakeluverkossa oikosulkusuojan toimialue tulee kasvaa, mitä lähemmäs syöttävää verkkoa mennään. Näin varmistetaan, että vikapaikkaa lähin sulake toimii, ja sähköittä oleva verkko jää mahdollisimman pienelle alueelle. (Verkostosuositus SA 5:94, 2005)

Harjoituskentän oikosulkusuojien tulee toimia selektiivisesti syöttävän verkon oikosulkusuojien kanssa. Lähdettäessä 800 kVA:n kiinteistömuuntajalta harjoituskentän päärakennukselle, välikaapelin  $2 \times 4 \times 240$  AL ylikuormitus- ja oikosulkusuojana toimii  $3 \times 630$  A gG- sulakkeet. Harjoituskentän päärakennuksen sähkökeskuksen pääsulakkeina tulisi käyttää  $3 \times 400$  A gG- sulakkeita. Pääkeskuksessa harjoituskentän jännitteennostomuuntajalle menevään lähtöön pitäisi varata  $3 \times 250$  A sulakkeet.  $3 \times 250$  A Sulakkeet toimisivat muuntajan ja etuvastuksien oikosulkusuojana, ja estäisivät kiinteistön pääsulakkeiden toimimisen harjoituskentällä tapahtuvassa vikatilanteessa. Keskijännitelähtöjen ylikuormitus- ja oikosulkusuojana toimivien vakioaikareleiden toiminta-arvot, ja toiminta-ajat on asetettava toimimaan selektiivisesti harjoituskentän pääsulakkeiden kanssa. Keskijänniteverkon relesuojauksen toiminta-arvot tulee asettaa pienemmäksi kuin harjoituskentän pääsulakkeiden  $3 \times 250$  A.

Virta-arvoja verratessa toisiinsa virrat pitää redusoida samaan jänniteportaaseen, jotta suojaus voitaisiin asettaa toimimaan oikein. Harjoituskentän 20 kV:n keskijänniteverkon virta-arvot redusoidaan pienjänniteportaaseen kertomalla jännitteennostomuuntajan muuntosuhteella  $\mu$ . Keskijänniteverkon oikosulkusuojauksen toiminta-arvoja aseteltaessa tulee ottaa huomioon, että se ei saa toimia pienjänniteverkossa tapahtuvassa vikalanteessa. Harjoituskentän keskijänniteverkon suojauksen toiminta-arvoja aseteltaessa tätä ei voida kuitenkaan toteuttaa, koska harjoituskentän pienjänniteverkossa tapahtuvassa oikosulussa oikosulkuvirran arvot ylittävät releen asetteluarvot, sekä harjoituskentän pääsulakkeiden toiminta-arvon. Pienjänniteverkossa oikosulkusuojana toimii jakelu- muuntajan pienjännitepuolella olevat sulakkeet, jotka tulee toimia ennen keskijännitelähdön relesuojausta.

### 5.2.1 Vakioaikareleen toiminta-arvot

Maksimi kuormitusvirran arvo keskijännitelähtöjen releillä redusoituna  $3 \times 250 \text{ A}$ : n sulakkeiden arvoille:

$$I'_k = \frac{0,4 \text{ kV}}{20 \text{ kV}} * 250 \text{ A} = 5 \text{ A} \quad (2)$$

Toiminta-arvoja aseteltaessa on otettava huomioon harjoituskentän pääsulakkeiden rajoittama virta, joka antaa kaikille kolmelle keskijännitelähdölle jatkuvassa kuormituksessa enintään  $5 \text{ A}$ . Sopiva toiminta-arvo releen ”suuressa katkaisussa” tulee asettaa niin, että suojaus reagoi myös kaksivaiheisessa oikosulkutilanteessa. Jakelumuuntajien kytkentävirtasysäyksen vaikutus pitää myös huomioida asettelussa, ja suojauksen selektiivisyys harjoituskentän pääsulakkeiden kanssa.

Keskijänniteverkossa tapahtuvan oikosulkuvirran suuruus redusoituna pienjänniteverkkoon:

$$I_{k1} = \frac{20 \text{ kV}}{0,4 \text{ kV}} * 41 \text{ A} = 2050 \text{ A} \quad (2)$$

Harjoituskentän keskijänniteverkkoon kytkettäessä  $200 \text{ kVA}$ : n jakelumuuntajaa ottaa se kytkentätilanteessa  $500 \text{ A}$ :n kytkentävirtasysäyksen redusoituna pienjänniteverkon arvoiksi kahden sekunnin jälkeen kytkennästä. Harjoituskentän pääsulakkeet kestävät  $1000 \text{ A}$ : n virtaa kahden sekunnin ajan. Vakioaikareleen toiminta-arvot tulee asettaa näiden arvojen avulla. Suojauksen asetteluarvo tulee reagoida myös kaksivaiheisen  $35 \text{ A}$ : n oikosulkuvirtaan. Releen tulee toimia myös tilanteessa, jossa kuormitus ylittää harjoituskentän maksimikuormituksen. Releen ”pienen katkaisun” arvoksi olisi sopiva  $200 \text{ A}$ : n toiminta-arvo redusoituna pienjänniteverkkoon.

Keskijänniteverkon vakioaikareleen ”Pienen katkaisun” toiminta-arvo redusoituna keskijänniteverkon arvoksi:

$$I' = \frac{0,4 \text{ kV}}{20 \text{ kV}} * 200 \text{ A} = 4 \text{ A} \quad (2)$$

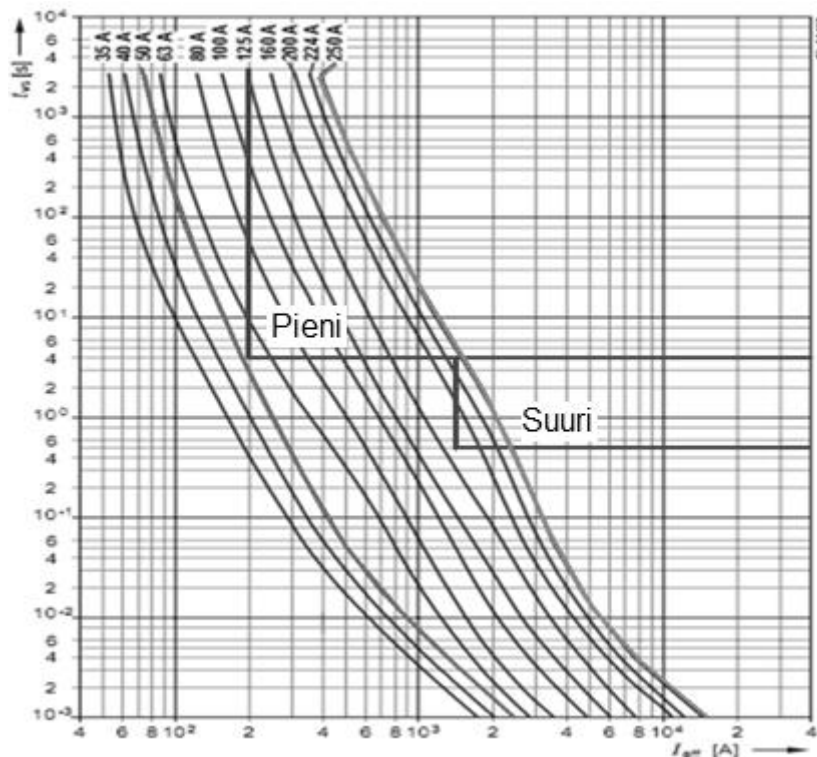
Keskijänniteverkon ”pienen katkaisun” sopiva toiminta-arvo on  $4\text{ A}$  ja aika  $4\text{ sekuntia}$ . Releen ”suuren katkaisun” toiminta-arvot tulee olla pienemmät ja nopeammat kuin harjoituskentän  $3 \times 250\text{ A}$  pääsulakkeiden toiminta-arvot. Harjoituskentän  $3 \times 250\text{ A}$  pääsulakkeiden toiminta-arvo on  $0,4\text{ sekunnin}$  kohdalla on  $2800\text{ A}$ , joten sopiva releen asetteluarvo ”Suurelle katkaisulle” on  $0,4\text{ sekuntia}$  ja  $30\text{ A}$ . Kuvassa 5.2 nähdään suojalaitteiden toiminta-alueet.

