

KEMI-TORNION AMMATTIKORKEAKOULU TEKNIikka

Smeds Lauri

Sähköverkon teknistaloudellisen ohjeiston laatiminen maastosuunnittelijoiden ja käyttöhenkilöiden käyttöön

Sähkötekniikan koulutusohjelman opinnäytetyö
Sähkövoimatekniikka
Kemi 2010

ALKUSANAT

Haluan kiittää opinnäytetyöni ohjaajaa Antero Martimoa hyvästä ohjauksesta. Lisäksi kiitokset kuuluvat Rovakairan verkkojohtaja Arto Miettiselle opinnäytetyöni hyvästä neuvomisesta ja opastamisesta.

TIIVISTELMÄ

Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, Tekniikan yksikkö	
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Opinnäytetyön tekijä	Lauri Smeds
Opinnäytetyön nimi	Sähköverkon teknistaloudellisen ohjeiston laatiminen maastosuunnittelijoiden ja käyttöhenkilöiden käyttöön
Työn laji	Opinnäytetyö
Päiväys	09.12.2010
Sivumäärä	50+36 liitesivua
Opinnäytetyön ohjaaja	Insinööri Antero Martimo
Yritys	Rovakaira Oy
Yrityksen yhteyshenkilö/valvoja	DI Arto Miettinen

Opinnäytetyössä laadittiin teknistaloudellinen ohjeistus Rovakairan maastosuunnittelijoiden ja käyttöhenkilöiden käyttöön. Ohjeiston laatimisessa painotettiin erityisesti häviöiden merkitystä sähköverkon taloudellisessa mitoittamisessa, koska verkostohäviöt ovat merkittävä osa verkoston kokonaiskustannuksia.

Työssä selvitettiin ja tutkittiin laskennallisesti tekniset ja taloudelliset käytönraajat jakelumuuntajille, keskijännitejohdoille, PAS-johdoille ja pienjännitemaakaapeleille. Laskentatuloksien perusteella valittiin häviökustannuksiltaan taloudellisimmat vaihtoehdot. Rovakairan tekninen ohjeistus päivitettiin pien- ja suurjännitestandardien avulla nykypäivän määräyksien mukaiseksi. Tekninen ohjeistus käsittelee jännitteenaleneman, oikosulkukestoisuuden, kuormitettavuuden ja sähköturvallisuusmääräyksissä suojaukselle määritetyt ehdot.

Laskelmien avulla saatujen kuvaajien perusteella saatiin selvitettyä ja tutkittua, mitä poikkipintoja ja muuntajia on taloudellisesti järkevä käyttää. Pienjännitekaapeleista on hyvä käyttää AXMK 240, -95, -50 ja -25. Päällystetyistä keskijännitejohdoista taloudelliset käyttöalueet voidaan hoitaa PAS 150 ja -95:lla. Keskijännitejohtojen poikkipintasarjana olisi suositeltavaa käyttää Sparrowia, Pigeonia ja AL 132:sta. Jakelumuuntajista kannattaa käyttää 50, 100, 200, 315, 500, 800 ja 1000 kVA:n muuntajakokoja. Muuntajien kuormitusmallien vertailussa häviökustannuksiltaan taloudellisin vaihtoehto saavutetaan, kun muuntaja mitoitetaan alussa suurimpaan mahdolliseen alkukuormaan riippuen muuntajan koosta. Muissa kuormitusmalleissa häviökustannukset ovat huomattavasti suuremmat.

Työn lopputuloksen muodostaa teknistaloudellinen ohjeistus, jota suunnittelijat voivat tarvittaessa käyttää apuna verkostosuunnittelussa. Taloudellisen ohjeistuksen lopputuloksen muodostaa Excel-taulukko, johon voidaan päivittää vuosittain tarvittavat tekniset ja taloudelliset parametrit. Excel-taulukon pohjalta saadaan kuvaajat, joiden avulla suunnittelijat voivat valita häviökustannuksiltaan taloudellisimman vaihtoehdon.

Asiasanat: verkostosuunnittelu, häviöt, suojaukset, mitoitus.

ABSTRACT

Keri-Tornio University of Applied Sciences, Technology	
Degree Programme	Electrical Engineering
Name	Lauri Smeds
Title	Technical and Economic Instructions of Electrical Network for Rovakaira Oy
Type of Study	Bachelor's Thesis
Date	9 December 2010
Pages	56 + 36 appendices
Instructor	Antero Martimo, BSc
Company	Rovakaira Oy
Contact Person/Supervisor from Company	Arto Miettinen, MSc

The aim of this thesis was to make technical and economic instructions for the grid-designers and other staff at the company of Rovakaira Oy. Losses in electrical transmissions were especially highlighted in the economic dimensioning of grids, since losses in electrical transmissions are a major part of a grids total costs.

In this thesis technical and economic limits were investigated and resolved computationally for distribution transformers, middle voltage conductors, PAS-conductors and low voltage underground cables. As a result, the best alternatives were chosen, taking into consideration the future cost of losses. The technical directions of Rovakaira were updated with the help of low and high voltage standards. The technical instruction covers voltage reduction, short-circuit durability, loading capacity and electrical safety specifications.

With help of diagrams, made of computational results, it was stated which cross-sections of conductors and which distribution transformers should be used, from a economical point of view. In the case of low voltage cables, it is recommended to use AXMK 240, -95, -50 and -25 type of cables. Coated overhead wires of type cables PAS 150 and 95 are to be used in medium voltage grids. Medium voltage conductors of the type Sparrow, Pigeon and AL 132 are recommended. In the case of distribution transformers it is recommended to use 50, 100, 200, 315, 500, 800 and 1000 kVA transformers. By comparing load diagrams, the most economic distribution transformers, in case of cost losses is found when the transformer is dimensioned according to the largest initial load, depending on the size of the transformer. In other load diagrams the cost losses are notably higher.

The result of this thesis is a technical and economic instruction that designers can use as help, when designing grids. The result of the economic directions is an excel-table, which can be updated yearly with needed technical and economical parameters. Using the excel-table as base a diagram can be made, from which designers can select the most cost effective alternative.

Keywords: design of electrical networks, losses, protections, dimensioning.

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT	I
TIIVISTELMÄ	II
ABSTRACT	III
SISÄLLYSLUETTELO	IV
KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET	VI
1. JOHDANTO	1
2. TAUSTATIETOA ROVAKAIRA OY:STÄ	2
3. SÄHKÖVERKON MUOTO	3
4. SÄHKÖVERKON MITOITTAMINEN	4
4.1. Mitoitustehon määrittäminen	4
4.2. Jännitteenalenema	7
4.3. Pienjännitekaapelin kuormitettavuus	8
4.4. Selektiivisyys	9
4.5. Pienjänniteverkon suojaus	9
4.5.1. Pienjänniteverkon maadoitukset	9
4.5.2. Ylikuormitussuojaus	10
4.5.3. Oikosulkusuojaus	11
4.5.4. Jakeluverkon vaikutus sähköliittymien poiskytkentäaikoihin	14
5. JAKELUMUUNTAJAN MITOITTAMINEN	15
6. KESKIJÄNNITEVERKON MITOITTAMINEN	16
6.1. Suojaukset	16
6.2. Oikosulkusuojaus	16
6.3. Maasulkusuojaus	18
6.3.1. Verkon maadoitustavat	18
6.3.2. Maasulku ja maasulkuvirtojen laskenta	20
6.3.3. Maasulkua koskevat standardit	24
6.4. Maasulkusuojauksen toteuttaminen	26
6.4.1. Maasta erotetun verkon suojaus	27
6.4.2. Sammutetun verkon suojaus	28
6.4.3. Maasulkusuojauksen liittyviä mittauksia	29
6.5. Johtimen kuormitettavuus	30
7. SÄHKÖVERKON TALOUDELLINEN MITOITTAMINEN	31
7.1. Teknistaloudelliset laskentamenetelmät	31
7.2. Tyypikuormituskäyrät	32
7.3. Lämpötilakorjaus sähkölämmitykselle kuluttajille	33
7.4. Jakelumuuntajien taloudellinen mitoittaminen	34
7.5. Johtimen taloudellinen mitoittaminen	36
7.6. Teknisten reunaehtojen huomioon ottaminen	37
8. LASKENNASSA KÄYTETTÄVÄT PARAMETRIT	38
8.1. Korkoprosentin määrittäminen	38
8.2. Häviöenergian hinta	38
8.3. Pitoaika	39
8.4. Investointikustannukset	39
8.5. Jakelumuuntajien sähköiset arvot	39
8.6. Ilmajohdojen- ja kaapeleiden sähköiset arvot	40
8.7. Laskentajännitteet	40
8.8. Kuormituksen kasvu	40

8.9.	Laskennan kuormitustiedot	40
8.10.	Tehokerroin	41
9.	TULOSTEN KÄSITTELY	42
9.1.	Taloudelliset käyttöalueet kaapelit ja avojohdot.....	42
9.2.	Taloudelliset käyttöalueet muuntajille	43
9.3.	Muuntajien kuormitusmallit.....	44
9.4.	Herkkyysanalyysi	44
9.5.	Excel-taulukon käyttöohje	45
10.	YHTEENVETO	47
11.	LÄHDELUETTELO	48
12.	LIITELUETTELO	50

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

pj	pienjännite
kj	keskijännite
GWh	gigawattitunti
PEX	kaapelin eriste
Km/W	lämmönjohtavuuden yksikkö Watti/kelvin×metri
kV	kilovoltti
KTM	Kauppa- ja teollisuusministeriö
nF/km	nanofaradia/kilometri
AMKA	riippukierrekaapeli
AJK	aikajälleenkytkentä
PJK	pikajälleenkytkentä
I_{KEE}	Kaksoismaasulkuvirta
I_E	Maavirta

1. JOHDANTO

Rovakaira ostaa vuosittain jakeluverkostonsa häviöt vapailta sähkömarkkinoilta. Verkostohäviöt ovat merkittävä menoerä verkkoyhtiölle. Hinta, jolla Rovakaira ostaa häviöenergian, riippuu pörssihinnan hintakehityksestä ja häviöiden kuormituskäyrän muodosta. Muuntajien, kaapeleiden ja avojohtojen oikeilla valinnoilla voidaan pienentää verkostohäviöitä.

Työn päätarkoituksena on laatia verkostosuunnitteluun tekninen ja taloudellinen ohjeistus maastosuunnittelijoiden ja käyttöhenkilöiden käyttöön. Ohjeistuksessa käsitellään erikseen tekninen ja taloudellinen osa. Rovakairan tekninen ohjeistus päivitetään nykypäivän standardien mukaiseksi. Taloudellisessa ohjeistuksessa käsitellään, miten laskennallisesti saadaan selvitettyä jakelumuuntajille, keskijännitejohdoille, pienjännitekaapeleille, PAS-johdoille ja AMKA-johdoille taloudelliset käyttöalueet. Laskennassa hyödynnetään kuormitustietoina pj-puolella KTM:n tyyppikuormituskäyriä ja kj-puolella sähköasemien johtolähtöjen keskimääräistä vuosienergiaa. Muuntajien häviölaskelmat tehdään kolmella eri kuormitusmallilla ja selvitetään, mikä on häviökustannuksiltaan taloudellisin vaihtoehto. Työssä selvitetään myös, onko taloudellisesti järkevää käyttää kaikkia jakelumuuntajakokoja, kaapeleita ja avojohtoja.

Taloudellisen ohjeistuksen lopputuloksen muodostavat Excel-taulukot, joihin voidaan päivittää vuosittain häviöiden hinta, rakentamiskustannukset, pitoaika, korkokanta, kuormituksen kasvu ja tekniset arvot. Tämän jälkeen saadaan Excel-taulukoiden pohjalta kuvaajat taloudellisista käyttöalueista.

2. TAUSTATIETOA ROVAKAIRA OY:STÄ

Rovakaira Oy vastaa sähkön siirrosta sekä niihin liittyvistä palveluista entisessä Rovaniemen maalaiskunnassa, Sodankylässä ja Kittilässä. Rovakaira Oy:ssä työskentelee vakituisesti 67 henkilöä. Vuonna 2009 Rovakairan liikevaihto oli 12,6 miljoonaa euroa. /14/

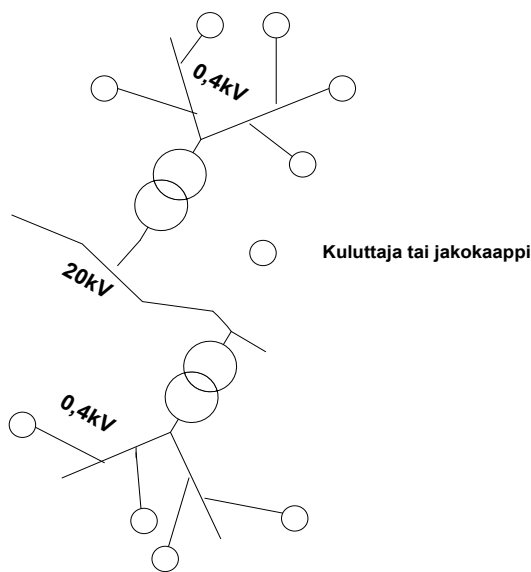
Rovakairalla jakelualue on 28 800 neliökilometriä eli noin 8,5 prosenttia Suomen pinta-alasta. Vuonna 2009 loppuun mennessä siirtoasiakkaita oli 28 031, joille siirrettiin sähköä yhteensä 593 GWh. Suurkuusikon kaivoksen tuotannon käynnistyminen täyteen kapasiteettiin kasvatti sähkönkulutusta jopa 18 prosenttia edellisestä vuodesta. Suurimmassa osassa jakelualueella ovat arktiset olosuhteet, jotka asettavat suuria haasteita verkon rakentamiselle. Rovakairalla on jakelumuuntamoita 2437 kpl, kj-verkkoa 3263 km, pj-verkkoa 3183 km, 110 kV verkkoa 60 km ja sähköasemia on 10. Kuvassa 1 on Rovakairan jakelualue. /14/



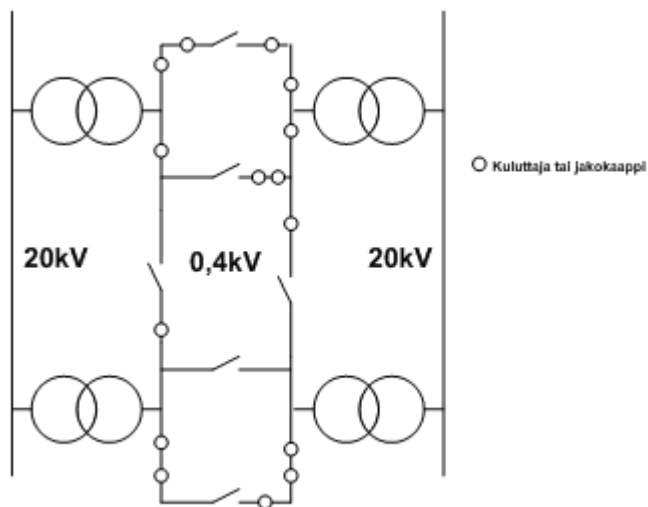
Kuva 1. Rovakairan jakelualue /14/

3. SÄHKÖVERKON MUOTO

Sähköverkko voidaan jakaa kahteen rakenteelliseen osaan, silmukka- ja säteisverkkoon. Taajamissa käytetään lähinnä silmukkaverkkoa suuren kuluttajatiheyden takia. Vian sattuessa keskeytykset vaikuttavat laajalle asiakaskunnalle. Silmukoinnin avulla vikatilanteessa osalle kuluttajista voidaan sähköä toimittaa vaihtoehtoista reittiä. Haja-asutusalueilla ei käytetä silmukkaverkkoa, koska muuntopiirien välit yleensä ovat pitkiä. Alla ovat kuvat 2 ja 3, jotka havainnollistavat silmukka- ja säteisverkkoa. /11/



Kuva 2. Säteittäinen verkko /11/



Kuva 3. Silmukkaverkko /11/

4. SÄHKÖVERKON MITOITTAMINEN

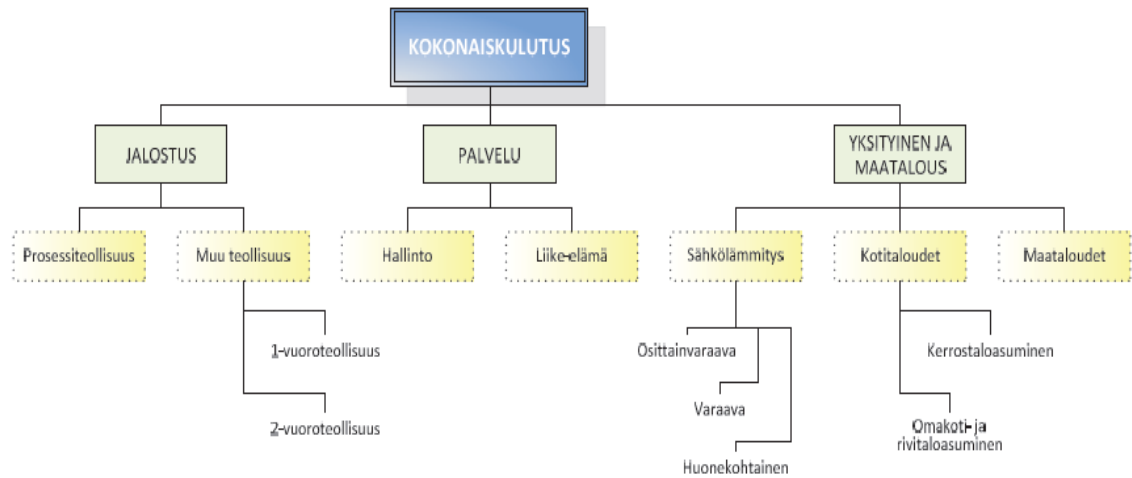
Sähköenergian siirto vaatii toimivan sähköverkon. Sähköverkko koostuu kaapeleista ja avojohdoista, joiden oikea mitoitus ja suojaus ovat keskeisiä turvallisuustekijöitä. Johtojen oikeanlainen mitoitus vaikuttaa myös kulutuspisteissä sähkönlaatuun sekä verkon taloudellisuuteen. Sähköturvallisuusstandardit edellyttävät sähköjohtojen ja niiden johtimien poikkipintojen mitoittamisessa useiden asioiden huomioonottamista. /4/

Verkon mitoituksen pääperiaatteena on valita kuhunkin siirtotilanteeseen johtimet, joiden investointi- ja häviökustannuksista koostuvat kokonaiskustannukset olisivat mahdollisimman pienet. Lisäksi johtimien on täytettävä tekniset vaatimukset, joita ovat jännitteenalenema, oikosulkukestoisuus, kuormitettavuus ja sähköturvallisuusmääräysten suojauksille määritetyt ehdot. Lisäksi sähköverkon mitoituksessa on syytä ottaa huomioon selektiivinen suojaus, jolla pienennetään sähköverkon vika-aluetta. /11/

4.1. Mitoitustehon määrittäminen

Verkostosuunnittelussa on oleellista saada selville verkko-osuuden huippu- tai keskiteho. Huipputeho ei ole tiedossa yleensä kuin keskijännitelähdöiltä ja suurilta asiakkailta, joilla tehonmittaus on reaaliaikaista. Muut tapaukset ovat arvioitava vuosienergioiden perusteella, joita käytetään myös laskutuksen perusteena. Aikaisemmin mitoitustehot arvioitiin Velanderin kaavan avulla, joka soveltuu yleensä vain suuren sähkönkäyttäjäjoukon huipputehon arviointiin. /18/

Tarkempaan kuormitusten mallintamiseen päästään selvittämällä erilaisten sähkönkäyttäjien sähkökäyttötottumukset. Mittaamalla saadaan kuormitusmallit, jotka kuvaavat sähkönkäyttäjän määrällisesti ja ajallisesti vaihtuvaa sähkönkulutusta. Yksittäisen sähkönkäyttäjän tuntikohtainen tehontarve voidaan arvioida tarkasti kuormitusmallin avulla. Nykyiset kuormituskäyrät perustuvat Sähkölaitosyhdistyksen (nykyinen Energiateollisuus ry, välillä Sähköenergialiitto ry Sener) vuonna 1992 julkaistuun sähkönkäytön kuormitustutkimukseen. Kuormitustutkimuksessa on tehty tyyppikäyttäjät, joita on yhteensä 46 kpl. Tyyppikäyttäjille on tehty laajat mittaukset. Tuloksena mittauksista on saatu eri tyyppikäyttäjien tuntikohtainen tehonvaihtelu, tuntikeskitehojen hajonta ja lämpötilariippuvuus. Sähkön kokonaiskulutuksen tarkasteluissa käytetään pienten käyttäjäryhmien lisäksi myös laajempia ryhmiä, jotka muodostavat moniasteisen jaon kokonaiskulutuksesta alaspäin. Seuraavalla sivulla kuvassa 4 on havainnollistettu moniasteista jakoa. /7/



Kuva 4. Sähkönkäyttäjryhmien pääpiirteittäinen jaottelu /7/

Lähtökohtana kuormitusmallien määrittämisessä on käyttäjäryhmittely, joka jakaa sähkönkäyttäjät ryhmiin, joissa sähkönkulutus voidaan olettaa riittävällä tarkkuudella samanlaiseksi. Kuormitustiedot samankaltaisella sähkönkäyttäjryhmällä voidaan tämän jälkeen esittää indeksisarjoina, joissa vuosi on jaettu 26 kaksiviikkojaksoon. 2-viikkojakson indeksisarjoissa lasketaan keskitehon perusteella jokaiselle jaksolle ulkoinen indeksi. Indekseillä kuvataan sähkön käytön vuodenaikavaihtelua. /7/

2-viikkoindeksejä käytetään vuorokauden tuntivaihteluiden kuvaamiseen. Arki-, aatto- ja pyhäpäivät kuvataan erikseen 24-tunti-indeksinä. Arkipäiviin kuuluvat kaikki viikonpäivät maanantaista perjantaihin, aattopäiviin lauantait ja pyhäpäiviin sunnuntait. /7/

Tietyn ajankohdan keskituntiteho voidaan laskea indeksisarjoja käyttäen kaavalla 1.

$$P_{ri} = \frac{E_r}{8760} \times \frac{Q_{ri}}{100} \times \frac{q_{ri}}{100} \quad (1)$$

missä

E_r on käyttäjäryhmän r vuosienergia

Q_{ri} on käyttäjäryhmän r ajankohtaa i vastaava 2-viikkoindeksi

q_{ri} on käyttäjäryhmän r ajankohtaa i vastaava tunti-indeksi. /7/

Kaavalla 1 laskettu keskiteho antaa arvion suuren käyttäjäjoukon tehosta, mutta huipputeho on suurempi yksittäisellä kuluttajalla. Olettamalla samantyyppisten sähkönkäyttäjien olevan normaalijakauman mukainen, voidaan usean samantyyppisen sähkönkäyttäjän huipputeho laskea kaavalla

$$P_{\max} = n \times P_{\text{kes}} + z_a \times \sqrt{n} \times \sigma \quad (2)$$

missä

n on sähkönkäyttäjien lukumäärä

P_{kes} on keskiteho

z_a on kerroin sille, että huipputeho ei ylitä laskettua arvoa a prosentin todennäköisyydellä

σ on hajonta. /7/

Kuormitettavuuslaskuissa käytetään yleensä 1 % ($z_{99}=2,32$) tai 5 % ($z_{95}=1,65$), jännitteenalenemataarkasteluissa käytetään 10 % ($z_{90}=1,30$) ja häviölaskelmissa 50 % ylitystodennäköisyyttä vastaavalla teholla. /7/

Huipputehot eivät yleensä esiinny erityyppisillä sähkönkäyttäjillä samaan aikaan, joten kuormituksen yhteenlaskettu huipputeho on pienempi yleensä kuin yksittäisten huipputehojen summa. Erityyppisille sähkönkäyttäjille huipputeho voidaan laskea alla olevalla kaavalla 3. /7/

$$P_{\max} = n_1 \times P_{\text{kesk1}} + n_2 \times P_{\text{kesk2}} + z_a \sqrt{n_1 \sigma_1^2 + n_2 \sigma_2^2} \quad (3)$$

4.2. Jännitteenalenema

Johdot ja johtoverkostot mitoitetaan suurimpien sallittujen jännitteenalenemisen perusteella. Jakeluverkoissa syntyvät jännitteenalenemat on pidettävä kulutusköjeiden vaatimissa rajoissa. Jännitteenalenema vaikuttaa sähkönlautuun olennaisesti ja se on otettava huomioon sähköverkon mitoituksessa. Yleisimmin jännitteenalenemaa pyritään ehkäisemään rakentamalla verkko tarpeeksi vahvaksi. /2/

Suomessa noudatetaan sähkön laatustandardia SFS-EN 50160. Standardin mukaan normaaleissa käyttöolosuhteissa, pois lukien vikatapaukset ja keskeytykset, jokaisen viikon aikana 95 % jakelujännitteen tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvoista tulee olla $U_n \pm 10\%$. Lisäksi kaikkien jakelujännitteen arvojen tulee olla välillä $+10/-15\%$. Korkean ja normaalilaadun jännitevaatimukset ovat oleellisesti suuremmat. Korkean, normaalin ja standardilaadun jännitevaatimukset ovat taulukossa 1. /16/,21/

Taulukko 1. Suositellut jännitealueet ja -alenemat /21/

Osaverkko	Jännitteen vaihtelualue		Jännitteenalenema		
	Minimi	Maksimi	Korkea laatu	Normaali laatu	Standardi laatu
Keskijänniteverkko	19 kV	22 kV	$\pm 4\%$	$\pm 10\%$	$95\% \pm 10\%$
Pienjännitejakelu	196 V	253 V	$\pm 4\%$	$\pm 10\%$	$+10 -15\%$
Muuntamo ¹⁾	220V	253V		1-2 %	2-4 %
Pienjänniterunkoverkko	210V	253V		3-5 %	3-7 %
Liittymisjohto ²⁾	207V	253V		1-3 %	1-5 %
Sisäjohtoverkko	198V	253V			1-4 %

Jakeluverkon suunnittelua helpottaa, kun määritetään keskijännite, jakelumuuntamo- ja pienjänniteosuuksille oma sallittu jännitteenaleneman enimmäisarvo. Kuitenkin on hyvä muistaa, että jännitteenaleneman ylittyminen yhdessä jänniteportaassa ei tarkoita välttämättä sitä, että asiakkaalla on huono jännitteen laatu. /7/

4.3. Pienjännitekaapelin kuormitettavuus

Sähköjohdon suurin sallittu lämpötila määrää johtimen minimipoikkipinnan. Johdon asennusolosuhteet vaikuttavat siihen, miten johtoa lämmittävä energia siirtyy pois johdosta. Lämmön siirtymiseen vaikuttavat ympäristön lämpötila, johtoa ympäröivä aine ja muut lähellä olevat lämmönlähteet. /3/

Ilmassa oleville johtimille ja asennustavasta riippumatta ympäröivän ilman lämpötila on + 25 °C ja maahan asennetuille kaapeleille joko suoraan maassa tai maassa olevissa suojaputkissa lämpötila on +15 °C. Nämä edellä mainitut arvot ovat oletusarvoja. Suomessa käytetään maan lämpöresistiivisyyden perusarvona 1,0 Km/W. Jos maan lämpöresistiivisyys on suurempi kuin 1,0 Km/W, kuormitettavuutta on pienennettävä vastaavasti käyttäen sopivaa korjauskerrointa tai maa-aines on vaihdettava sopivampaan. /16/

Maa-asennuksessa on huomattava, että PEX-kaapeleilla on jatkuva sallittu johdinlämpötila +90 °C maassa, joka saattaa kuivattaa ympäröivää maaperää ja sitä kautta aiheuttaa kaapelin ylikuormittumisen. Tästä syystä ei kannata käyttää PEX-eristeisille kaapeleille maassa yli +65 °C johdinlämpötiloja. Jos olosuhteet poikkeavat edellä mainituista oletusarvoista, ovat sallitut kuormitettavuudet kerrottava korjauskertoimilla, jotka on esitetty liitteessä 1. /16/

Mahdollista auringon tai muun infrapunasäteilyn aiheuttamaa kuormituksen pienenemistä korjauskertoimet ei yleensä ota huomioon. Jos kaapeleihin tai eristettyihin johtimiin kohdistuu tällainen säteily, voidaan kuormitettavuudet määritellä standardisarjan IEC 60287 mukaisesti. Korjauskertoimien lisäksi pitää ottaa huomioon myös ryhmästä johtuva lämpötilakerroin. Ryhmästä johtuva lämpötilakerroin määräytyy asennustapojen mukaan, mikä on esitetty liitteessä 1. Pienjännitekaapelin kuormitettavuudet ovat liitteessä 2. /16/

Pienjänniteilmajohtojen kuormitettavuus. Ilmajohdon pienen lämpöaikavakion vuoksi kaapelien kuormitettavuustarkastelut eroavat kaapelien kuormitettavuustarkasteluista. Pienjänniteilmajohtojen kuormitettavuudet ovat liitteessä 3. /23/

4.4. **Selektiivisyys**

Verkosta on vikatilanteen tullessa pystyttävä erottamaan mahdollisimman pieni osa. Tämä tarkoittaa käytännössä vian rajoittamista pienelle alueelle, jolloin muu osa verkosta toimii normaalisti. Suojauksen on kestävä normaali käytössä pienet ylivirrat. Selektiivisyys toteutetaan yksinkertaisimmillaan pienentämällä sulakekokoa pykälittäin muuntajalta kuluttajalle päin. Pj-verkoissa selektiivistä suojausta ei vaadita, mutta selektiiviseen suojaukseen tulisi mahdollisuuksien mukaan pyrkiä. /11/

4.5. **Pienjänniteverkon suojaus**

Hyvällä maadoituksella saadaan hoidettua verkkokomponenttien suojaus. Lisäksi maadoitus toimii vaarallisten kosketusjännitteiden potentiaalintasaajana. Jos pienjänniteverkossa ja kuluttajalla ei ole tehty asianmukaisia maadoituksia, keskijänniteverkon maasulku voi aiheuttaa sähkönkäyttäjällä vaarallisia kosketusjännitteitä esimerkiksi sähkölaitteen maadoitetun kuoren ja maan välillä. /7/

4.5.1. **Pienjänniteverkon maadoitukset**

Pienjännitejakeluverkko on toteutettu Suomessa TN-C-järjestelmänä, jossa on yhdistetty nolla- ja suojajohdin. TN-C-järjestelmällä toteutetun jakeluverkon PEN-johdin on maadoitettava syöttöpisteessä (muuntajan tai generaattorin luona) tai korkeintaan 200 m päässä syöttöpisteestä. Lisäksi jokainen yli 200 m pitkä johtohaara tai johto on maadoitettava loppupäästä tai enintään 200 m etäisyydellä loppupäästä. Lisäksi on suositeltavaa maadoittaa muualta PE- tai PEN-johdin, missä johdon tai siihen liitettyjen laitteiden läheisyydessä on käytettävissä sopiva maadoitus. Maadoitukset suositellaan tehtäväksi lisäksi myös aina kaapelijakokaapeissa. AMKA-johtojen maadoitukset suositellaan tehtäväksi 500 m:n välein ylijännitesuojauksen toimivuuden vuoksi. Maadoitusimpedanssi on oltava, mikäli maadoitusolosuhteet sallivat alle 100 Ω . Jos maadoitusimpedanssin arvo ylittyy, on toimittava huonojen maadoitusolosuhteiden mukaisesti. Maadoituksen voi jättää pois yli 200 m:n johtohaaroissa, jos sähköliittymässä maadoitus on tehty määräyksien mukaisesti. Maadoituksen pois jättäminen ei ole kuitenkaan suotavaa, koska liittymän maadoitusten toteuttamisesta ei voi olla koskaan täysin varma. /16/