Harjoituskentän pienjänniteverkon sulakkeiden maksimi toiminta-arvot, jotta harjoituskentän verkko toimisi selektiivisesti keskijänniteverkon relesuojauksen  $0,4\text{ sekunnin}$  ja  $4\text{ sekunnin}$  toiminta-arvojen mukaan:

$$I' = \frac{20\text{ kV}}{0,4\text{ kV}} * 30\text{ A} = 1500\text{ A} \quad (2)$$

$$I' = \frac{20\text{ kV}}{0,4\text{ kV}} * 4\text{ A} = 200\text{ A} \quad (2)$$

Harjoituskentänverkko toimii selektiivisesti, jos jakelumuuntajien lähdoissä käytetään maksimissaan  $3 \times 50\text{ A}$ :n sulakkeita. Jos jakelumuuntajassa tapahtuu oikosulku ennen pienjännite sulakkeita, toimii keskijännitelähdön relesuojaus oikosulkusuojana. Harjoituskentän pienjännitepuolella maksimikuormitusteho on  $34\text{ kW}$  käytettäessä  $3 \times 50\text{ A}$ :n sulaketta pienjännitelähdössä. Kuormittamalla useampaa pienjännitelähtö samanaikaisesti on maksimi kuormitusteho  $100\text{ kW}$  koko harjoituskentällä.



Kuva 5.2 Suojalaitteiden toimialueet

### 5.3 Maasulkusuojauksen asettelu

Harjoituskentän keskijänniteverkon maasulkusuojaus tulee toteuttaa tähtipistejännite mittauksen avulla, koska maasulkuvirran  $I_f$  arvo jää lyhyiden johtopituuksien vuoksi pieneksi  $0,1$  A. Maasulkuvirran  $I_f$  tulisi ylittää  $1$  A:n virta-arvo, jotta voitaisiin käyttää suunnattua maasulkusuojausta, ja lisäksi näin pieniä maasulkuvirran arvoja on virta- muuntajien läpi vaikea havaita.

Harjoituskentällä tähtipistejännitteen arvo nousee maasulkutilanteessa vaihejännitteen tasolle lyhyiden johtopituuksien vuoksi. Sopiva maasulkureleen toiminta-arvo on  $10\%$  maksimiarvosta, ja havahtumisaika  $0,5$  sekuntia. Harjoituskentällä tapahtuvassa maasulkutilanteessa tähtipistejännitteen ylittäessä  $2$  kV:n arvon  $0,5$  sekunnin ajan maasulkurele havahtuu, ja katkaisee sähkönsyötön. Maasulkureleen tulee katkaista sähkönsyötö ennen jänniteennostomuuntajaa, jotta koko harjoituskentän verkko tulisi jännitteetömäksi. Normaalisissa jakeluverkkokäytössä tulisi ottaa huomioon peräkkäisten maasulkureleiden toiminta-aikojen välinen aikaporras.



## 6 HARJOITUSKENTÄN KÄYTTÖTARKOITUS

Harjoituskentän verkolla on tarkoitus saada aikaan mahdollisimman todenmukaisia tilanteita, missä opiskelijat voisivat valmistautua verkostoalan työelämän tilanteisiin.

Mielestäni eniten työtä verkon kunnossapidossa aiheuttavat johtoteitä ympäröivät puut, jotka tuulen tai lumikuorman vaikutuksesta painuvat keskijännite avojohtimien päälle. Verkkoyhtiöllä ei ole oikeutta kaataa puita, jotka ovat johtotien ulkopuolella kuin tilanteessa, jossa puu makaa johdolla tai on kaatumassa johtojen päälle. Tämänlaista koulutustilannetta on vaikea toteuttaa koulutusympäristössä. Tilannetta voitaisiin harjoitella sopimalla rajattava vikapaikka, joka erotetaan verkosta korjaustöiden ajaksi, ja kytetään verkko takaisin jännitteelliseksi.

Verkossa esiintyviä vikoja korjattaessa on osattava käyttää kuormanerottimia, jotta viikaantunut verkonosa voitaisiin rajata mahdollisimman pieneksi, ja pidempi aikaisten sähköttömien asiakkaiden määrä olisi mahdollisimman pieni. Tästä syystä harjoituskentällä olisi tärkeää harjoitella vianrajausta, ja syöttösuuntien vaihtoa kuormanerottimien avulla. Pienjänniteverkossa yleisimpiä vikoja ovat jakeluverkossa muuntajan lähdön sulakkeiden palaminen, ja ilmajohtoa uhkaavat puut. Varsinkin kovilla pakkaskausilla on yleinen tilanne, että muuntajan lähdön sulakkeet palavat ylikuormituksen vuoksi. Tällaisia tilanteita varten voitaisiin harjoituskentällä harjoitella muuntajan lähtöjen sulakkeiden vaihtoa.

Tärkeitä koulutuksia olisi myös maadoitusten tekemisen harjoittelu. Harjoituskentällä voidaankin harjoitella kojeistonlähtöjen maadoitusta, pylväiden päätemaadoitusta, työmaadoituksen kytkemistä sekä kiinteiden verkon maadoitusten rakentamista. Tärkeää olisi harjoitella jännitetöitä, koska suurin osan verkon kunnossapitotöistä pyritään suorittamaan niin, ettei asiakkaille tulisi sähkön jakelukeskeytyksiä. Harjoituskentällä tulisi olla mahdollisimman paljon rakennettavia osuuksia. Missä voitaisiin harjoitella verkon rakennustilanteita, kuten johtimien kiinnittämistä pylväisiin, kytkinvarokkeiden asennusta, jonovarokeytkimien asennusta, kaapeleiden kytkemistä mittakeskuksiin ja mittareihin. Hyviä harjoituskohteita olisi myös keskijännitelähdön relesuojausten asettelu, ja sen toimivuuden toteaminen.

## 7 Yhteenveto

Opinnäytetyö tavoitteena oli tutustua Tampereen Aikuiskoulutuskeskukselle tulevaa verkostoasentajien koulutuskäyttöön tulevaa harjoituskenttää. Harjoituskentälle olisi tarkoitus rakentaa liitteen 2 pääjohtokaavion mukainen keskijänniteverkko. Keskijänniteverkko olisi tarkoituksena toteuttaa niin, että rakennuksen sisälle tulisi normaalikokoinen keskijännitekojeista, ja siitä lähtisi rakennuksen pihassa oleva keskijännite harjoituskenttä. Harjoituskentällä olisi tarkoitus olla mahdollisimman todenmukainen jakeluverkko. Opinnäytetyöni keskittyi keskijänniteverkon osuuteen, ja jättää pienjänniteverkon kokonaan huomioimatta työn rajoittamiseksi.

Harjoituskentän keskijännitekojeistolle otetaan suunnitelmassani sähkönsyöttö lisärakennuksen pääkeskuksen pienjänniteverkosta. Normaali pienjännite nostetaan jännitteennostomuuntajan avulla yleisimmän Suomessa käytössä olevaan keskijännitetasoon 20 kV: n. Opinnäytetyössäni keskitytään siihen miten muuntajien nopea virran nousu pystyttäisiin rajoittamaan, jotta pienjänniteverkossa olevat sulakesuojaukset eivät toimisi. Opinnäytetyössä käsiteltiin lisäksi keskijänniteverkon laskennalliset arvot ja suojausten toiminta-arvojen asetteluarvot.

Minulle oli opinnäytetyön tekemisestä paljon apua tulevaisuutta ajatellen, koska käsitelin opinnäytetyötä tehdessäni useita sellaisia asioita, joihin en ollut törmännyt vielä töissä tai opiskeluni aikana. Opinnäytetyössäni käsitelin asioita mitkä katsoin harjoituskentän verkon kannalta tärkeimmiksi. Tarkoituksenmukaisesti jätin pois osan enkä käsitellyt koko verkon kokonaisuutta, jotta opinnäytetyöni pysyisi sille tarkoitetuissa aikarajoissa. Enkä olisi liian laajassa työssä pystynyt keskittymään niin laajasti asioihin, jotka katsoin työn kannalta tärkeimmäksi. Toivon että työntilaaaja saa siitä paljon käyttökelpoisia ideoita verkon toteutukseen.

## LÄHTEET

ABB TTT. 2000. Teknisiä Tietoja ja Taulukoita, ABB Oy. Vaasa: Ykkösoffset Oy

HeadPower. 2009. Verkoston Vakiorakenteet Suositeltavat etäisyysvaatimukset ilma-johtoverkot: Headpower Oy

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

Pihlakari, J-P. .2010. Leppävaaran yksikön sähkötekniikan laboratorion suurjännitelaitteiston kokoonpanosuunnitelma ja laboratorion työohjeet. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö

SFS 6001 + A1 + A2. 2009 SUURJÄNNITESÄHKÖASENNUKSET: Suomen Standardisoimisliitto SFS RY.

SFS-KÄSIKIRJA-600. Pienjännitesähköasennukset ja sähkötyöturvallisuus 2007: Suomen Standardisoimisliitto SFS RY.

Smeds, Lauri. 2010. Sähköverkon teknistaloudellisen ohjeiston laatiminen maastosuunnittelijoiden ja käyttöhenkilöiden käyttöön. Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö

Vattenfall Verkko Oy. 2011. Tietoa sähkösuunnittelijalle ja sähköurakoitsijalle. Luettu 15.01.2011. [http://www.vattenfall.fi/fi/file/Urakoitsijaohje\\_16671159.pdf](http://www.vattenfall.fi/fi/file/Urakoitsijaohje_16671159.pdf)

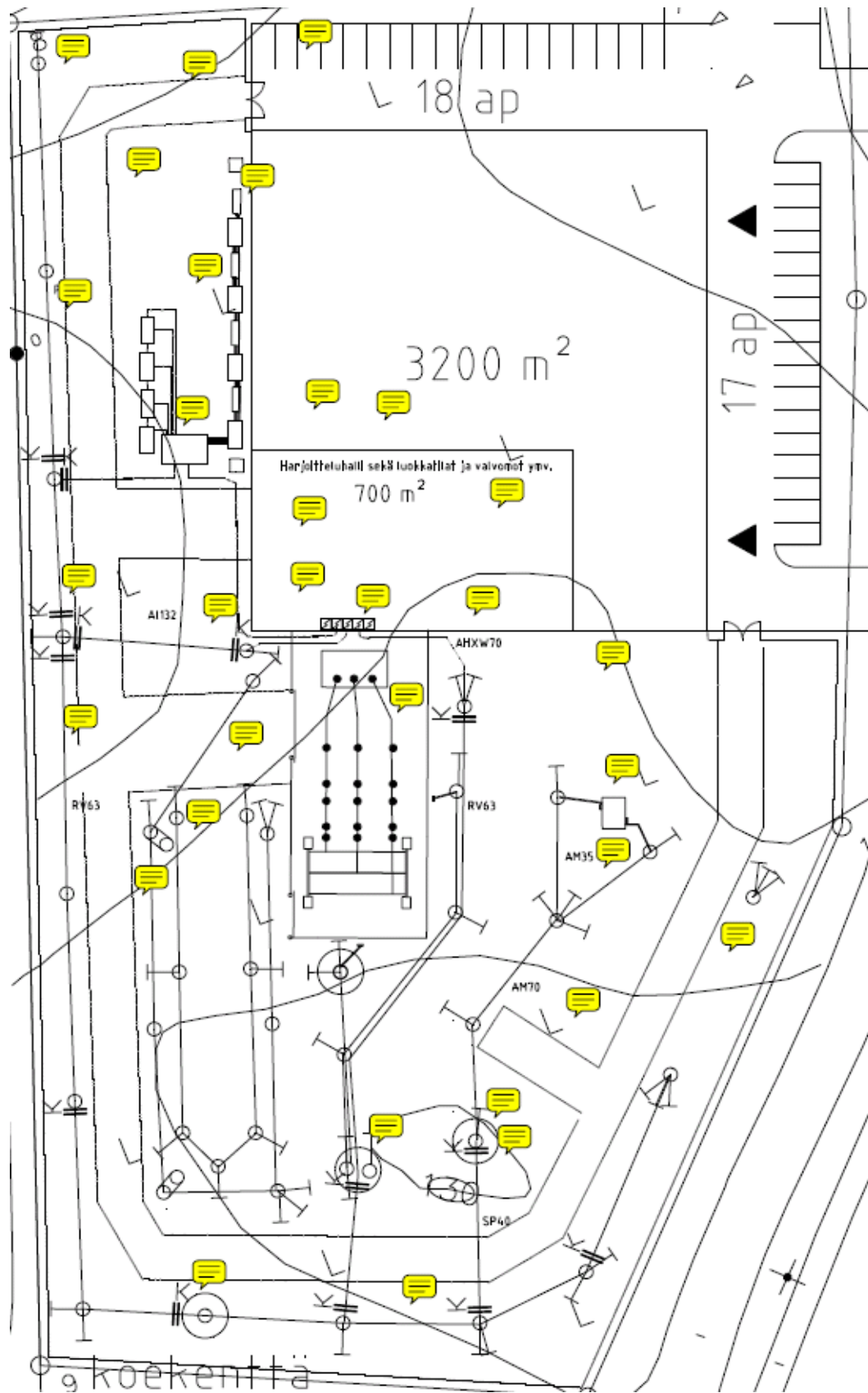
Verkostosuositus RJ 19:06. 2006. Pylväserotinasemien ja muuntopiirien maadoitukset standardin SFS 6001 mukaan. Helsinki: Energiateollisuus ry.

Verkostosuositus RM 5:03. 2003. Pylväsmuuntamon maadoitusjohtimet, ylijännitesuojaus ja eläinsuojaus. Helsinki: Sähköenergialiitto ry.