4.5.2. Ylikuormitussuojaus

Maakaapeliverkot ovat yleensä asennettu palonkestävästi, jolloin ylikuormitussuojausta ei vaadita. Paloa kestävämmät johtojen osat on asennettava siten, etteivät ne ole lähellä palavaa ainetta. Liittymiskaapelit ainoastaan vaativat paremman suojauksen. Kaapeleiden suojaaminen voidaan toteuttaa taulukon 2 mukaisia sulakkeita käyttäen. /7/

Taulukko 2. Pienjännitekaapeleiden suurimmat ylivirtasuojan nimellisvirrat gG-sulakkeita käytettäessä /7/

Kaapeli	Kuluttajan pääsulake [A]	Liittymisjohdon oikosulkusulake [A]	Runkojohdot Sulake [A]
AXMK 4x25	80	160	100
AXMK 4x35	100	250	125
AXMK 4x50	125	315	125
AXMK 4x70	125	400	160
AXMK 4x95	160	500	200
AXMK 4x120	200	630	250
AXMK 4x150	200	630	250
AXMK 4x185	250	800	315
AXMK 4x240	315	1000	400
AMCMK 3x25/16	80	160	100
AMCMK 3x35/16	80	200	125

AMKA-johtojen ylikuormituksen tarkoituksena on suojata ilmajohdot ja siihen liittyvät muut johdot liialliselta lämpenemiseltä riittävän nopeasti toimivilla sulakkeilla. Ilmajohdojen ylikuormitussuojaus voidaan toteuttaa myös johdon loppupäässä olevilla sulakkeilla, jolloin ylikuormitussuojana voidaan käyttää liittymien pääsulakkeita, mutta johtimen kuormitettavuus ei saa ylittää yhteenlaskettua nimellisvirtaa. Taulukossa 3 on esitetty AMKA-johtojen ylikuormitussuojaukseen käytettävien gG-sulakkeiden nimellisvirrat eri ympäristön lämpötiloissa. /7/

Taulukko 3. AMKA-johtojen ylikuormitussuojana toimivan gG-sulakkeen enimmäiskoko eri lämpötiloissa /7/

AMKA	20 °C	25 °C	40 °C
3x16+25	63 A	50 A	50 A
3x25+35	80 A	63 A	63 A
3x35+50	100 A	80 A	80 A
3x50+70	125 A	100 A	100 A
3x70+95	160 A	125 A	125 A
3x120+95	200 A	200 A	160 A

4.5.3. Oikosulkusuojaus

Verkko saadaan suojattua oikeanlaisilla suojalaitteilla, kun pystytään määrittämään oikosulkuvirta. Oikosulkusuojauksella voidaan varmistaa, että johtimet eivät vahingoitu oikosulussa. Pienimmän yksivaiheisen oikosulkuvirran vaikutuksesta pienjänniteverkossa on tapahduttava syötön nopea poiskytkentä. /11/ Oikosulkuvirta voidaan laskea kaavalla 4.

$$I_{k1} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0|} \quad (4)$$

missä

$\bar{Z}_1$ on myötäkomponenttiverkon impedanssi

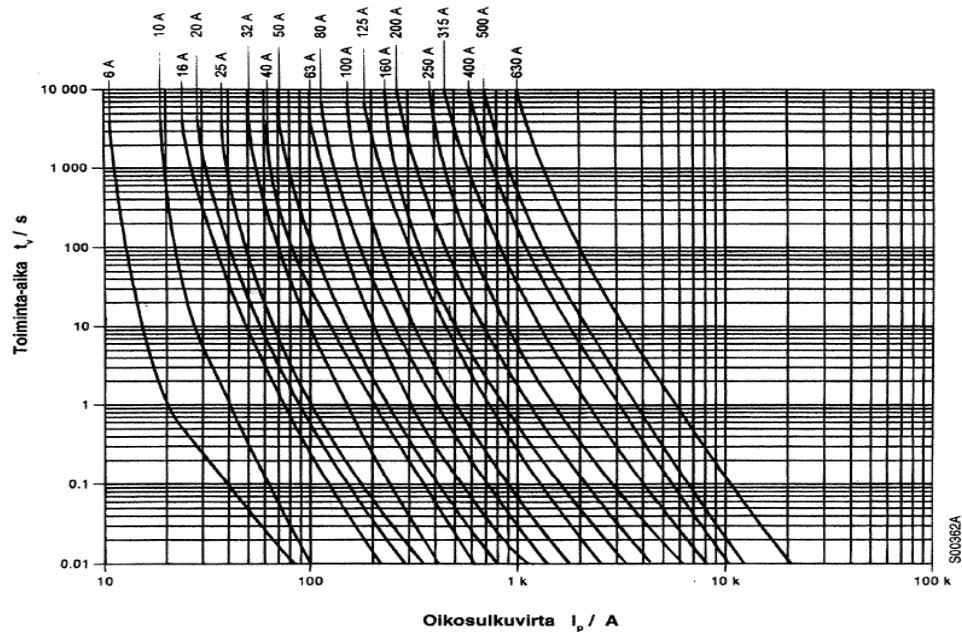
$\bar{Z}_2$ on vastakomponenttiverkon impedanssi

$\bar{Z}_0$ on nollakomponenttiverkon impedanssi

U_n on syöttävän verkon jännite

c on IEC 60909 mukainen jännitekerroin. /1/

Oikosulkuvirran avulla voidaan sulakkeen toiminta-aika lukea käyrästä. Kuvassa 5 on esitetty OFAA- mallisten gG-kahvasulakkeiden toimintakäyrät. Yleisesti kahvasulakkeita käytetään jakeluverkkojen suojaamiseen. Kahvasulakkeet soveltuvat katkaisuominaisuuksien takia erittäin hyvin oikosulkusuojaus. Katkaisukyky kahvasulakkeilla on vähintään 50 kA. /7/



Kuva 5. OFAA-mallisten gG-kahvasulakkeiden toiminta-ajat /7/

Verkkokomponenttien ja johtojen impedanssit ja resistanssit vaikuttavat oikosulkuvirran suuruuteen. Pienjänniteverkon suunnittelussa oikosulkuvirta on myös päällimmäisenä tekijänä, sillä oikosulkuvirralla on annettu tietty arvo, mikä pitää toteutua kulutusasteessa. Verkkoyhtiöllä on käytössä uusilla asiakkaila pääkeskuksessa standardien suosittama 250 A:n minimivaatimus pienjänniteverkoissa. Riittävällä oikosulkuvirran arvolla voidaan varmistaa, että kiinteistön pistorasiaryhmää suojaavan 16 A C-tyyppin katkaisija toimii riittävän nopeasti. Oikosulkuvirran perusteella voidaan myös havainnollistaa verkon jännitejäykkyyttä. Mitä suurempi on oikosulkuvirran arvo, sitä jäykempi on verkko. /16/, /11/

Oikosulku on kytkettävä pois enintään viidessä sekunnissa pienjänniteverkossa. Verkonhaltijan harkinnan mukaan voidaan käyttää pidempiä poiskytkentäaikoja pienjänniteverkoissa, mutta 15 s toiminta-aikaa ei saa ylittää. Jakeluverkossa automaattiseen poiskytkentään käytettävien ylivirtasuojien mitoitusvirta voidaan mitoittaa taulukon 4 sarakkeen 1 mukaisesti edellyttäen, että liittymiä koskevat vaatimukset toteutuvat. Tällä tavoin mitoitetulla jakeluverkon suojauksessa poiskytkentäaika saattaa ylittää 5 sekuntia eikä johtimien termisestä kestoisuudesta ole varmuutta. /7/

Jos jakeluverkossa ei oikosulkuä kytketä pois taulukon 4 sarakkeen 1 mukaisesti, niin jakeluverkko on rakennettava siten, että oikosulun aikana jännite ei aiheuta vaaraa. Vaarallinen jännite oikosulussa voidaan estää lisäpotentiaalitasauksella tai mitoittamalla jakeluverkon PEN-johdin siten, että jännite maahan nähden ei yksivaiheisen oikosulun aikana ole suurempi kuin 75 V. Muuntamoiden pääkeskuksissa ja vastaavissa suositellaan sovellettavaksi ainoastaan lisäpotentiaalintasauksia. /16/

Uuden sähköliittymän liittyessä aiemmin (ennen vuotta 1994) rakennettuun verkkoyhtiön jakeluverkkoon, voidaan liittymän pääsulakkeet mitoittaa taulukon 4 sarakkeen 2 mukaisesti verkon pienimmän oikosulkuvirran perusteella. Lisäksi perusvaatimuksena on 5 sekunnin syötön poiskytkentäaika. /16/

Taulukko 4. Pienin oikosulkuvirta, jonka mukaan jakeluverkon vikasuojaukseen käytetty ylivirtasuojia voidaan mitoittaa /7/

Ylivirtasuojia	Oikosulkuvirta	Oikosulkuvirta	Toiminta-aika liittymän päävarokkeen luona
	1)	2)	
gG - Sulake $I_n < 63 \text{ A}$	$2,5 \times I_n$	$3,5 \times I_n$	5s
gG - Sulake $I_n > 63 \text{ A}$	$3,0 \times I_n$	$4,5 \times I_n$	5s

Liittymisjohdon suojaus. Liittymisjohdolla tarkoitetaan jakeluverkon ja liittymän pääkeskuksen välistä johtoa, eikä liittymisjohdossa saa olla haaroituksia. Mikäli liittymisjohto on suojattu loppupäähän asennetulla ylikuormitussuojalla ja alkupäähän asennetulla oikosulkusuojalla, lisävaatimuksia liittymisjohdon mekaaniselle suojaukselle ei vaadita. Jos oikosulun kesto aika ylittää yli 5 s, noudatetaan seuraavia vaatimuksia:

- Poikkipinta liittymiskaapelilla pitää olla vähintään 10 mm² kuparia tai 16 mm² alumiinia ja johdon loppupäässä on liittymisjohtoa ylikuormitukselta suojaavat suojalaitteet esimerkiksi pääsulakkeet.
- Läpivienti tehdään seinään tai muuriin vähintään lujusluokan 4 asennusputkella, jos seinän tai muurin rakenne ei täytä paloturvallisuudelle ja mekaaniselle lujudelle asetettuja vaatimuksia. Liittymiskaapeli suojataan mekaaniselta rasitukselta esimerkiksi sijoittamalla kaapeli jakokeskushuoneeseen.
- Asennus rakennuksen sisällä on tehtävä liittymiskaapelille siten, ettei siitä aiheudu palovaaraa tai oikosulkuvaaraa, eikä liittymiskaapeli saa koskettaa muita kaapeleita. Kaapelin asennus alusta on suojattava palamattomalla materiaalilla, jos asennuspinta ei ole palamaton.
- AMKA-johdon saa päättää rakennuksen seinään vain muuntamoissa ja rakennuksissa, joiden syöttäminen maakaapeleilla ei ole mahdollista esimerkiksi maaperän kallioisuuden takia.
- Liittymiskaapelin pituus rajoitetaan mahdollisimman lyhyeksi ulkoseinällä ja rakennuksen sisällä. /7/

Jos edellä mainittujen ehtojen mukaisesti mitoitettussa liittymisjohdossa tapahtuu oikosulku, niin liittymisjohdon kunto on tarkastettava silmämääräisesti ja mittaamalla eristysresistanssi, ennen kuin kaapeli otetaan uudelleen käyttöön. Liittymisjohdon kunnon saa tarkistaa ainoastaan sähköalan ammattihenkilö. Taulukoissa 5 ja 6 esitetään liittymisjohtona toimivien maakaapeleiden ja AMKA-johtojen oikosulkusulakkeiden suurimmat sallitut nimellisvirrat. /16/

Taulukko 5. Kaapeloidun liittymisjohdon oikosulkusuojauksen suurimmat sallitut nimellisvirrat toiminta-ajan ollessa enintään 15 s /7/

Kaapelin poikkipinta [mm ²]		gG- tyyppin sulakkeen suurin sallittu nimellisvirta [A]
Kupari	Alumiini	
6*	10*	80
10*	16*	125
16	25	160
25	35	200

Taulukko 6. AMKA-johdolla toteutetun liittymisjohdon tai runkojohdon haaran oikosulkusuojauksen suurimmat sallitut nimellisvirrat /7/

AMKA- johdin [mm ²]	gG- tyyppin sulakkeen suurin sallittu nimellisvirta [A]	
	Sulake ei täytä 15 s ehtoa	Sulake täyttää 15 s ehdon
1	2	3
3 x 16 + 25 [*]	80	125
3 x 25 + 35	100	160
3 x 35 + 50	160	200
3 x 50 + 75	200	250
3 x 70 + 95	250	315
3 x 95 + 95	315	400
3 x 120 + 95	400	500

* poikkipinnat käytössä vain vanhoissa verkoissa

4.5.4. Jakeluverkon vaikutus sähköliittymien poiskytkentäaikoihin

Sähköliittymissä tehtävään suojauksiin vaikuttaa jakeluverkon mitoitus. Jakeluverkon mitoitus tehdään yleensä siten, että sähköasennusten suojaus liittymällä voidaan mitoittaa rakennusten sähköasennuksia koskevien määräyksien mukaan. Käytettäessä syötön automaattista poiskytkentää 32 A, ryhmäjohtojen poiskytkentäaika ei saa ylittää 0,4 sekuntia. 5 sekunnin poiskytkentäaika sallitaan pääsulakkeilla ja pääjohdoilla. Tarvittaessa jakeluverkon haltijan on annettava sähkölaitteiston suunnittelijalle ja rakentajalle liittymän mitoitusta koskevat tiedot suojauksen suunnittelua varten. Jos standardin määrittämää 250 A oikosulkuvirtaa ei kohtuullisesti saavuteta, pienemmät oikosulkuvirran arvot hyväksytään, jos muilla toimenpiteillä voidaan saavuttaa vastaava turvallisuustaso. Toimenpiteitä voivat olla esimerkiksi B-tyypin johdonsuojakatkaisijan tai standardin SFS-EN 60269 mukaisten gG-sulakkeiden käyttö. /16/

5. JAKELUMUUNTAJAN MITOITTAMINEN

Lähtökohtana jakelumuuntajan mitoittamiseen on pienjänniteverkon kuormituksen suuruus. Verkkotietojärjestelmästä saa kuormitusten ajallisen vaihtelun. Kuormitusmallien avulla verkkotietojärjestelmä laskee muuntopiirin asiakkaiden yhteenlasketun huipputehon. /18/

Jakelumuuntajan normaalina käyttöikäenä pidetään sitä ikää, jonka muuntaja kestää jatkuvalla nimelliskuormalla jäähdytysilman ollessa +20 °C. Silloin muuntajan arvioidaan vanhenevan normaalilla nopeudella. Muuntajan kuorma kuitenkin vaihtelee, jolloin pienen kuorman aikana eristysten vanheneminen on normaalia hitaampaa. Tämän vuoksi muuntajaa voidaan ylikuormittaa taulukon 7 mukaisilla kertoimilla, kun kuormituksen huippu osuu talveen. Kuormitussuhde ei saa kuitenkaan ylittää $1,5 \times S_n$. Lämpötila muuntajan käämeissä ei myöskään saa ylittää + 140 °C. /23/

Taulukko 7. Jakelumuuntajien ylikuormituskertoimia /23/

Muuntopiiri	Pylväsmuuntamo	Puistomuuntamo	Kiinteistömuuntamo
Pientaloalue, sähkölämmitys	1,5	1,4	1,2
Kerrostaloalue	1,5	1,4	1,2
Keskusta-alue	1,4	1,3	1
Teollisuusalue	1,4	1,3	1
Maaseutualue	1,5	1,4	1,2

Muuntajan kuormitettavuudeksi voidaan valita taulukon 7 arvoista $1-1,5 \times S_n$ riippuen muuntajan tyypistä. Pienet muuntajat voidaan mitoittaa $1,5 \times S_n$ ja suuret muuntajat $1 \times S_n$. Esimerkiksi pienille muuntajille voidaan kirjoittaa epäyhtälö 5.

$$\left(1 + \frac{r}{100}\right)^t xP < 1,5xS_n \quad (5)$$

missä

r on kuormituksen kasvu

t on pitoaika

P on mitoitus-teho

S_n on muuntajan nimellisteho. /5/

Jos epäyhtälö ei toteudu, on vaihdettava seuraavaan muuntajakokoon.