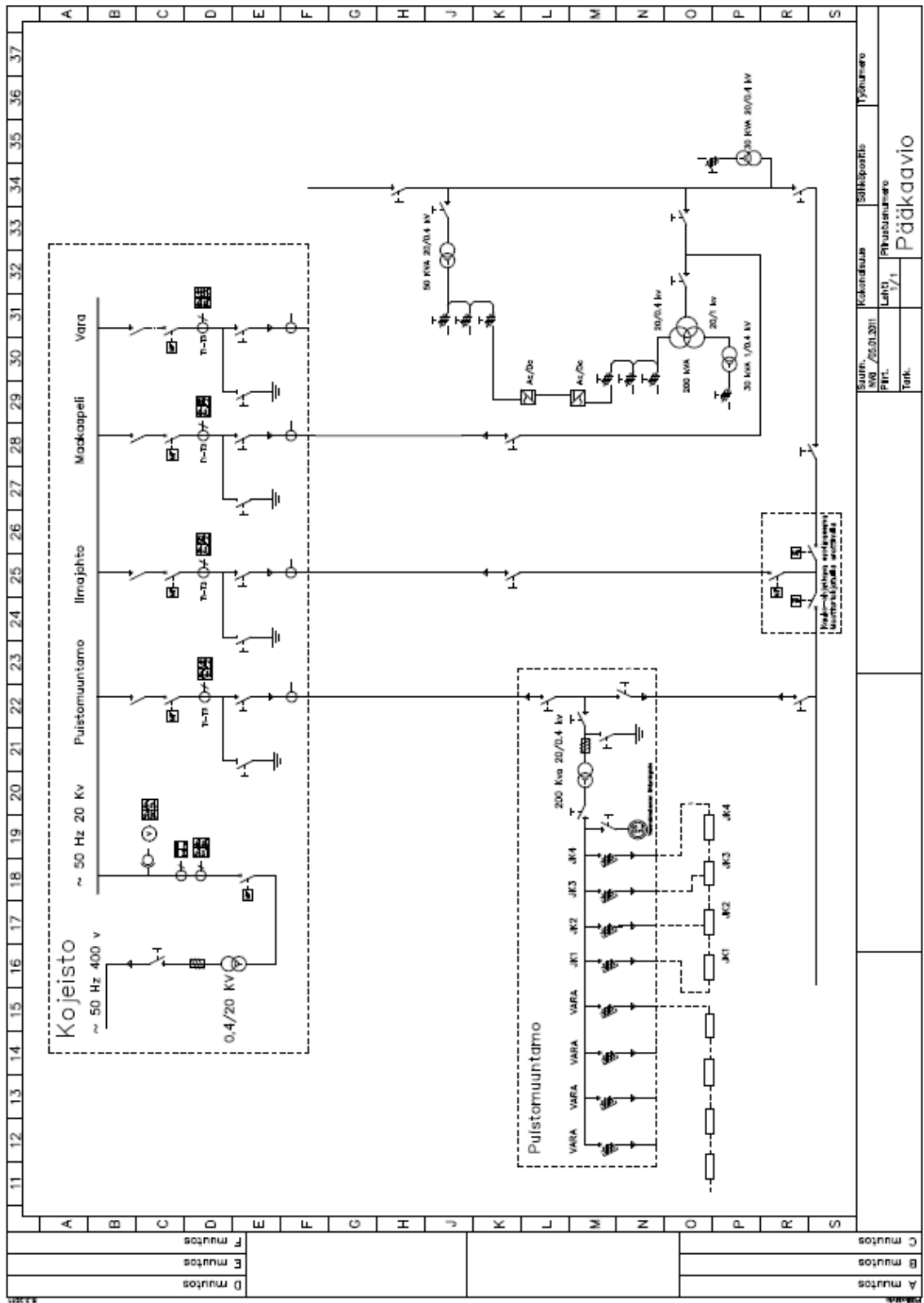
Verkostosuositus SA. 5:94. 1994. Keskijänniteverkon sähköinen mitoittaminen. Helsinki: Energiateollisuus ry.

# LIITTEET

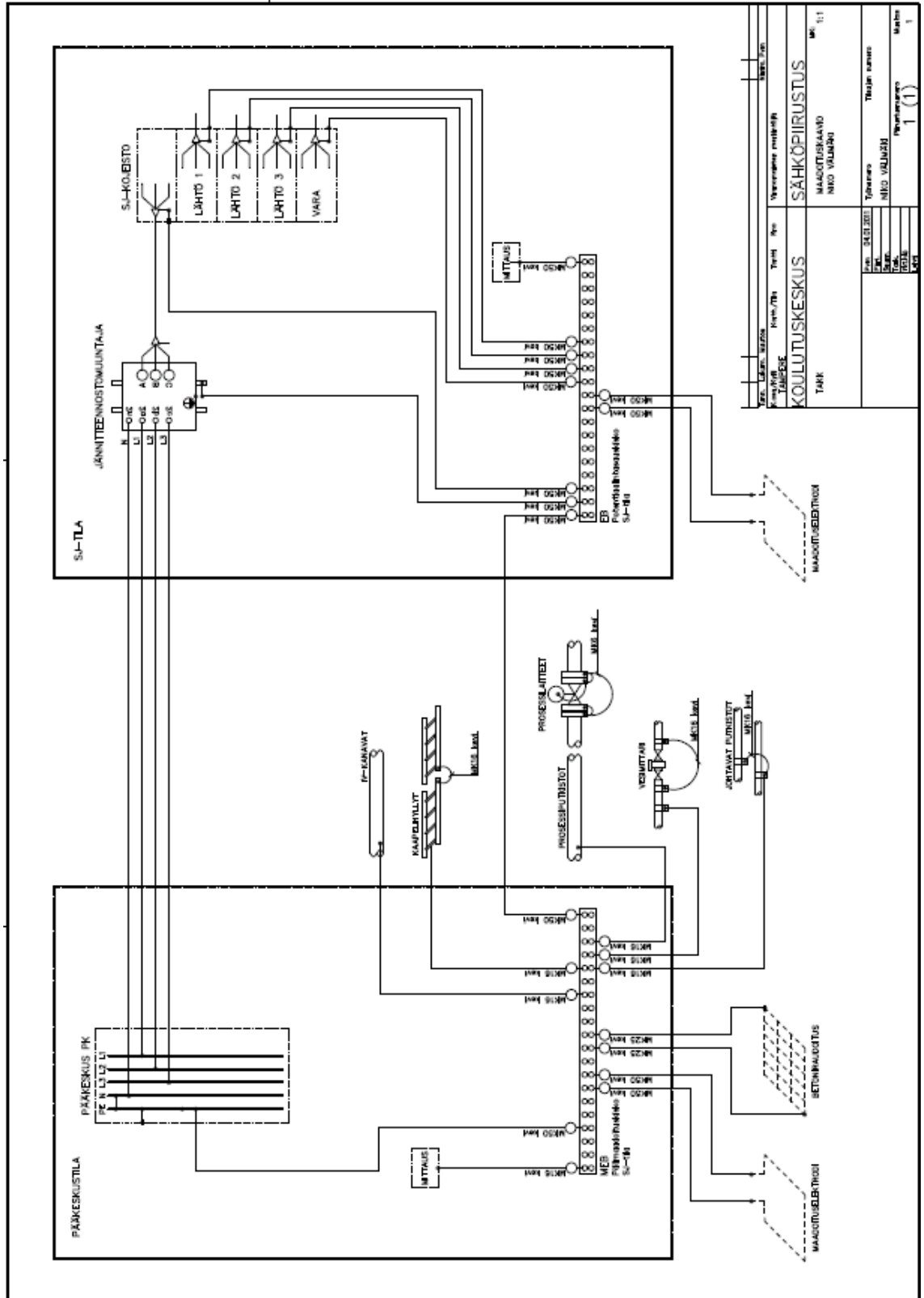
Liite 1. Harjoituskentän asemakaava



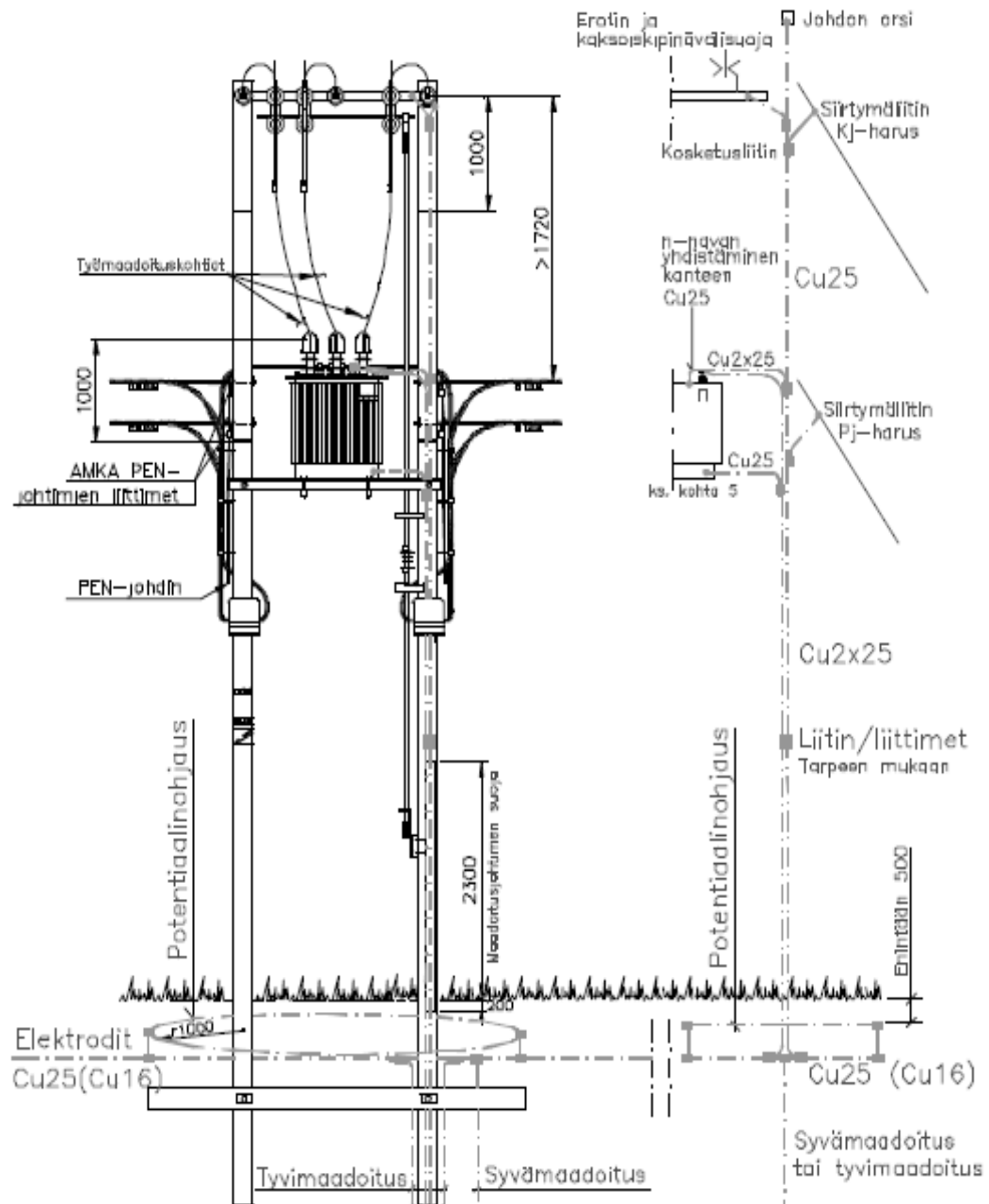
Liite 2. Harjoituskentän pääjohtokaavio



Liite 3. Harjoituskentän keskijännitekojeiston maadoituskaavio



## Liite 4. Pylväsmuuntajan maadoitukset (Verkostosuositus RJ 19:06, 2005)

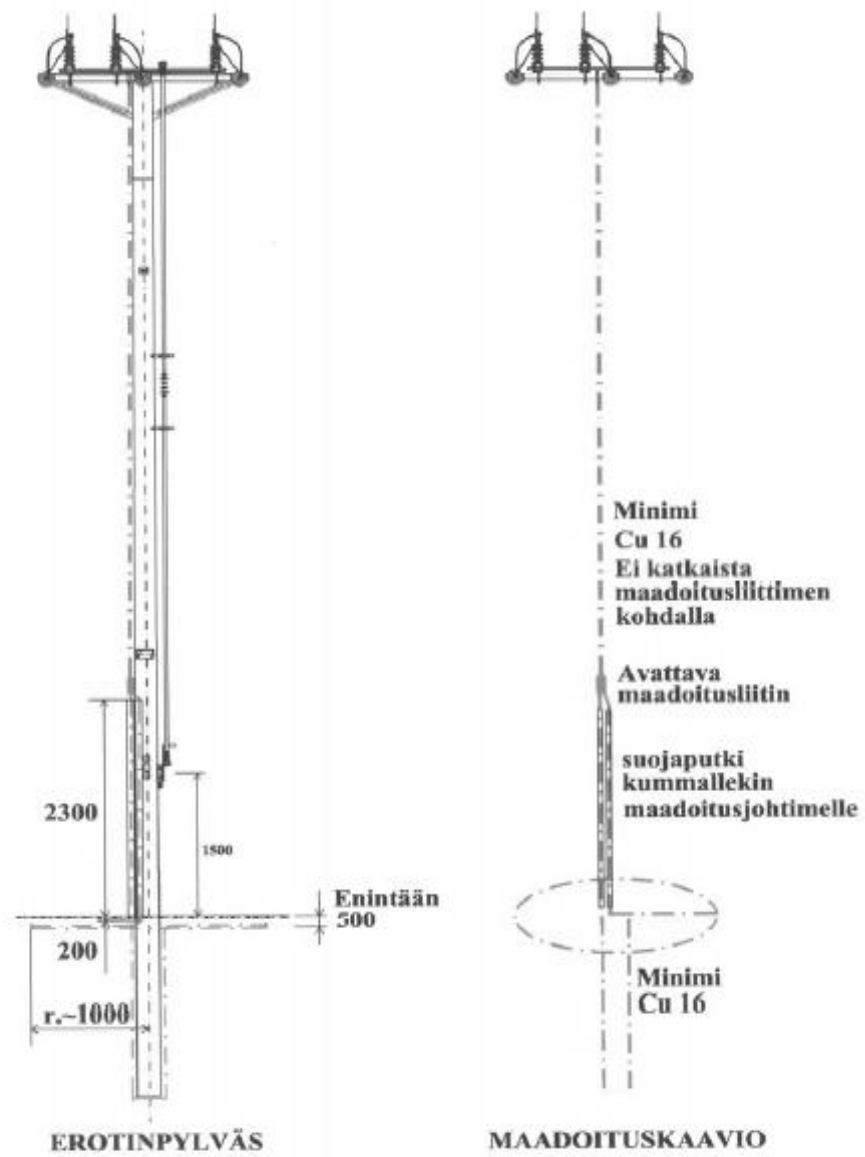


Yhteinen maadoituselektrodi.  
 Eristämättömät maadoitusjohtimet.  
 Muuntajan alaosassa suojamaadoituskohtio.  
 Kaksoiskipinäväyläsuoja erottimessa.