6. KESKIJÄNNITEVERKON MITOITTAMINEN

Verkkoyhtiön sähköjakelujärjestelmän selkärankana voidaan pitää keskijänniteverkkoa. Keskijännitejohdolla voidaan siirtää muutaman megawatin teho jopa 200 km, joka tarkoittaa satoja pienjänniteasiakkaita. Keskijänniteverkon vika vaikuttaa suureen asiakasmäärään. Jopa yli 90 % sähkönkuluttajien kokemista sähkönjakelukeskeytyksistä on peräisin keskijänniteverkon vioista. /7/

6.1. Suojaukset

Suomessa voimassa olevat sähköturvallisuusstandardit sisältävät yleisiä suojaukselle asetettuja vaatimuksia. Sähköverkkoyhtiön on täytettävä nämä. Tehokkaalla suojauksella sekä siihen liittyvällä automaatiolla voidaan parantaa huomattavasti sähkönjakelun luotettavuutta. Jokaisella sähköaseman johtolähdöllä on oma releensä. Releet tarkkailevat sähköverkon tilaa ja tarpeen vaatiessa suorittavat kytkentöjä automaattisesti, luotettavasti ja nopeasti. Rovakairan käyttämät suojareleet ovat suurimmaksi osaksi ABB:n valmistamia. Rovakairan sähköasemilla on käytössä sekä vanhaa että uutta reletekniikkaa. Seuraavissa kappaleissa käsitellään jakeluverkon suojaukset, jotka käsittävät oikosulkusuojauksen, maasulkusuojauksen ja jälleenkytkentäreleistyksen. /7/,/11/

6.2. Oikosulkusuojaus

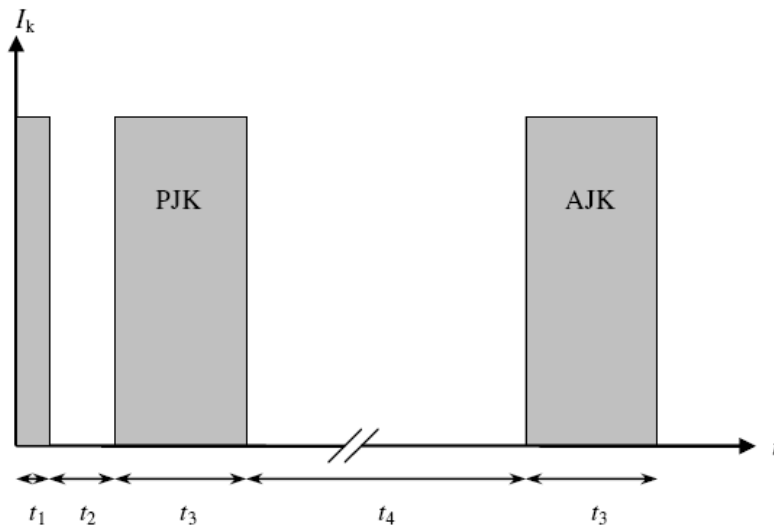
Oikosulkusuojauksen tarkoituksena on ehkäistä oikosulkuvirran johtimen liiallinen lämpeneminen sekä katkaista virta vioittuneelta johto-osalta. Lisäksi oikosulkusuojauksen tavoitteena on taata jakelujärjestelmän turvallisuus myös vikatilanteissa sekä käyttäjille että ulkopuolisille. SFS 6001-standardi velvoittaa, että asennukset on suunniteltava, rakennettava ja koottava kestämaan turvallisesti oikosulkuvirtojen mekaaniset ja termiset rasitukset. /7/

Säteittäisen jakeluverkon oikosulkusuojaus toteutetaan yleensä vakioaikaylivirtareleillä ja silmukoidussa jakeluverkossa distanssi- ja apuyhteysvertoreleillä. Säteittäistä jakeluverkkoa suojatessa vakioaikaylivirtareleillä on peräkkäisille katkaisijoille varattava riittävä aikaporrastus releiden hidastuksille selektiivisyyden takia. Laskettaessa porrastusta on otettava huomioon releen toiminta-ajan lisäksi katkaisijoiden toiminta-aika ja valokaariaika sekä suojalaitteiden toiminta-aikojen hajonnasta johtuva varmuusaika. /9/

Sähköasemien lähellä olevien suurten oikosulkuvirtojen 20 kV avojohtojen ja kaapelien termisen oikosulkukestoisuuden vuoksi ei ole hyvä käyttää hidastettuja vakioaikaylivirtareleitä. Sen sijaan olisi suositeltavaa käyttää joko vakioaikaylivirtareleiden viiveetöntä pikalaukaisua tai käänteisaikaylivirtareleitä. Releen on havahduttava johtolähdön lopussa tapahtuvassa kaksivaiheisessa oikosulussa. Kaksivaiheinen oikosulkuvirta saadaan laskennallisesti kertomalla kolmivaiheinen

oikosulkuvirta termillä $\sqrt{3}/2$. Releelle havahtumisen asetteluarvoksi kelpaa suurempi arvo kuin maksimi kuormitusvirta, mutta pienempi kuin kaksivaiheinen oikosulkuvirta. /9/,/7/

Oikosulkusuojauksa suunniteltaessa on ajateltava pahinta mahdollista tapausta, jossa vika ei poistu jälleenkytkentöjen avulla. Oikosulkukestoisuutta tarkistettaessa on otettava huomioon pikajälleenkytkentää edeltävän ja sen jälkeisen oikosulun kesto aika. Kuvassa 6 on releen pika- ja aikajälleenkytkennän kytkentäsekvenssin periaate. /20/



Kuva 6. Kytkentäsekvenssi aika- ja pikajälleenkytkennälle /18/

Kuvan 6 mukaisen releen kytkentäsekvenssiä käytettäessä oikosulun kesto aika voidaan laskea kaavalla 6.

$$t = (t_1 + t_3) \times e^{\frac{-t_4}{\tau}} + t_3 \quad (6)$$

missä

t_1 on oikosulun kesto aika ennen ajk:n jännitteetöntä aikaa, joka sisältää releeseen aseteltujen hidastusaikojen summan lisättynä releen havahtumis- ja katkaisijan toiminta-aikojen summalla

t_3 on releen hidastusaika

t_4 on ajk:n jännitteetön aika

τ on jäätymisaikavakio

t_2 on ajk:n jälkeisen oikosulun kesto aika. /18/

Pika- ja aikajälleenkytkentää (PJK ja AJK) käytetään yleensä avo- ja sekajohtoverkossa, koska avojohtimien ylikuormitus on harvinaista johtimien hyvän lämmönluovutuksen takia. Jälleenkytkennöillä on huomattava vaikutus johtimien lämpenemiseen. Kaapeliverkossa maasulku on yleensä pysyvä, eikä jälleenkytkennöistä ole apua. /9/

Johtimen oikosulkukestoisuudelle kolmivaiheinen oikosulkuvirta on mitoittava tekijä varmennetuille johdoille. Kaapelivalmistajat ilmoittavat johdolle suurimman sallitun yhden sekunnin termisen oikosulkuvirran I_{k1s} arvon. Nykyaikaiset releet ja katkaisijat voivat katkaista vikavirran jopa 0,1 sekunnissa, jolloin releisiin voidaan asettaa aikahidastusta, jolla voidaan varmistaa aikaselektiivisyys. 0,3-0,5 sekunnin aikahidastuksella täyttyy selektiivisyys peräkkäisten releiden välillä riippuen käyttävistä reletyypistä. Aikahidastuksen asettamisessa täytyy olla tarkkana, jotta johdin ei lämpene yli sallitun arvon. Kaavan 7 avulla saadaan laskettua sallittu oikosulkuvirta oikosulun kestoajan ollessa erisuuri kuin 1 s. /18/

$$I_{kt} = \frac{I_{k1s}}{\sqrt{t}} \quad (7)$$

missä

I_{k1s} johtimen yhden sekunnin terminen oikosulkuvirta
 t on oikosulun kesto aika. /18/

6.3. Maasulkusuojaus

Maasulkuilmiö poikkeaa olennaisesti oikosulusta. Vikapaikan etäisyyttä ei voida laskea vikavirran suuruudesta ja vikavirrat ovat tavallisesti hyvin pieniä. Kaikilta sähköaseman lähdeiltä vikavirtaa kulkeutuu vikapaikkaan, sen vuoksi vikapaikan laskeminen on hankalaa vikavirran perusteella. Maasulkuviat voidaan jakaa neljään eri luokkaan: yksivaiheinen maasulku, kaksoismaasulku, kaksivaiheinen maaosikosulku sekä johdinkatkeaman aiheuttama yksivaiheinen maasulku kuorman puolella. /18/

6.3.1. Verkon maadoitustavat

Keskijänniteverkon maadoitustapana käytetään Suomessa maasta erotettua verkkoa (kuva 7) tai sen erityismuotoa sammutettua verkkoa (kuva 9). Rovakaira Oy:n keskijänniteverkko on toteutettu suurimmaksi osaksi sammutettuna järjestelmänä. Verkon tähtipisteeseen sammutetussa verkossa kytketään induktanssi. Keskeisin syy minkä vuoksi käytetään maasta erotettua keskijänniteverkkoa, on huonoista maadoitusolosuhteista aiheutuva kosketusjänniteongelma. Usein maasulku syntyy vaihejohtimien valokaaresta tai kosketuksesta suojamaadoitettuun osaan. /7/,/11/

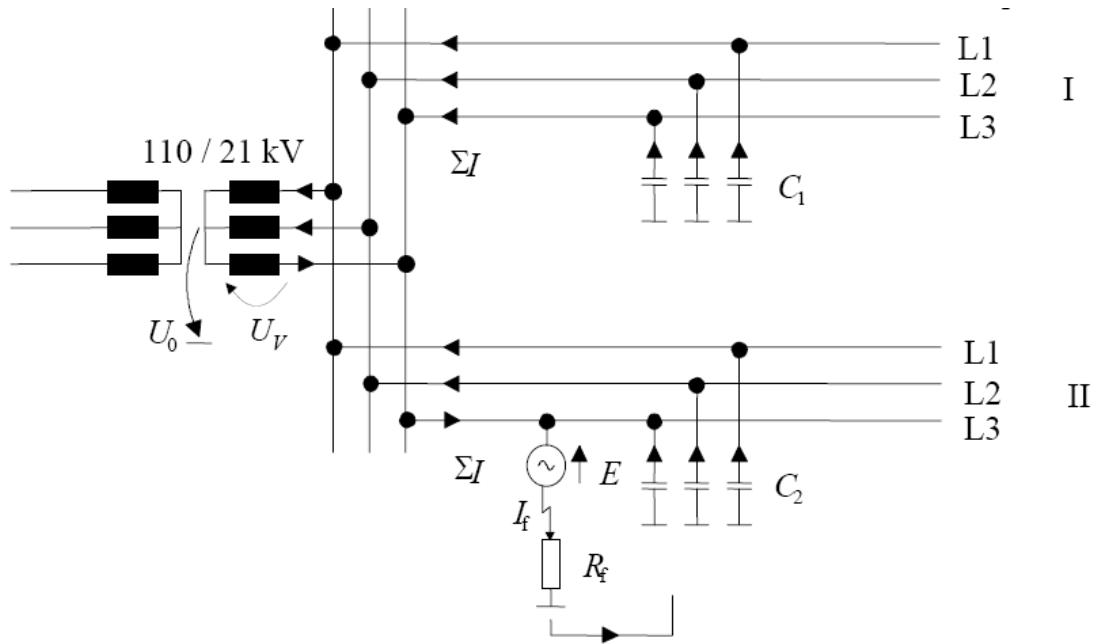
Maasta erotetussa verkossa ei ole johtavaa yhteyttä maahan lukuun ottamatta jännitemuuntajia. Vaihejohtimien maakapasitanssin kautta kulkevien varausvirtojen summa on nolla terveessä tilassa. Yksivaiheinen maasulku tapahtuu silloin, kun vaihejohdin joutuu suoraan tai vikaimpedanssin kautta maahan. Tällöin viallisen vaiheen jännite ja varausvirta pienenee, mutta jännitteet terveissä vaiheissa maata vasten sekä varausvirrat kasvavat. Kuormitukset eivät häiriinny ennen katkaisijan avautumista, koska vaiheiden väliset jännitteet pysyvät ennallaan. /19/

Sammutetulla verkolla tarkoitetaan sellaista verkkoa, jossa on yhden tai useamman muuntajan tähtipisteeseen kytketty kompensointikuristin. Kompensointikuristimen induktiivinen reaktanssi pyritään mitoittamaan siten, että verkon maakapasitanssien kautta kulkevien virtojen summa on sama kuin kuristimien kautta kulkeva virta. Tällöin vikavirta I_f jää pieneksi, jolloin maadoitusjännitteet pysyvät kohtuullisena ja standardien mukaiset vaatimukset voidaan täyttää. /19/

Sammutettu verkko vähentää myös maasuluista aiheutuvia relettoimintoja, koska osa valokaarimaasuluista sammuu itsestään. Sammutuksen avulla voidaan parantaa siten sähkön laatua ja jälleenkytkentöjen määrää. Suomessa käytetään myös sammutuksen lisäksi myös niin sanottua hajautettua kompensointia. Hajautetulla kompensoinnilla tarkoitetaan eri puolille verkkoa asennettuja pieniä kompensointiyksiköitä. Verrattuna sammutettuun verkkoon hajautettu kompensointi on edullisempi. Haittapuolena hajautetussa kompensoinnissa on kompensointilaitteiston säädön puute. Kompensointilaitteistoja kohden täytyy olla riittävä määrä sähköverkkoa. Jos sähköverkon määrä muuttuu liian alhaiseksi verrattuna kompensointilaitteistoihin, voi liian iso induktiivinen virta aiheuttaa tarpeettomia katkaisijatoimintoja. /19/,/9/

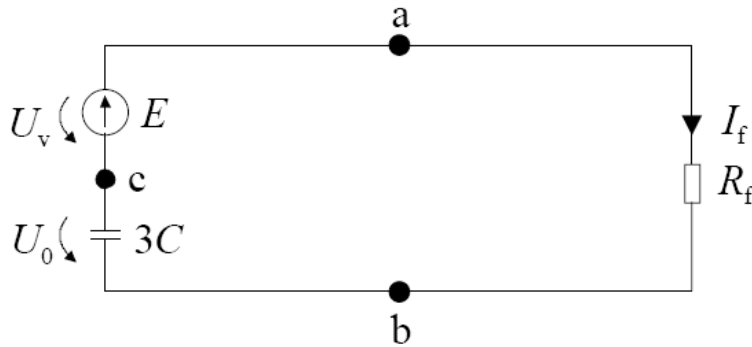
6.3.2. Maasulku ja maasulkuvirtojen laskenta

Kuvassa 7 on havainnollistettu maasulkuvirtojen kulku maasta erotetussa verkossa. Maasta erotetusta verkossa maasulkuvirta I_f kulkee mahdollisen vikaresistanssin R_f kautta maahan, johtojen vaihejohtojen impedanssin ja maakapasitanssin kautta päämuuntajan kautta käämityksiin ja sieltä vaiheimpedanssien kautta vikapaikkaan. /7/



Kuva 7. Maasulku maasta erotetussa verkossa /7/

Vikapaikasta voidaan tehdä kuvan 8 mukainen Thevenin sijaiskytkentä. Muuntajien ja johtojen impedanssi voidaan olettaa nolliksi, koska ne ovat maakapasitansseihin nähden hyvin pieniä. Maasulkupaikkaan sijoitetaan Thevenin jännitelähde, joka on vioittuneessa vaiheessa ennen vikaa vaihejännitteen U_V suuruinen. Maasulkuvirtapiiri muodostuu maakapasitansseista, joka merkitään kondensaattoreilla 3C. Sijaiskytkennässä verkon tähtipistettä kuvataan pisteellä c ja kondensaattorin yli vaikuttavaa jännitettä U_0 . Sijaiskytkennän avulla voidaan yksinkertaistaa maasulkulaskentaa. /7/