KAAVIO

Cu25 maad-johtimet  
 RM5:03 LIITE 1

Liite 5. Käsikäyttöisen pylväserottimen maadoitusohje  
(Verkostusuositus RJ 19:06, 2005)

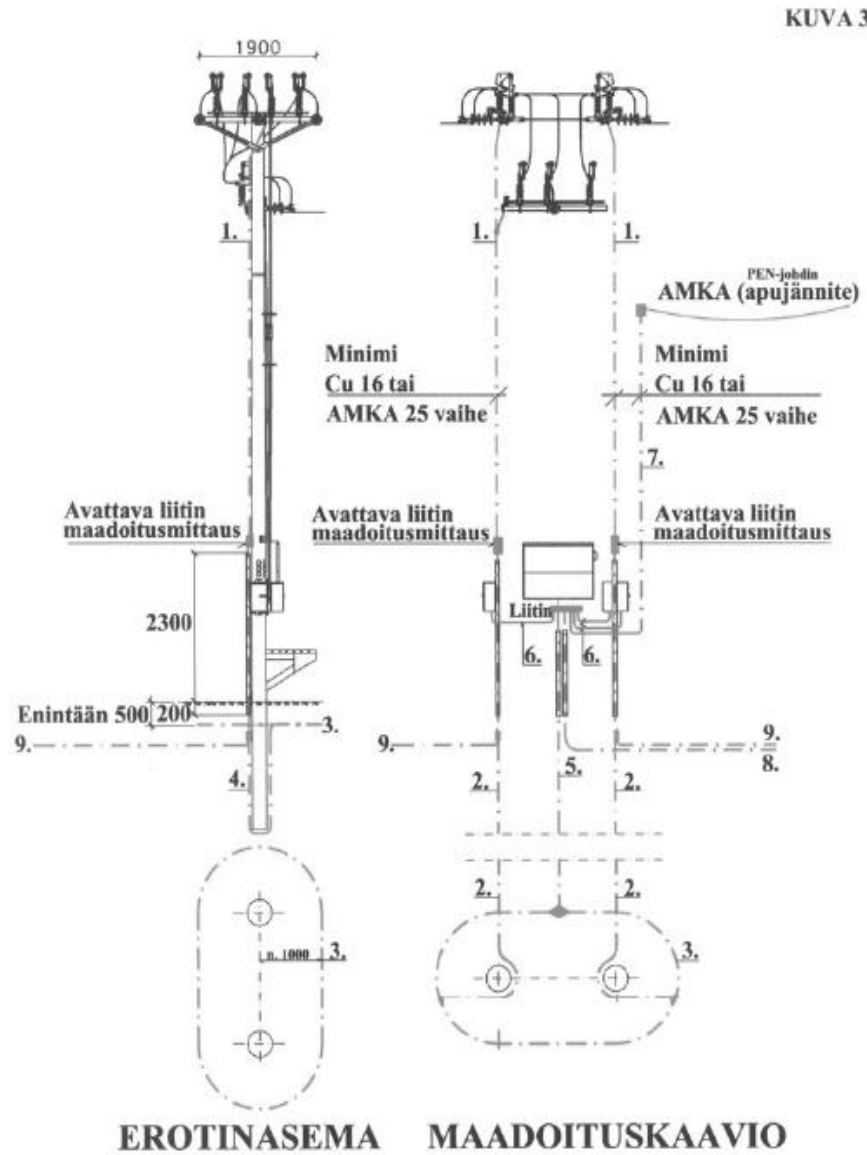


KÄSIN OHJATTAVAN PYLVÄSEROTTINASEMAN MAADOITUS RJ 19:06



Liite 6. Kauko-ohjattavan pylväserottimen maadoitusohje  
(Verkostusuositus RJ 19:06, 2005)

Kuva 3 Kauko-ohjattavan pylväserottinaseman maadoitus, apujännite lähimuuntopiiristä



Liite 7. 10 kV ja 20 kV Ilmajohtojen johtotietoja (Verkostusuositus SA 5:94, 2005)