Kuva 8. Maasta erotetun verkon sijaiskytkentä /7/

Maasulkuvirta I_f ja tähtipistejännite U_0 voidaan laskea sijaiskytkennän kuvan 8 avulla maasta erotetussa verkossa kaavoilla 8 ja 9,

$$I_f = \frac{j3\omega C}{1 + j3\omega CR_f} U_v \quad (8)$$

$$U_0 = \frac{-1}{1 + j3\omega CR_f} U_v \quad (9)$$

missä

ω on kulmataajuus $2\pi f$, jossa f on taajuus

C on vaiheen maakapasitanssi

R_f on vikaresistanssi

U_v viallisen vaiheen jännite ennen vikaa. /7/

Maakapasitanssi ja vikaresistanssin suuruus vaikuttavat maasulkuvirran suuruuteen. Sen sijaan verkoston pituus ja kaapelointiaste vaikuttavat maakapasitanssin suuruuteen. Maakaapeleilla kapasitanssi on moninkertainen verrattuna ilmajohtoihin. Maakapasitansseihin vaikuttaa huomattavasti kaapelin rakenne ja laskelmissa onkin aina käytettävä valmistajien ilmoittamia maakapasitanssiarvoja. /7/

Sijaiskytkennän 8 avulla, vikaresistanssin R_f ollessa nolla, maasulkuvirran suuruus lasketaan kaavalla 10. /9/

$$I_f = 3 \times \omega \times C_0 \times U_v \quad (10)$$

Ilmajohtojen maasulkuvirta voidaan laskea kaavalla 11 tai käyttämällä keskimääräistä maakapasitanssiarvoa 6 nF/km. /7/

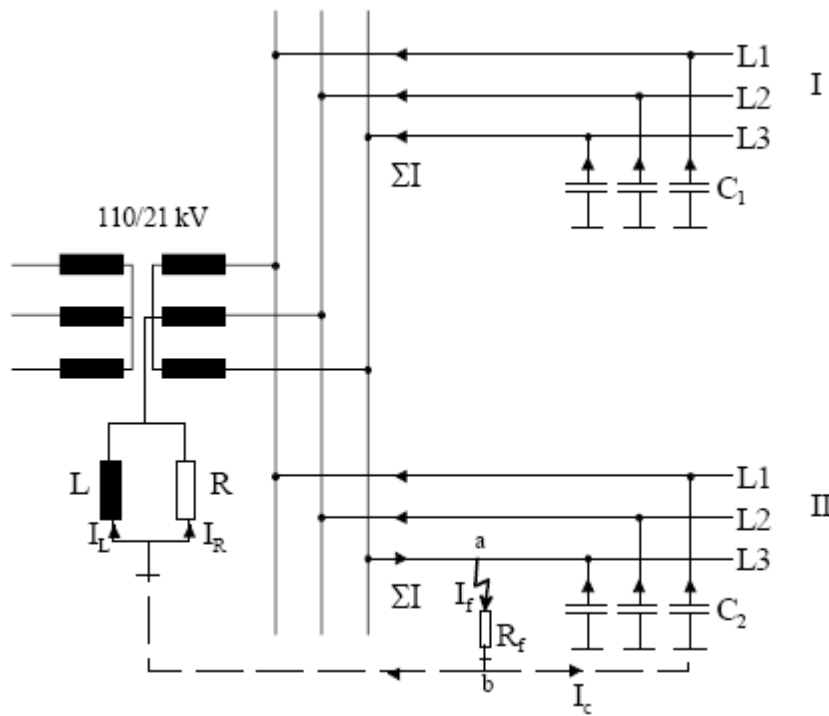
$$I_f \approx \frac{Ul}{300} \quad (11)$$

missä

U on verkon pääjännite

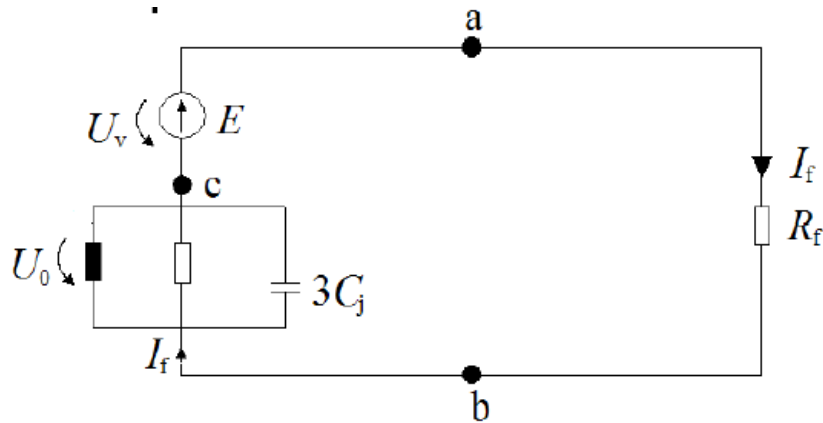
l on galvaanisesti yhteen kytketyn verkon pituus. /9/

Kuvassa 9 on havainnollistettu maasulkuvirtojen kulku sammutetussa verkossa. Sammutetussa verkossa maasulkuvirta kulkee säädettävän sammutuskuristimen kautta. Verkon tähtipisteen ja maan välille kytketään kuristin, joka viritetään resonanssiin maakapasitanssin kanssa, jolloin kokonaismaasulkuvirta pienenee. /7/



Kuva 9. Maasulku sammutetussa verkossa /7/

Sammutetussa verkossa maasulkupaikasta voidaan tehdä kuvan 10 mukainen Thevenin sijaiskytkentä samalla tavalla kuin maasta erotetussa verkossa. Maasulkupaikkaan sijoitetaan Thevenin jännitelähde, joka on vaihejännitteen U_V suuruinen ennen vikaa. Alla olevassa sijaiskytkennässä kuristimen rinnakkaisresistanssin kautta kulkeva virta on I_r . Virta I_r määräytyy tähtipistejännitteestä U_0 ja resistiivisestä osasta R. Sijaiskytkennässä C_j on vioittuneen lähdön maakapasitanssi. /7/



Kuva 10. Sammutetun verkon maasulkupiirin sijaiskytkentä /7/

Kuvan 10 sijaiskytkennän avulla voidaan sammutetun verkon maasulkuvirta I_f ja nollajännite U_0 voidaan laskea sammutetussa verkossa kaavoilla 12 ja 13,

$$I_f = \frac{U_v}{R_f + \frac{R}{1 + jR(3\omega C - \frac{1}{\omega L})}} \quad (12)$$

$$U_0 = \frac{-R}{R_f + R + jRR_f(3\omega C - \frac{1}{\omega L})} U_v \quad (13)$$

missä

R on sammutuskuristimen resistanssi

L on sammutuskuristimen induktanssi

ω on kulmataajuus $2\pi f$, jossa f on taajuus

C on vaiheen maakapasitanssi

R_f on vikaresistanssi

U_v viallisen vaiheen jännite ennen vikaa. /7/

Maasulussa olevan johdon syöttöpään vaihevirtojen summavirta ei sisällä johdon omien maakapasitanssien kautta kulkevaa osaa maasulkuvirrasta. Tällöin vaihevirtojen summavirraksi saadaan kaava 14.

$$I_r = \frac{C - C_j}{C} I_f \quad (14)$$

missä

C on koko verkon maakapasitanssi

C_j on vioittuneen lähdön maakapasitanssi. /9/

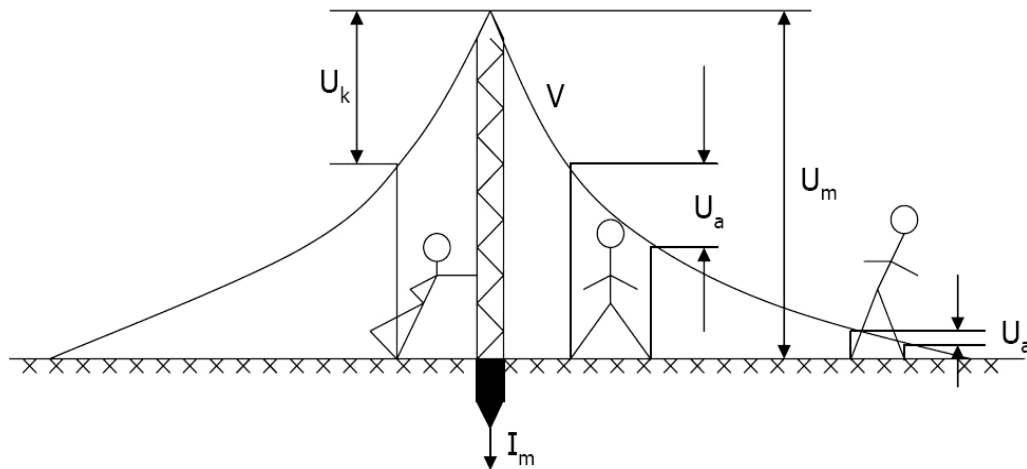
6.3.3. Maasulkua koskevat standardit

Pääsääntönä on, että jokainen maasulku kytketään pois automaattisesti tai käsin, ettei pitkäaikaisia tai jatkuvia kosketusjännitteitä esiinny maasulussa. Yleensä maasulku pitää kytkeä pois automaattisesti. Hälytystä ja käsin tapahtuvaa poiskytkentää voidaan käyttää silloin, kun maasulun aiheuttama keskeytys on tarvetta siirtää sopivampaan ajankohtaan. Lisäksi hälytystä ja käsin tapahtuvaa poiskytkentää käytettäessä on täytettävä seuraavat ehdot:

- Sähköverkon rakenteen tulee olla sellainen, että maasulun aikana valokaaren todennäköisyys on mahdollisimman pieni. Valokaaren on sammuttava itsestään kaapeliverkossa tai ilmajohtoverkossa.
- Maasulkuvian on tultava hälytys, joka välitetään sähköverkon käyttöä valvovan henkilön käyttöön. Maasulkuvian selvittämiseen on ryhdyttävä välittömästi. Jos maasulusta ei aiheudu välitöntä vaaraa ihmiselle tai omaisuudelle, käyttöä voidaan jatkaa enintään kahden tunnin ajan. Yli kahden tunnin maasulkua voidaan jatkaa pitempään, jos maasulku on löydetty ja varmistetaan, ettei siitä aiheudu vaaraa ulkopuolisille. Jos maasulku tapahtuu jakelumuuntamossa, joka ei ole laajassa maadoituksessa, ei jakelumuuntamon käyttöä saa jatkaa.
- Kosketusjännite on pidettävä alle 75 V, joka merkitsee käytännössä enintään 150 V sallittua maadoitusjännitettä.
- Jos maasulun kesto-aika on huomattavan pitkä, on syytä käyttää arvoa I_{KEE} arvon I_E asemasta. /17/

Sähköturvallisuusmääräykset edellyttävät, että maasulkusuojauksen on toimittava, jos maasulku kohdistuu suojamaadoitettuun osaan. Lisäksi maasulunsuojauksen on toimittava suojamaadoittamattomaan paikkaan tapahtuvassa maasulussa, kun vikaresistanssi R_f on pienempi kuin 500 Ω . On kuitenkin suositeltavaa, että suojaus toimii suuremmillakin vikaresistanssin arvoilla. Verkon osassa, johon kuuluu päällystettyjä avojohtoja (PAS), maasulkusuojauksen pitää toimia myös yli 500 Ω :n vioissa. /22/

Maasulussa syntyy aina askel- ja kosketusjännitteitä (kuva 11). Askeljännite U_a tarkoittaa potentiaaliero, joka syntyy henkilön jalkojen välille maasulussa. Tästä johtuen esimerkiksi kaivurin ajaessa sähkölinjaan, kuljettajan käsketään poistua koneen läheisyydestä tasajalkaa hyppien. Kosketusjännite U_k muodostuu esimerkiksi henkilön ja pylvään väliin. Kosketusjännitteen suuruus riippuu maasulkuvirrasta ja suojamaadoitusten resistanssista. Sähköiskun vaarallisuus riippuu kosketusjännitteestä ja virran kestoajasta. Mitä lyhempi on virran kesto-aika sitä pienempi on virran aiheuttama hengenvaara. Kosketusjännite pyritään määrittämään sellaiseen arvoon, jolla vältettäisiin hengenvaarallisen sydänkammiovärinän syntyminen. Maasulkuvirta aiheuttaa maasulkupaikassa maadoitusjännitteen. Jakelumuuntajan ylijännitesuojan toimiminen salamaniskusta on tyypillinen maasulkutilanne. Tällöin maasulkuvirta synnyttää maadoitusresistanssissa maadoitusjännitteen U_m . /7/, /13/



Kuva 11. Askel - ja kosketusjännitteiden synty maasulussa /13/

Maasulun aikana maadoitusjännite aiheuttaa ihmiselle tai eläimelle kosketusjännitteen. Suurjännitestandardi SFS 6001 on määritellyt sallitut kosketusjännitteet erilaisille asennuksille. Maasulun kestoajan perusteella voidaan määrittää sallitut kosketusjännitteet taulukon 8 mukaisesti. Muuntamon maadoituksia suunniteltaessa lähtökohtana on maadoitusjännite, joka voidaan laskea yhtälöllä 15.

$$U_m \leq k \times U_{TP} \quad (15)$$

missä

k on asennuksen mukaan määräytyvä kerroin

U_{TP} on sallittu kosketusjännite

U_m on maadoitusjännite. /17/

Taulukko 8. Sallittu kosketusjännite laukaisuaajan funktiona /17/

Laukaisuaika [s]	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
U_{TP} [V]	390	280	215	160	132	120	110	110

Yhteisen maadoituksen käyttöä suositellaan aina, kun se on mahdollista. Yhteistä maadoitusta voidaan käyttää, jos muuntamo ja pienjänniteverkko maadoitetaan standardien ohjeiden mukaisesti. Tällöin maadoitusjännite U_m voi olla kaksinkertainen verrattuna U_{TP} arvoon. Esimerkiksi 0,6 sekunnin laukaisuajalla sallittu maadoitusjännite on $2 \times 160 \text{ V} = 320 \text{ V}$ ja 40 A maasulkuvirralla suurin sallittu maadoitusresistanssi $320 \text{ V} / 40 \text{ A} = 8 \Omega$. /17/

Jos voidaan saavuttaa riittävä turvallisuus, niin erityistapauksissa, kuten teknisistä tai taloudellisista syistä, maadoitusjännite U_m saa olla nelinkertainen verrattuna U_{TP} . Arvoa voidaan käyttää, kun muuntopiiriin alueella on huonot maadoitusolosuhteet, muuntamolle rakennetaan potentiaaliohjaus standardin SFS 6001 mukaisesti tai maadoitetaan jokainen pienjännitejohtohaara riippumatta sen pituudesta. /17/

Jos maaperä on koko muuntopiirin alueella huonosti johtavaa, niin voidaan käyttää maadoitusjännitteenä U_m arvona viisinkertaista U_{TP} arvoa. Tällöin on noudatettava seuraavia lisäedellytyksiä:

- Muuntamalla on tehtävä potentiaalinohjaus.
- Pienjänniteliittymällä pitää olla oma maadoitus.
- Jos maadoitusta ei voida liittää rakennuksen pääpotentiaalintasaukseen, suositellaan tehtäväksi rakennuksen ympärille potentiaalinohjaus. /17/

Jos yhtään edellä mainituista ehdoista ei voida toteuttaa, niin suur- ja pienjänniteverkkojen maadoitusjärjestelmien on oltava erillisiä. Maadoitusjärjestelmän erottaminen suur- ja pienjännitejärjestelmästä on tehtävä siten, että pienjänniteasennuksessa ei aiheudu vaaraa henkilöille tai vahinkoa laitteille. Lisäksi maasulun aikana pienjänniteverkossa ei saa aiheutua sellaista potentiaalin nousua, joka ylittää taulukon 8 mukaisia kosketusjännitteitä. /17/ Standardin mukaisia maadoitusjännitteitä voidaan saavuttaa maadoituksia parantamalla, maasulkusuojauksen laukaisuaikaa lyhentämällä tai pienentämällä maasulkuvirtaa käyttämällä verkossa sammutuskuristinta /7/.

6.4. Maasulkusuojauksen toteuttaminen

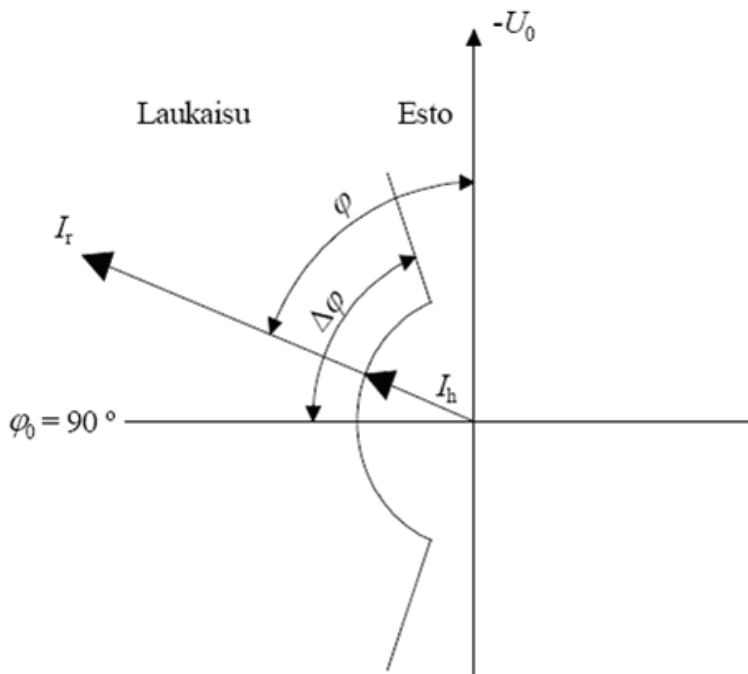
Keskijänniteverkon maasulkusuojauksen toteutus riippuu verkossa käytettävästä maadoitusmenetelmästä. Jotta relesuojaus voidaan toteuttaa verkosta, täytyy selvittää maasulkuvirran suuruus ja sen kehitys, verkon maadoitustapa sekä varasyöttöjen tai muun tilapäiskäytön vaikutus maasulkuvirtaan ja sen jakautumiseen verkossa. Lisäksi pitää ottaa huomioon mittamuuntajien muuntosuhteet, peräkkäisten tulevien suojausportaiden lukumäärä ja mahdollinen rengaskäyttö tai kaksoisjohdot. /9/

Käytettävien releiden herkkyyden määräävät maasulkuvirta ja mittamuuntajien muuntosuhteet. On hyvä kiinnittää erityisesti huomiota virtamuuntajien muuntosuhteiden kehittämiseen, koska muuntosuhteita joudutaan suurentamaan kuormitusvirtojen kasvaessa. Tällöin releen suojausherkyys huononee virtamuuntajien summakytkentää käytettäessä. Virtamuuntajien muuntosuhteita ei tarvitse muuttaa, jos maasulkuvirta muunnetaan nollavirtareleelle kaapelivirtamuuntajalla. /9/

Suojauksen suunnittelussa on otettava huomioon suojauksen aikaporrastus. Aikaporrastuksessa pitää varata tarpeeksi aikatoleranssia maasulun alkutransientille sekä katkaisijoiden ja releiden toiminta-aikojen hajonnalle. Aikaporrastus ei saa mennä alle 0,3 s. Releen havahtumiskoskettimia käytetään sähköaseman ala-asemalla ja aikakoskettimia sähköasemalla. Näin vältetään tilanteelta, jossa vian sattuessa ala-aseman jälleenkytkennät katkaisevat sähköt ala-aseman syöttämällä johdolla. /9/

6.4.1. Maasta erotetun verkon suojaus

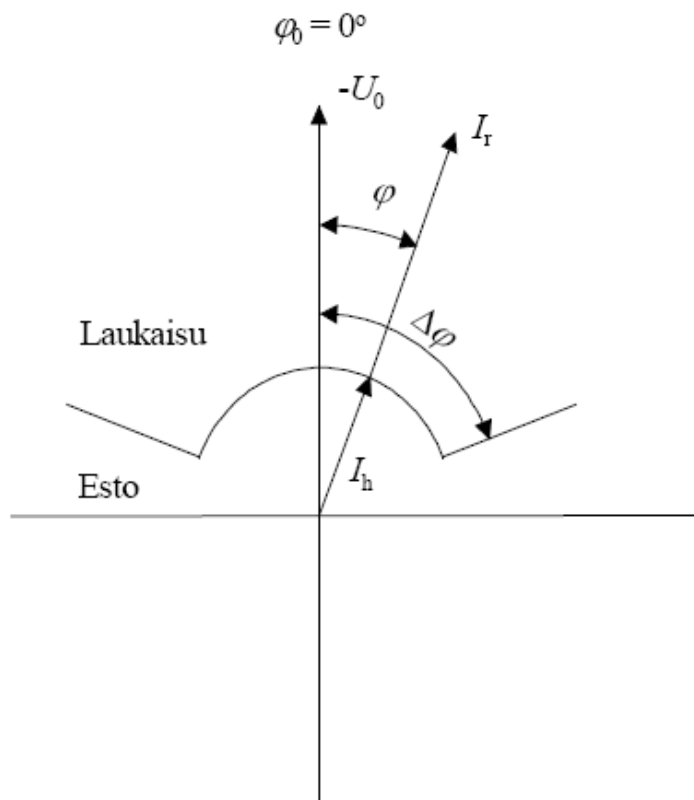
Maasulkusuojaus toteutetaan maasulun suuntareleillä, jotka perustuvat maasulun vaihevirtojen epäsymmetriaan ja tähtipistejännitteen kohoamiseen. Suuntareleitä suositellaan käytettäväksi, koska verkon pituuden muutos ei vaikuta suuntareleiden selektiivisyyteen. Suuntareleiksi olisi hyvä valita releet, joiden peruskulma voidaan muuttaa loiskytkennästä pätökytkentään. Peruskulman vaihtamisen hyötynä on se, että suuntareleitä ei tarvitse vaihtaa, jos verkko muutetaan myöhemmin kompensoiduksi. Suuntareleen asetteluarvoiksi laitetaan virran ja jännitteen väliseksi vaihesiirtokulmaksi 90° , jolloin rele havaitsee pelkästään kapasitiivista virtaa. Lisäksi maasulun suuntareleen toiminnan ehtona on, että nollavirta I_r ja tähtipistejännite U_0 ylittävät tietyt asetteluarvot. Kuvassa 12 on vaihekulmasuuntareleen virtakulmadiagrammi, jolla voidaan havainnollistaa releen asetteluarvot ja toiminta-alue. /9/,/7/



Kuva 12. Vaihekulmasuuntareleen virtakulmadiagrammi maasta erotetussa verkossa /9/

6.4.2. Sammutetun verkon suojaus

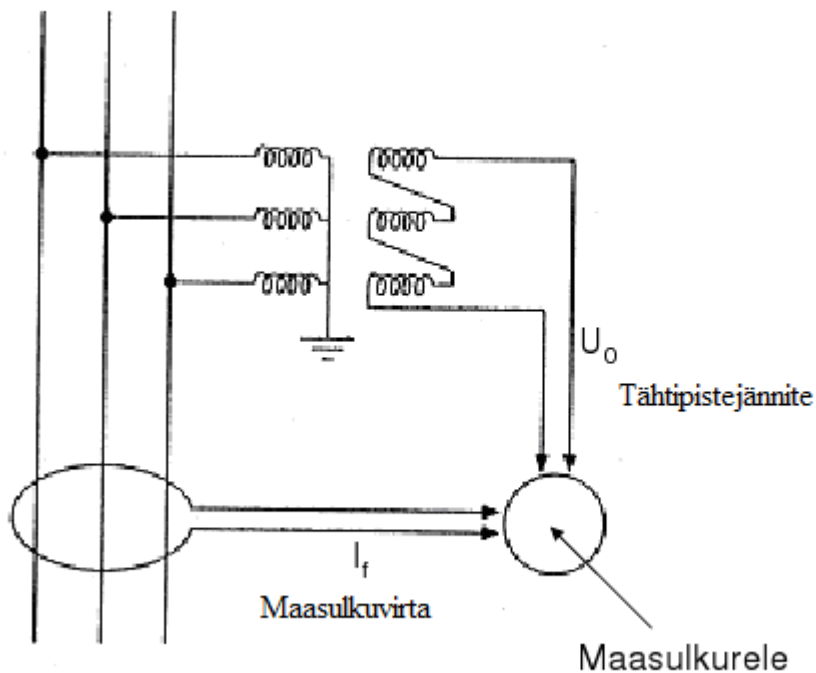
Ohimenevät viat poistuvat keskijännitealueella alle 0,2 sekunnissa, jos kompensointikuristin on vireessä. Virityksen siirtyessä pois resonanssialueelta aika pitenee hieman, jolloin muutama sata millisekuntia kestävä vika voidaan katsoa pysyväksi. Näin ollen releen havahtumisaikana voidaan pitää muutamaa millisekuntia. Suuntareleet pysyvät normaalisti lukittuina jännitereleiden toimesta. Jännitereleet sallivat suuntareleiden toiminnan 250 millisekunnin kuluttua vian syntymisestä. Lukituksen jälkeen jänniterele ohjaa kuristimen rinnalle vastuksen, jolloin vikavirran pätökomponentti kasvaa ja releet tunnistavat helpommin vian. Elleivät releet ole laukaisseet vikaa pois 10 sekunnin kuluttua, ohjauspiiri kytkee pois vastuksen. Sammutetussa verkossa vaihekulmasuuntareleen toiminnan ehtona on myös, että nollavirta I_r ja tähtipistejännite U_0 ylittävät tietyt asetteluarvot. Sammutetussa verkossa vaihesiirtokulman asetteluarvoksi asetetaan 0° . Kuvassa 13 on havainnollistettu releen asetteluarvoja ja toiminta-aluetta. /9/



Kuva 13. Vaihekulmasuuntareleen virtakulmadiagrammi sammutetussa verkossa /9/

6.4.3. Maasulkusuojauksen liittyviä mittauksia

Maasulkusuojauksen toteuttamiseen tarvitaan tiedot tähtipistejännitteestä ja summavirrasta. Maasulkuvirta voidaan mitata vaihevirtamuuntajien summakytkenällä tai kaapelivirtamuuntajilla. Kaapelivirtamuuntajaa on hyvä käyttää aina, kun mitataan pieniä maasulkuvirtoja ($<0,5\text{ A}$) riippumatta nimellisvirtojen suuruudesta. Sähköasemien lähdöillä käytetään yleensä kaapelivirtamuuntajia. Kaapelivirtamuuntaja muodostuu ensiö- ja toisiokäämistä. Ensiökäämin muodostaa kaapeli ja kaapelin ympärille asetetusta toisiokäämin virtamuuntajasydäimestä. Tähtipistejännite mitataan sähköasemalla olevilla jännitemuuntajien avokolmiokytkennällä. Avokolmiokytkennässä kolmioon kytkettyjen jännitemuuntajien yksi kulma jätetään avoimeksi. Jännitemuuntajan muuntosuhteet mitoitetetaan siten, että vikavastuksettomassa maasulussa tähtipisteessä jännite on vaihejännitteen suuruinen ja avokolmion jännite on 100 V . Kuvassa 14 on havainnollistettu tähtipiste ja summavirran mittaus. /7/



Kuva 14. Summavirran ja tähtipistejännitteen mittaaminen /7/

6.5. Johtimen kuormitettavuus

Johdon poikkipinta on mitoitettava kuormitusta vastaavaksi. Ilmajohtojohdojen suurimmat käyttölämpötilat ovat annettu vahvailmajohdomääräyksissä, joiden perusteella johtojen sallitut kuormitettavuudet ovat määritelty. Kj-ilmajohdinten kuormitettavuudet ovat liitteessä 4. Kaapeleiden kuormitettavuus perustuu suurimpaan sallittuun käyttölämpötilaan, joka määräytyy johtimen eristyksen mukaan. Kuormitusvirran lisäksi kaapeleiden lämpeneminen riippuu asennusolosuhteiden ja kuormituksen vaihtelusta. Kaapeleita mitoitettaessa kuormituskertoimet saattavat johtaa ylimitoitukseen, koska vierekkäiset kaapelit ovat harvemmin täydessä kuormassa. Yleensä voidaan olettaa kaapeleita mitoittaessa, että korkeintaan kaksi vierekkäisistä kaapeleista on samanaikaisesti täyteen kuormitettua. /22/

Johdon mitoituksessa on tärkeää tietää terminen kuormitettavuus eli kuinka paljon tehoa voidaan siirtää kullakin johdintyyppillä ilman, että johdin ei vaurioidu. Eri johdintyyppien kuormitettavuudet löytyvät valmistajien kotisivuilta tai standardeista. Jos kaapelia ylikuormitetaan, niin kaapelin elinikä lyhenee ja pahimmissa tapauksissa voi tapahtua eristeen läpi läpilyönti. Terminen kuormitettavuus lasketaan kaavalla 16.

$$P = \sqrt{3}UI\cos\varphi \quad (16)$$

missä

U on pääjännite

I on kuormitusvirta

$\cos\varphi$ on tehokerroin. /7/

7. SÄHKÖVERKON TALOUDELLINEN MITOITTAMINEN

Sähköverkon investointikustannuksia pitää tarkastella pitkältä aikaväliltä. Käyttö- ja investointikustannuksia tulee myös sen pitoajalta. Tästä johtuen ennen investointipäätöstä kannattaa vertailla eri vaihtoehtoja ja niiden kustannuksia koko pitoajalta. Jakeluverkossa pitoajalta syntyvät kustannukset ovat lähinnä käyttö- ja häviökustannuksia. Sähkön siirrossa pääosa häviöistä syntyy muuntajissa ja johdoissa. /11/

7.1. Teknistaloudelliset laskentamenetelmät

Keskeinen tavoite sähkönjakeluverkkojen suunnittelussa on löytää ratkaisuja, jotka ovat teknillisesti ja taloudellisesti edullisia. Lisäksi suunnittelun tavoitteena on määrittää eri verkkokomponenteille pitoajan aikaiset kokonaiskustannukset. Verkon ja komponenttien kustannukset koostuvat investointi-, häviö-, keskeytys- ja ylläpitokustannuksista. Investointikustannukset ovat kertakustannuksia ja muut kustannukset ovat koko pitoajan käsiteltäviä kustannuksia. Muuntajan häviö- ja ylläpitokustannukset pysyvät vakiona koko pitoajan ja osa kustannuksista muuttuu pitoajan aikana, kuten esimerkiksi muuntajan kuormitushäviöt ja keskeytyskustannukset. Alla on taulukko 9, joka havainnollistaa jakeluverkon kustannuksia. /7/

Taulukko 9. Jakeluverkkoon liittyvät kustannukset /7/

	kiinteä	muuttuva	kerta	jaksollinen
Investoinnit	x		x	
Kuormitushäviöt		x		x
Tyhjäkäyntihäviöt	x			x
Keskeytyskustannukset		x		x
Ylläpito	x			x

Nykyarvoja määritettäessä eri investointeihin tarvitaan diskonttauskerroin, jolla koko pitoajan vuotuiset kustannukset voidaan diskontata nykyhetkeen ottamalla huomioon laskentakorko, pitoaika ja laskentakorko. Nykyarvomenetelmällä voidaan eri aikoina tapahtuvat suoritukset saattaa vertailukelpoiseksi. Kustannuksen nykyarvo on sitä pienempi, mitä pidempi aikajakso ja mitä suurempi on korko. Diskonttauskerroin voidaan laskea kolmella eri tavalla. Mitä diskonttauskerrointa käytetään riippuu lasketaanko tyhjäkäyntihäviöitä (k_1), keskeytyshäviöitä (k_2) vai kuormitushäviöitä (k_3).