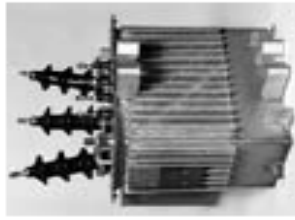
Johdin	Vaiheresistanssi (DC)		Vaihe-reaktanssi Xv Ω/ km 3)	Maakapa- sitanssi Cm μF/km 4)	Käyttöka- pasitanssi Ck μF/km 3)	Suurin sallittu kuormitusvirta In A 5)	Suurin sallittu 1 s oikosulkuvirta		Jäähtymisaikavakio τ min
	Rv Ω/ km						Ik kA T1-liittimet	Ik kA T2-liittimet	
	+20 °C 1)	+40 °C 2)							
Cu 16	1,14	1,23	0,412	0,0061	0,0088	145	2,2	2,3	3
Cu 25	0,718	0,774	0,398	0,0061	0,0092	195	3,5	3,7	4
Cu 35	0,526	0,567	0,387	0,0061	0,0094	240	4,8	5,1	5
Cu 50	0,365	0,394	0,377	0,0061	0,0097	305	6,9	7,3	7
Cu 70	0,266	0,287	0,365	0,0061	0,010	370	9,5	10,1	9
Cu 95	0,195	0,210	0,355	0,0061	0,010	465	13,1	13,8	11
Cu 120	0,150	0,162	0,348	0,0061	0,011	535	17,1	18	13
Al 25	1,16	1,25	0,397	0,0061	0,0092	170	2,1	-	3
Al 40	0,725	0,783	0,382	0,0061	0,0095	230	3,5	-	4
Al 62	0,459	0,496	0,368	0,0061	0,0099	305	5,6	-	6
Al 99	0,288	0,311	0,354	0,0061	0,010	415	8,7	-	8
Al 132	0,218	0,236	0,344	0,0061	0,011	495	11,6	-	10
Al 178	0,162	0,175	0,335	0,0061	0,011	600	15,6	-	13
Al 201	0,143	0,155	0,331	0,0061	0,011	645	17,7	-	15
AlMgSi 25	1,37	1,48	0,397	0,0061	0,0092	155	2,5	-	3
AlMgSi 40	0,834	0,901	0,382	0,0061	0,0095	210	3,5	3,7	4
AlMgSi 62	0,527	0,569	0,368	0,0061	0,0099	285	5,5	5,8	6
AlMgSi 99	0,332	0,359	0,354	0,0061	0,010	390	8,8	9,3	8
AlMgSi 132	0,251	0,271	0,344	0,0061	0,011	460	11,7	12,4	10
AlMgSi 178	0,188	0,203	0,335	0,0061	0,011	560	15,8	16,7	13
AlMgSi/Fe 21/4 Fersmetal	1,56	1,68	0,398	0,0061	0,0092	145	1,9	2	3
AlMgSi/Fe 106/25	0,317	0,343	0,344	0,0061	0,011	400	9,4	9,9	10
Al/Fe 7/9 Bantam	4,31	4,66	0,413	0,0061	0,0088	80	0,6	0,7	2
Al 11/14 Magpic	2,71	2,93	0,397	0,0061	0,0092	110	1,1	1,2	3
Al/Fe 21/4 Swan	1,35	1,46	0,398	0,0061	0,0092	155	2	2,1	3
Al/Fe 34/6 Sparrow	0,847	0,915	0,383	0,0061	0,0095	210	3,2	3,3	4
Al/Fe 42/25 Savo	0,682	0,737	0,365	0,0061	0,010	250	4	4,2	7
Al/Fe 54/9 Raven	0,535	0,578	0,368	0,0061	0,010	280	5,1	5,3	6
Al/Fe 75/14 Loviisa	0,380	0,411	0,357	0,0061	0,010	335	7,1	7,5	9
Al/Fe 85/14 Pigeon	0,337	0,364	0,354	0,0061	0,010	360	8	8,4	9
Al/Fe 89/52 Dotterel	0,323	0,349	0,342	0,0061	0,011	400	8,4	8,8	13
Al/Fe 93/39 Imatra	0,310	0,335	0,344	0,0061	0,011	405	8,7	9,2	12
Al/Fe 106/25 Suursevo	0,279	0,301	0,344	0,0061	0,011	430	10	10,5	10
Al/Fe 108/23 Vaasa	0,266	0,287	0,344	0,0061	0,011	420	10	10,5	10
Al/Fe 148/68 Kuopio	0,196	0,212	0,328	0,0061	0,011	550	13,9	14,6	16
Al/Fe 152/25 Ostrich	0,190	0,205	0,335	0,0061	0,011	550	14,3	15	15
Al/Fe 305/39 Duck	0,095	0,103	0,314	0,0061	0,012	845	28,7	30,2	22
Johdin	Vaiheresistanssi (DC)		Vaihe-reaktanssi Xv Ω/ km 3)	Maakapa- sitanssi Cm μF/km 4)	Käyttöka- pasitanssi Ck μF/km 3)	Suurin sallittu kuormitusvirta In A 5)	Suurin sallittu 1 s oikosulkuvirta		Jäähtymisaikavakio τ min
Rv Ω/ km		Ik kA T1-liittimet					Ik kA T2-liittimet		
+20 °C 1)	+40 °C 2)								
PAS 35	0,986	1,065	0,324	0,005	0,011	200	-	3,2	7
PAS 50	0,720	0,778	0,312	0,005	0,012	245	-	4,3	8
PAS 70	0,493	0,533	0,302	0,005	0,012	310	-	6,4	10
PAS 95	0,363	0,392	0,292	0,005	0,013	370	-	8,6	13
PAS 120	0,288	0,311	0,284	0,005	0,013	430	-	11	15
PAS 150	0,236	0,255	0,277	0,005	0,013	485	-	13,5	18
PAS 185	0,188	0,203	0,270	0,005	0,014	560	-	17	20
20 kV RIIPPUJOHDOT									
SAMKA 3x70	0,446	0,482	0,140	0,21	0,21	180	5	5	42
SAMKA 3x120	0,256	0,277	0,130	0,25	0,25	250	8,5	8,5	60
SAMKA 3x185	0,168	0,182	0,120	0,30	0,30	310	13	13	65
SAMI 3x67	0,428	0,462	0,272	-	-	250	6	6	20
SAMI 3x107	0,268	0,290	0,257	-	-	378	9,7	9,7	20
SAXKA 3x70	0,446	0,482	0,140	0,18	0,18	235	5,7	6,7	42
SAXKA 3x120	0,256	0,277	0,130	0,23	0,23	330	9,8	11,4	60
SAXKA 3x185	0,168	0,182	0,120	0,26	0,26	425	15	17,5	65
AHMCMKK 3x16	1,89	2,04	0,147	0,12	0,12	60	0,94	0,94	18
AHMCMKK 3x25	1,21	1,31	0,135	0,14	0,14	78	1,46	1,46	20
AHMCMKK 3x35	0,867	0,937	0,129	0,15	0,15	96	2,05	2,05	25
AHMCMKK 3x50	0,608	0,657	0,119	0,17	0,17	117	2,9	2,9	30
AHMCMKK 3x70	0,435	0,470	0,116	0,18	0,18	144	4,1	4,1	35
AHMCMKK 3x95	0,322	0,348	0,110	0,20	0,20	171	5,6	5,6	55

Liite 8. 20 kV kaapeliin johtotietoja (Verkostusuositus SA 5:94, 2005)

Johdin	Vaiheeristanssi		Vaihe- reaktanssi XV Ω/ km	Maakepe- sittanssi Cm μF/km	Käyttökä- päsittanssi Ck μF/km	Suurin sallittu kuormitusvirta		Suurin sallittu 1 s oikosulkuvirta		Jäähdytys- alkavakio τ min	Mausuiku- virta I <sub>e</sub> A
	Rv Ω/ km +20 °C 1) +40 °C 2)	In A ilmassa 3) maassa 4)				Ik kA T1-sittimet	Ik kA T2-sittimet				
AHMCMK 3x70	0,444	0,480	0,116	0,18	0,18	150	170	5,4	5,4	35	2,1
AHMCMK 3x120	0,254	0,274	0,107	0,21	0,21	200	225	9,1	9,1	55	2,4
AHMCMK 3x185	0,165	0,178	0,097	0,24	0,24	265	285	14,1	14,1	80	2,7
AHMCMK 3x300	0,103	0,111	0,091	0,28	0,28	350	375	22,1	22,1	105	3,2
AHMDMK 3x70	0,446	0,482	0,127	0,18	0,18	150	170	5,4	5,4	30	2,1
AHMDMK 3x120	0,256	0,277	0,111	0,21	0,21	200	225	9,1	9,1	50	2,4
AHMDMK 3x185	0,169	0,183	0,100	0,24	0,24	265	285	14,1	14,1	75	2,7
AHMDMK 3x300	0,105	0,113	0,101	0,28	0,28	350	375	22,1	22,1	100	3,2
AHXAMK-W 3x70	0,446	0,482	0,138	0,18	0,18	235	200	5,7	6,7	42	2,1
AHXAMK-W 3x120	0,256	0,277	0,129	0,23	0,23	325	265	9,8	11,4	47	2,6
AHXAMK-W 3x185	0,169	0,183	0,119	0,26	0,26	425	330	15	17,5	53	3,0
AHXAMK-W 3x240 + 70	0,130	0,140	0,116	0,30	0,30	510	375	19,4	22,6	60	3,4
AHXAMK-W 3x300	0,106	0,115	0,113	0,32	0,32	585	435	24,2	28,2	65	3,7
AHXCCK 3x1x70	0,456	0,493	0,190	0,18	0,18	255	215	5,7	6,7	25	2,1
AHXCCK 3x1x120	0,266	0,287	0,180	0,23	0,23	350	280	9,8	11,4	30	2,6
AHXCCK 3x1x185	0,184	0,199	0,172	0,26	0,26	440	350	15	17,5	35	3,0
AHXCCK 3x1x300	0,120	0,130	0,163	0,32	0,32	580	440	24,2	28,2	44	3,7
AHXCCK 3x1x500	0,088	0,095	0,157	0,39	0,39	755	550	40,3	47	55	4,5
AHXCCK 3x1x800	0,073	0,079	0,154	0,49	0,49	950	650	63,9	74,4	67	5,6
AHXCCKM 3x70	0,446	0,482	0,132	0,18	0,18	190	175	5,7	6,7	45	2,1
AHXCCKM 3x120	0,256	0,277	0,121	0,23	0,23	265	230	9,8	11,4	65	2,6
AHXCCKM 3x185	0,169	0,183	0,114	0,26	0,26	340	290	15	17,5	84	3,0
AHXCCKM 3x300	0,106	0,115	0,107	0,32	0,32	460	380	24,2	28,2	90	3,7
APYAKMM 3x25	1,21	1,31	0,145	0,20	0,20	85	94	2,3	2,5	18	2,3
APYAKMM 3x35	0,876	0,947	0,138	0,22	0,22	105	115	3,3	3,7	20	2,5
APYAKMM 3x50	0,649	0,701	0,131	0,25	0,25	125	140	4,6	5,25	25	2,9
APYAKMM 3x70	0,451	0,487	0,124	0,29	0,29	155	170	6,5	7,3	30	3,3
APYAKMM 3x95	0,329	0,356	0,118	0,32	0,32	190	205	8,7	9,9	40	3,7
APYAKMM 3x120	0,262	0,283	0,115	0,35	0,35	210	225	11	12,5	50	4,0
APYAKMM 3x150	0,216	0,233	0,111	0,38	0,38	240	255	13,7	15,6	60	4,3
APYAKMM 3x185	0,175	0,189	0,107	0,41	0,41	270	290	16,9	19,2	65	4,7
APYAKMM 3x240	0,138	0,149	0,104	0,45	0,45	315	335	21,9	24,8	80	5,1
APYAKMM 3x300	0,114	0,123	0,101	0,49	0,49	360	375	27,3	31	90	5,6

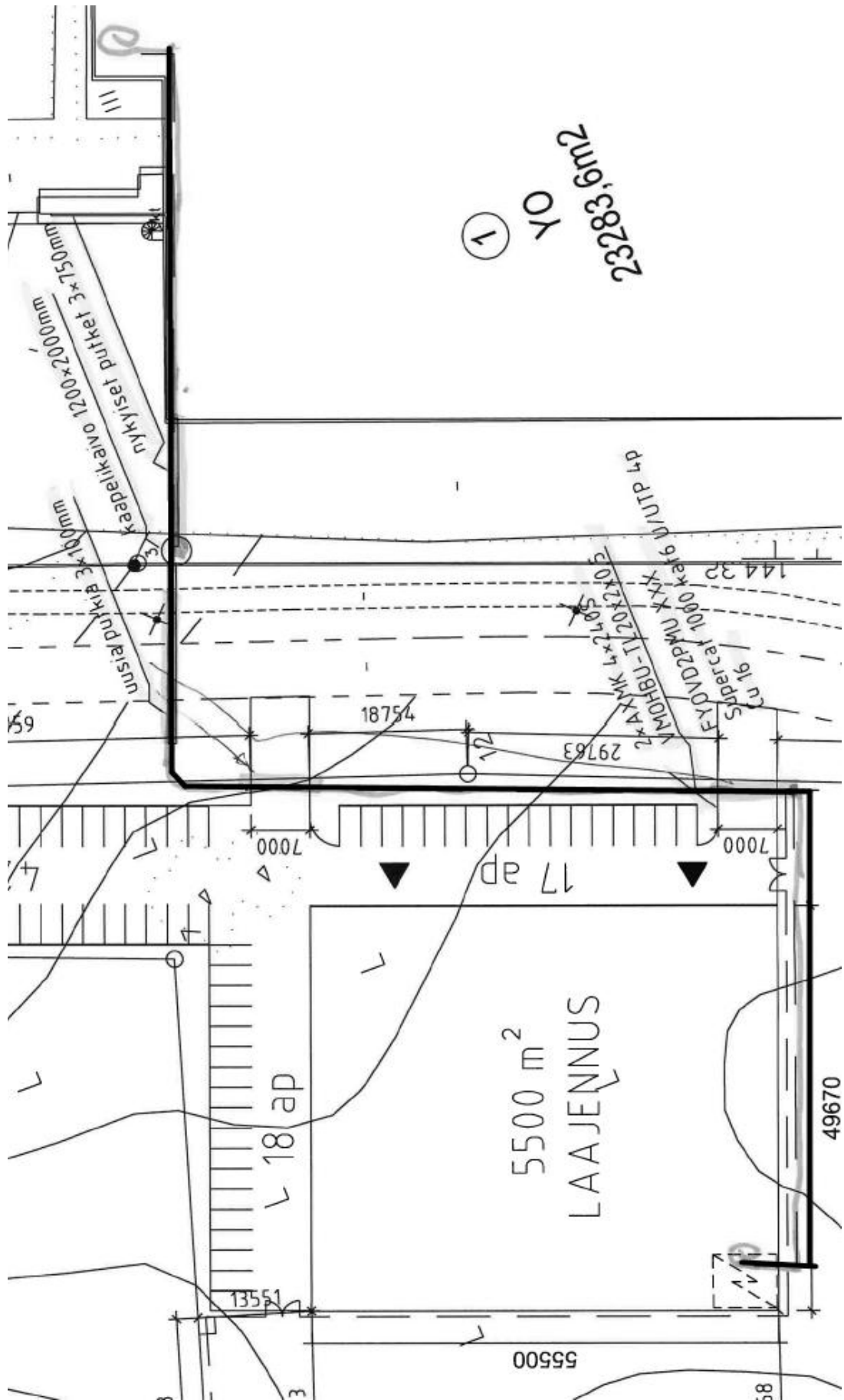
Liite 9. ABB: n jakelumuuntaja taulukko(ABB TTT, 2000)

## Öljyriesteiset jakelumuuntajat



Teho kVA	Laji	Un V/V	Kytkenä- ryhmä	Po W	Pk W	Zk %	Kok. pai- no/ kg	Öljyä kg	Pi- tuus mm	Le- ve- ys mm	Kor- keus mm	SSTL
30	CTO30/20.5	20500/410	Yzn11	100	585	4,0	345	92	810	691	953	57 609 30
30	CTO30/20.5-vok	20500±2x2,5 %/410	Yzn11	100	585	4,0	350	92	810	691	955	57 609 32
50	CTO50/20.5	20500/410	Dyn11	140	885	4,0	380	90	810	690	970	57 609 35
50	CTO50/20.5-vok	20500±2x2,5 %/410	Dyn11	140	885	4,0	390	90	810	690	970	57 609 37
100	CTO100/20.5	20500/410	Dyn11	220	1485	4,0	550	105	840	690	1105	57 609 40
100	CTO100/20.5-vok	20500±2x2,5 %/410	Dyn11	220	1485	4,0	550	105	840	690	1105	57 609 41
150	CTO150/20.5	20500/410	Dyn11	360	2050	4,0	780	173	985	800	1160	57 609 43
150	CTO150/20.5-vok	20500±2x2,5 %/410	Dyn11	360	2050	4,0	780	173	985	800	1160	57 609 44
200	CTO200/20.5-vok	20500±2x2,5 %/410	Dyn11	420	2295	4,0	850	176	1010	690	1220	57 609 45

## Liite 10. Sähkönkäytön toteutus päärakennukselta



Liite 11. gG- sulakkeiden ominaistoimintakäyrästä(ABB TTT, 2000)