$$\psi_1 = \frac{\left(1 + \frac{r}{100}\right)}{1 + \frac{p}{100}} \quad \kappa_1 = \psi_1 * \frac{\psi_1^T - 1}{\psi_1 - 1} \quad (17)$$

$$\psi_2 = \frac{\left(1 + \frac{r}{100}\right)}{1 + \frac{p}{100}} \quad \kappa_2 = \psi_2 * \frac{\psi_2^T - 1}{\psi_2 - 1} \quad (18)$$

$$\psi_3 = \frac{\left(1 + \frac{r}{100}\right)^2}{1 + \frac{p}{100}} \quad \kappa_3 = \psi_3 * \frac{\psi_3^T - 1}{\psi_3 - 1} \quad (19)$$

missä

ψ on apukerroin

p on laskentakorko

T on pitoaika

r on kuormituksen kasvu. /7/

7.2. Tyypikuormituskäyrät

Tyypikuormituskäyrällä muodostetaan sähkönkäytölle laskennalliset tuntienenergiat sähkönkaupan taseselvitykseen. Pienille asiakkaille sovelletaan laskentaa, jolla ei ole tuntimittausta ja kaukoluettavaa mittaria. Pienillä asiakkailta tarkoitetaan kuluttajia, joilla pääsulakkeet ovat 63 A tai pienempiä. /15/

Käyttöpaikan tietojen perusteella käyttäjän tyypikäyrä valitaan kolmesta käyrästä. Kauppa- ja teollisuusministeriön sähkökauppojen selvityksessä tyypikäyttäjärhytät jaetaan kolmelle käyttäjärhytälle:

1. vakituksena asuntona käytettävät sähkönkäyttöpaikat, joissa sähkönkäyttö on pääasiassa asumiskäyttöä ja joiden sähkönkäyttö on enintään 10 000 kilowattituntia vuodessa
2. vakituksena asuntona käytettävät sähkönkäyttöpaikat, joissa sähkönkäyttö on pääasiassa asumiskäyttöä ja joiden sähkönkäyttö on yli 10 000 kilowattituntia vuodessa
3. muut kuin ryhmään 1 tai 2 kuuluvat sähkönkäyttöpaikat. /15/

Kauppa- ja teollisuusministeriön päätöksessä 491/1998 tyypikuormituskäyrät on laadittu jokaiselle kuukaudelle tunneittain. Tyypikäyrissä on jaoteltu erikseen arkipäivät, lauantait ja sunnuntait. Tyypikuormituskäyrät eivät tunne erikoispäiviä. Sekä arkilauantaina että juhannus- ja jouluaattona sovelletaan lauantaikäyrää. Juhlapyhinä, uudenvuoden päivänä, vappuna ja itsenäisyyspäivänä sovelletaan taas sunnuntaikäyrää. /8/

Sähkölämmitteiset taloudet ovat lämpötilariippuvaisempia kuin muilla menetelmillä lämmitettävät taloudet. Sähkölämmitettäviin ja muihin ryhmiin jako ei ole kuitenkaan yksiselitteinen, koska monissa asunnoissa voidaan käyttää primäärilämmityksen tukimuotona sähkölämmitystä. Kauppa- ja teollisuusministeriö on määrittänyt sähkölämmittäjän ja ei-sähkölämmittäjän rajan siten, että yli 10 000 kWh vuodessa kuluttavat asiakkaat kuuluvat sähkölämmittäjäksi ja alle 10 000 kWh vuodessa kuluttavat asiakkaat eivät ole sähkölämmittäjiä. /8/,/6/

7.3. Lämpötilakorjaus sähkölämmitettyille kuluttajille

Sähkölämmitteisessä talossa on hyvin suuri sähkönkäytön lämpötilariippuvuus. Tyyppikäyttäjryhmä kaksi kuuluu tähän ryhmään ja ovat yli 10 000 kilowattituntia vuodessa kuluttavia asiakkaita. Kauppa- ja teollisuusministeriön päätöksessä 491/1998 6 § momentin kohdalla lukee, että ryhmän 2 tyyppikuormituskäyrän tuntienenergiaa muutetaan jakeluverkkohaltijan vastuualueelle vastaavaksi. Tyyppikuormituskäyrät on tehty Jyväskylän seudulle. /8/

Ryhmän kaksi lämpötilakorjaus tehdään siten, että lisätään tuntienenergiaa 4 prosenttia jokaista astetta kohti, jolla ulkolämpötila poikkeaa taulukon 10 peruslämpötilasta. Lämpötilaeroa laskettaessa lämpötilana käytetään laskentapäivän ja sitä edeltävän päivän ulkolämpötilojen keskiarvoa. Mittaus tulee suorittaa päivittäin samaan aikaan. KTMp:n mukaan tämä aika on kello 7.00 ja 9.00 välillä. Lämpötilakorjausta ei tehdä yli +15 °C lämpötiloille, koska lämpötilariippuvuus lakkaa olemasta, kun huoneistoja ei enää tarvitse lämmittää. Ryhmiin 1 ja 3 kuuluvia sähkönkäyttäjiä ei tarvitse korjata lämpötilakertoimella, koska sähkönkäytön lämpötilariippuvuus ei vaikuta vuosienenergian suuruuteen. /8/

Taulukko 10. Peruslämpötilat /8/

Kuukausi	°C
Tammikuu	-8,7
Helmikuu	-8,9
Maaliskuu	-5,4
Huhtikuu	1,3
Toukokuu	8,1
Kesäkuu	13,5
Heinäkuu	16,8
Elokuu	14,8
Syyskuu	9,6
Lokakuu	3,8
Marraskuu	-0,8
Joulukuu	-4,8

Lämpötilakorjauksen voi tehdä myös muulla tavalla kuin kauppa- ja teollisuusministeriön päätöksen 491/1998 6 § momentin mukaan. Joillakin verkkoyhtiöillä on niin laaja verkko, että lämpötila-erot talvella saattaa vaihdella eri puolilla jakelualueita. Silloin voi käyttää prosentuaalista painotusta eri puolilla jakelualueita. Esimerkiksi Rovakairan jakelualueella on kolmen kunnan alueella Rovaniemellä, Kittilässä ja Sodankylässä. Kaikissa kunnissa erilaiset sääolosuhteet talvella, joka vaikuttaa olennaisesti sähkölämmitettyjen vuosikulutukseen. Rovakairan lämpötilakorjaus on painotettu siten, että Rovaniemelle, Sodankylään ja Kittilään painotetaan eri prosenteilla. Verrataan Rovakairan jakelualueen paikkakuntia peruspaikkakuntaan Jyväskylään. Näin saadaan muodostettua kaava 19, jolla voidaan tehdä Rovakairan jakelualueen lämpötilakorjaus sähkölämmitettyille kuluttajille.

$$RVK_{\text{lämpötilakorjaus}} = a \times \frac{\text{Rovaniemi}}{\text{Jyväskylä}} + b \times \frac{\text{Kittilä}}{\text{Jyväskylä}} + c \times \frac{\text{Sodankylä}}{\text{Jyväskylä}} \quad (19)$$

missä

Rovaniemi (lämmitystarveluku)

Kittilä (lämmitystarveluku)

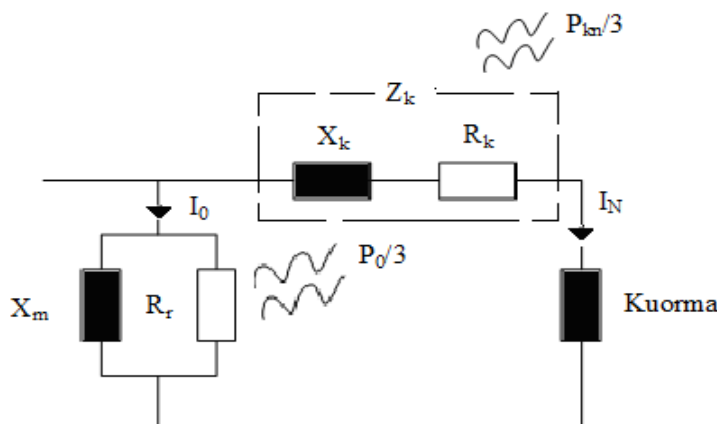
Sodankylä (lämmitystarveluku)

Jyväskylä (lämmitystarveluku)

Lämmitystarveluvuilla korjataan rakennuksen tilojen lämmitysenergiankulutus, jotta voidaan vertailla rakennuksen energiankulutusta eri kuukausina tai vuosina sekä vertailla eri paikkakunnilla olevien rakennuksien energiankulutusta. Jos lämmitystarveluku puuttuu vertailupaikkakunnalla, se voidaan muodostaa korjauskertoimella k1 tai k2. Se, kumpaa korjauskerrointa käytetään, riippuu siitä, kumpaan paikkaan verrataan: Jyväskylään vai johonkin muuhun paikkakuntaan. K2 on korjauskerroin Jyväskylään ja k1 on korjauskerroin vertailupaikkakuntaan. /12/ Lämmitystarveluvut eri paikkakunnille on esitetty liitteessä 5.

7.4. Jakelumuuntajien taloudellinen mitoittaminen

Muuntajassa tapahtuu häviöitä, jotka johtuvat sen käämityksissä olevista induktansseista ja resistansseista. Sen vuoksi muuntaja ei voi siirtää kaikkea tehoa kuormitukseen. Muuntajan häviöt voidaan jakaa kuormitus- ja tyhjäkäyntihäviöihin. Magneettivuon vaihtelu muuntajan rautasydämessä saa aikaan tyhjäkäynti- eli rautahäviöt (P_0). Tyhjäkäyntihäviöt riippuvat jännitteestä, mutta eivät kuormituksesta, koska muuntajan magneettivuo kuormituksesta on lähes riippumaton. Muuntaja on tyhjäkäynnissä (kuva 15) silloin, kun sen toisiokäämi on virraton ja ensiökäämin on kytkettynä vaihtojännitteeseen. Kuormitushäviöt (P_{kn}) eli virtalämpöhäviöt syntyvät käämien resistansseissa kuormitusvirran vaikutuksesta. Muuntaja on kuormituksessa (kuva 15) silloin, kun toisiokäämin napoihin kytketään ulkoinen kuormitus. /7/



Kuva 15. Muuntajan tyhjäkäynti - ja kuormitushäviöiden mallintaminen

Ylläolevassa kuvassa R_r on rautahäviöresistanssi, X_m on magnetointireaktanssi, I_0 on tyhjäkäyntivirta, X_k on toisiokäämin hajareaktanssi, R_k on toisiokäämin resistanssi ja I_n on kuormitusvirta. /7/

Tavallisesti muuntajan kilpiarvoissa ilmoitetaan nimelliset kuormitushäviöt, jotka tarkoittavat muuntajan häviöitä nimelliskuormalla. Nimelliskuorman perusteella voidaan laskea kuormitushäviöt kuormalle, kun tiedetään muuntajan nimellisteho S_n .

Muuntajan kuormitushäviöt voidaan laskea kaavalla 20.

$$P_k = \left(\frac{S}{S_n}\right)^2 \times P_{kn} \quad (20)$$

missä

P_{kn} ovat kuormitushäviöt nimellisellä kuormalla

S on muuntajan kuorma

S_n on muuntajan nimellisteho. /7/

Muuntajan tyhjäkäyntihäviöt pysyvät vakiona koko vuoden ajan. Tyhjäkäyntihäviöt löytyvät erikoisille muuntajille muuntajan arvokilvestä. Tyhjäkäyntihäviöiden kaavaksi voidaan kirjoittaa näin ollen

$$P_o = P_{0n} \times 8760h \quad (21)$$

jossa

P_{0n} on tyhjäkäyntihäviöt nimellisellä kuormalla. /7/

Kun muuntajan tyhjäkäyntihäviöt ja kuormitushäviöt lasketaan yhteen, saadaan muuntajan kokonaishäviöksi

$$P_{kok} = P_o + P_k \quad (22)$$

Muuntajan kokonaishäviöt diskontataan laskentakorkokannan avulla tarkasteluhetkeen nykyarvomenetelmän avulla. Kokonaishäviöt lisätään investointikustannuksiin, jolloin saadaan kokonaiskustannukset pitoajalta

$$K = R_k + kP_{kok}H_e \quad (23)$$

missä

R_k on rakentamiskustannukset

k on diskonttauskerroin

H_e on häviöenergian hinta. /7/

7.5. Johtimen taloudellinen mitoittaminen

Johtimen taloudellisen mitoittamisen tarkoituksena on löytää oikea johdinpoikkipinta, joka täyttää tekniset ja taloudelliset reunaehdot. Rakentamiskustannukset ja näiden kanssa laskennallisesti vertailukelpoisiksi tehdyt häviökustannukset vaikuttavat johdinpoikkipintaan. Komponenttien pitoaika on otettava huomioon, kun etsitään taloudellisinta vaihtoehtoa. Kokonaiskustannukset saadaan diskonttaamalla vuotuiset häviökustannukset rakentamisajankohtaan. /7/

Työ-, materiaali- ja kuljetuskustannukset sisältyvät rakennuskustannuksiin. Tavallisesti verkkoyhtiöllä on käytössä vain muutama johdinpoikkipinta ja laskennallisesti saadaan kuhunkin siirtotilanteeseen taloudellisin vaihtoehto. Uuden johtimen mitoituksessa vertaillaan kahden peräkkäisen poikkipinnan investointi- ja häviökustannuksia keskenään mitoitusteholla. /7/

Johtimen häviöt voidaan laskea kaavalla 24.

$$P_{h1} = \left(\frac{P_M}{U \cos \varphi} \right)^2 r l \quad (24)$$

missä

r on johtimen resistanssi

U on laskentajännite

l on johtimen pituus

P_M on mitoitus-teho

$\cos \varphi$ on tehokerroin. /19/

Johtimen nykyhetkeen diskontatut häviökustannukset lasketaan kaavalla 25.

$$K_h = P_{h1} H_e k \quad (25)$$

missä

P_{h1} on johtimen häviökustannukset

H_e on häviöiden hinta

k on häviöiden diskonttauskerroin. /7/

Kokonaiskustannukset saadaan johtimelle kaavalla 26.

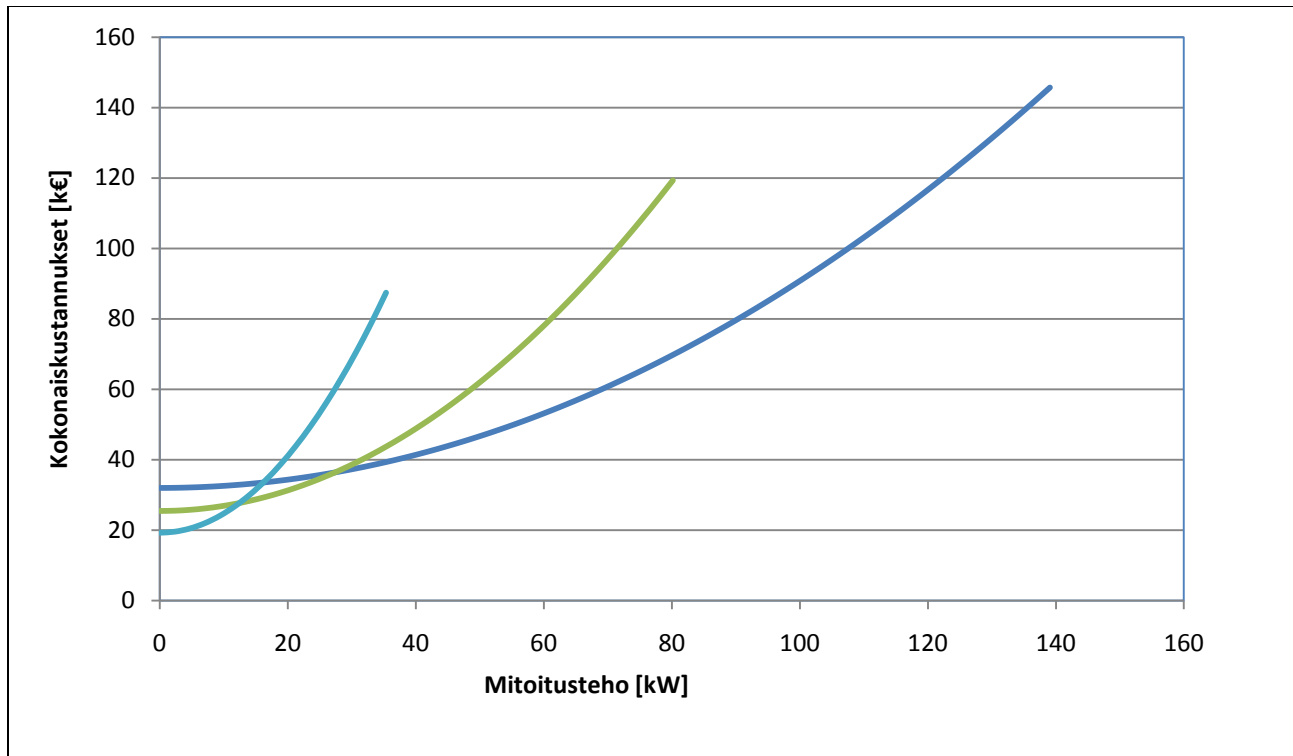
$$K_j = K_h + K_r \quad (26)$$

missä

K_h on johtimen diskontatut häviökustannukset

K_r on rakentamiskustannukset. /7/

Taloudellisen mitoituksen ohjeistuksessa voidaan piirtää esimerkiksi kuvan 16 mukaisia käyriä.



Kuva 16. Eri poikkipintojen taloudelliset tehoalueet

Eri poikkipintojen taloudellisiin tehoalueisiin vaikuttavat johtojen rakentamiskustannukset, häviösähkön hinnoittelu sekä laskentakorkokanta. Edellä mainitut taloudelliset parametrit voivat muuttua ajan kuluessa, joten ohjeet olisi hyvä päivittää säännöllisin väliajoin. Lisäksi on huomioitava taloudellisuyslaskuissa häviöiden huipunkäyttöaika, joka riippuu johdon tai muuntajan kuormituksen ajallisesta vaihtelusta. /7/

Häviöiden aiheuttavat kustannukset ovat merkittävä osa kokonaiskustannuksia. Sen vuoksi häviöiden huomioon ottaminen vaikuttaa olennaisesti mitoituksen tarkkuuteen. Häviöenergia kuormittaa verkkoa ja on katetta tuottamatonta energiaa. Verkkoyhtiö joutuu ostamaan häviösähkön vapailta markkinoilta, joka on taloudellisesti suurin kustannustekijä. Häviöiden hinnoittelussa on hyvä ottaa huomioon sähkön pörssihinnan tulevaisuudessa tapahtuvat muutokset. /7/

7.6. Teknisten reunaehtojen huomioon ottaminen

Johtoa tai muuntajaa ei voida valita ainoastaan taloudellisin perustein. Komponenttien valinnassa tulee ottaa huomioon myös tekniset reunaehdot, joita ovat jännitteenalenema, oikosulkukestoisuus ja kuormitettavuus. /7/

8. LASKENNASSA KÄYTETTÄVÄT PARAMETRIT

8.1. Korkoprosentin määrittäminen

Taloudellisuuslaskelmissa kokonaiskustannukset saadaan, kun häviökustannukset diskontataan pitoajalta nykyhetkeen, jolloin korkoprosentilla ja investointien ajoituksella on merkittävä vaikutus lopputulokseen. Investointiriskien perusteella voidaan valita korkotasoa, mitä laskuissa käytetään. Mitä suurempi investointiriski on, sitä suurempaa korkotasoa olisi hyvä käyttää. Korkean koron aikana ei pyritä tehdä mitään suuria investointeja. Suurin osa verkkoyhtiön investoinneista on lähes riskittömiä. Investoinnin tarvittavaan rahoituskuluihin verkkoyhtiö kerää asiakkailta siirtomaksun muodossa. /7/

Sähköverkon komponenttien pitkät pitoajat ja investointien pienet riskit antavat pohjan laskelmissa käytettävälle korkotasolle. Korkona voidaan tällöin käyttää niin sanottua riskittömän pitkän rahan hankintaa, esimerkiksi valtion obligaatioiden 5 tai 10 vuoden obligaatioiden tuottoa. Eri obligaatioista Suomen Pankki pitää tilastoja ja laskee niiden tuottoa päivittäin. Pitkän aikavälin riskitön korkotasoa on tyypillisesti 4-6 %. /7/ Laskennoissa käytetään 5 %:n korkotasoa.

8.2. Häviöenergian hinta

Häviöenergian hintaa on mahdollista arvioida sähköpörssin pitkän aikavälin hintakehityksen avulla. Sähkön hinta Nordpool-sähköpörssissä on tällä hetkellä 45 €/MWh. Opinnäytetyössä käytetään tämänhetkistä sähkön hintaa. Sähkön hinnalla on suuri merkitys sähköverkkoyhtiön häviökustannuksiin.

8.3. Pitoaika

Sähköverkkokomponenttien teknis-taloudellinen pitoaika on kymmeniä vuosia. Pitoajalla on suuri merkitys talouslaskelmissa. Teknis-taloudellisella pitoajalla tarkoitetaan todellista pitoaikaa, jonka komponentti keskimäärin saa olla käytössä. Tekninen kestoikä on suurempi kuin teknis-taloudellinen pitoaika, koska kaikki komponentit eivät ole käytössä koko teknistä pitoaikaa esimerkiksi ympäristöolosuhteiden muuttumisen takia. /7/

Verkostosuunnittelussa käytetään yleensä 20-30 vuoden suunnitteluajanjännettä, miltä ajalta lasketaan kustannukset. Yli 20 vuoden kustannuslaskelmia ei yleensä tehdä, koska kuormitusten kasvua, ympäristön ja sähkön hinnan muuttumista on vaikea ennustaa. Taloudellisuuslaskelmissa voidaan käyttää pitempiäkin suunnitteluajoja, mutta muuntajien ja johtojen taloudellisuusjärjestykseen tämä ei paljoakaan vaikuta. /7/ Laskelmissa käytetään 30 vuoden pitoaikaa muuntajille ja avojohdoille. Maakaapeleilla laskennassa käytetään 50 vuoden pitoaikaa.

8.4. Investointikustannukset

Investointikustannukset koostuvat varsinaisten verkostokomponenttien hankintahintojen lisäksi erilaisista tarvike-, asennus- ja työkustannuksista. Investoinnin kokonaiskustannuksia määritettäessä otetaan myös huomioon verkoston suunnittelusta, käyttöönotosta, rakennuttamisesta ja dokumentoinnista aiheutuvat kustannukset. Tässä opinnäytetyössä käytetään Energiamarkkinaviraston indeksikorjattuja yksikköhintoja vuodelle 2010. Energiateollisuuden verkostosuosituksessa KA 2:06 on selitetty, mitä yksikköhintoihin kuuluu. Indeksikorjatut yksikköhinnat ovat liitteessä 6.

8.5. Jakelumuuntajien sähköiset arvot

Opinnäytetyössä käytetään jakelumuuntajien yleisempiä standardikokoja, jotka ovat 30, 50, 100, 200, 315, 500, 800 ja 1000 kVA:n muuntajia. Jakelumuuntajien tekniset arvot ovat ABB:n teknisestä oppaasta, jotka esitetty liitteessä 7. Hintoina käytetään Energiamarkkinaviraston indeksikorjattuja komponenttihintoja, jotka ovat liitteessä 6.

8.6. Ilmajohtojen- ja kaapeleiden sähköiset arvot

Opinnäytetyössä käytetään yleisempiä johdin- ja kaapelipoikkipintoja. Keskijännitepuolen avojohtoina käytetään AL 132, Pigeonia, Ravenia ja Sparrowia. Päälystettyjä keskijännitejohtoina käytetään PAS 150 ja PAS 95. Pienjännitekaapeleina käytetään Euro-poikkipintoja, jotka ovat AXMK 240, AXMK 150, AXMK 95, AXMK 50 ja AXMK 25. Pienjänniteilmajohdoissa käytetään AMKA 120, AMKA 70 ja AMKA 35. Kaapeleiden ja avojohtojen tekniset arvot on esitetty liitteessä 8. Hintoina käytetään Energiamarkkinaviraston indeksikorjattuja komponenttihintoja, jotka ovat liitteessä 6.

8.7. Laskentajännitteet

Laskennoissa käytetään laskentajännitteinä keskijännitepuolella 20,5 kV ja pienjännitepuolella 400 V. Jännite vaihtelee pienjännitepuolella riippuen muuntamon etäisyydestä sähköasemalta. Yleisesti jännite pyritään pitämään mahdollisimman suurena häviöiden vähentämiseksi. Verkostosuosituksissa suositellaan, että KJ-verkon alkupään jännite on 20-21 kV. Keskijännitepuolen jännite vaikuttaa releasetteluihin ja johtimien mitoitukseen. /16/

8.8. Kuormituksen kasvu

Häviöiden laskemisessa käytetään Rovakairan keskimääräistä kasvuprosenttia, joka on 2,9 prosenttia vuodelle. Kasvuprosentilla on suuri merkitys taloudellisuuslaskuissa. Mitä suurempi on kuormituksen kasvu vuodessa, sitä suuremmat kuormitushäviöt ovat muuntajilla tai kaapeleilla. Sen vuoksi kuormituksen kasvuprosentti on hyvä olla realistinen.

8.9. Laskennan kuormitustiedot

Häviöistä aiheutuvat kustannukset voidaan laskea, jos tiedetään häviöenergian hinta ja häviöt. Jakelumuuntajille, pienjännitekaapeleille ja pienjänniteavojohtoilta häviölaskuissa hyödynnetään KTM tyyppikuormituskäyrän tuntimittausarvoja. Opinnäytetyössä käytetään muuntopiiriä, jossa on puolet sähkölämmitettyjä ja puolet ei-sähkölämmitettyjä kuluttajia. Sähkölämmitettyjen ja ei-sähkölämmitettyjen muuntopiirin vuosienergia lisätään muuntajan, kaapelien ja avojohtojen kuormitushäviöihin, jolloin saadaan vuotuiset häviöt selville.

Keskijännitejohtojen häviölaskuissa hyödynnetään sähköasemien johtolähtöjen keskimääräistä vuosienergiaa. Kuormitustietojen laskeminen keskijännitejohtoilta, pienjännitekaapeleille, muuntajille ja AMKA-johtimille ovat liitteessä 9.

8.10. Tehokerroin

Tehokerroin ilmoittaa jännitteen ja virran välistä vaihekulmaa. Vaihekulmasta voidaan päätellä kuinka kapasitiivista tai induktiivista kuormitusta on verkossa. Puhtaasti resistiivisellä kuormalla virran ja jännitteen välinen vaihekulma on nolla. Voimakkaasti induktiivisen kuormituksen tehokerrointa voidaan parantaa kompensointikondensaattorilla, mikä parantaa jännitteenlaatua ja häviöitä./16/ Opinnäytetyössä käytetään tehokertoimen pj-puolella 0,95 ja kj-puolella 0,97. Tehokertoimen arvot ovat verkkotietojärjestelmästä. Taulukossa 11 on yhteenveto laskennassa käytettävistä parametreista.

Taulukko 11. Laskentaparametrien yhteenveto

Laskentajännite:	
Pj	400 V
Kj	20,5 kV
Pitoaika:	
Muuntajat	30 vuotta
Johdot	30 vuotta
Kaapelit	50 vuotta
Kasvuprosentti	2,9%/a
Korkokanta	5 [%/a]
Häviöiden hinta	45 [€/MWh]
Investointikustannukset	EMV
Resistanssit	SA 2:08 ja SA 5:94
Muuntajan kilpiarvot	ABB
Tehokerroin:	
Kj	0,97
Pj	0,95

9. TULOSTEN KÄSITTELY

Häviölaskelmien ja liitteen 10 kuvaajien avulla voidaan tehdä päätelmiä johtojen, kaapeleiden ja muuntajien taloudellisista käyttöalueista. Häviölaskut laskettiin Excel-ohjelmalla, josta näkee, missä paikassa johdon tai muuntajan taloudellinen käyttöalue päättyy. Laskelmista huomaa, kuinka suuri merkitys häviökustannuksilla on kokonaiskustannuksista. Taloudellisesti mitoitettu johto tai muuntaja huomioi myös termisen kuormitettavuuden. Kuvaajat skaalattiin niin, että käyrän huippu kuvaa kuormitettavuutta.

Seuraavissa kappaleissa käsitellään tarkemmin pienjännitekaapelien, AMKA-johtojen, keskijänniteavojohdojen ja jakelumuuntajien taloudellisia käyttöalueita ja kuvaajia. Lisäksi tutkittiin, miten eri laskentaparametrit vaikuttavat häviökustannuksiin. Muuntajista, kaapeleista ja johdoista ovat liitteessä 10 esimerkkikuvaajat. Liitteessä 11 on esimerkkilaskuja muuntajan ja kaapelin taloudellisuudesta.

9.1. Taloudelliset käyttöalueet, kaapelit ja avojohdot

Liitteen (10/1-10/4) kuvaajista voidaan tehdä johtopäätöksiä, ettei kaikkia poikkipintoja ole taloudellista käyttää. Keskijännitepuolen avojohdoista olisi suositeltavaa käyttää AL 132, Pigeonia ja Sparrowia. Ravenin taloudellinen käyttöalue on niin suppea, että johtoa ei ole järkevä käyttää ollenkaan. Ravenin käyttöalueen voi korvata paksummalla poikkipinnalla Pigeonilla. Päälystetyistä keskijännitejohdoista taloudelliset käyttöalueet voidaan hoitaa PAS 150 ja -95. AXMK-kaapeleiden poikkipintasarjana olisi hyvä käyttää AXMK 240, -95, -50 ja -25. Maakaapelin AXMK 150 taloudellisen käyttöalueen voi korvata AXMK 240. AMKA-johtojen poikkipinnoille 120,70 ja 35 löytyvät selkeät taloudelliset käyttöalueet. Seuraavalla sivulla on taulukoitu liitteen (10/1-10/4) kuvaajista pienjännitekaapelien, avojohdojen ja keskijänniteavojohdojen taloudelliset käyttöalueet. Käyttöalueista suunnittelijat voivat miettiä, mitä kaapeli- tai johdintyyppiä on hyvä käyttää kuhunkin siirtotilanteeseen.

Taulukko 12. Kaapelien ja avojohtojen taloudelliset käyttöalueet

Johdin/kaapeli tyyppi	Taloudellinen tehoalue
Sparrow	0 MW-1 MW
Raven	1 MW-3 MW
Pigeon	3 MW-6 MW
AL 132	6 MW -
AMKA 35	0 kW-17 kW
AMKA 70	17 kW-45 kW
AMKA 120	45 kW -
PAS 95	0 MW-5 MW
PAS 150	5 MW -
AXMK 25	0 kW-17 kW
AXMK 50	17 kW-25 kW
AXMK 95	25 kW-50 kW
AXMK 150	50 kW-80 kW
AXMK 240	80 kW-

9.2. Taloudelliset käyttöalueet muuntajille

Alla on taulukoitu liitteen (10/5-10/8) kuvaajista muuntajien taloudelliset käyttöalueet. Taloudellisten käyttöalueiden pohjalta suunnittelijat voivat valita oikean kokoisen muuntajan muuntopiiriin huomioiden kuormituksen kasvun.

Taulukko 13. Muuntajien taloudelliset käyttöalueet

Muuntajan koko	Taloudellinen tehoalue
30 kVA	0 kW - 17 kW
50 kVA	17 kW - 38 kW
100 kVA	38 kW - 71 kW
200 kVA	71 kW – 146 kW
315 kVA	85 kW - 146 kW
500 kVA	146 kW - 271 kW
800 kVA	271 kW - 469 kW
1000 kVA	469 kW -

Taulukosta 13 voidaan tehdä muutamia johtopäätöksiä. 30 kVA:n muuntajan taloudellinen tehoalue on niin suppea, että muuntajaa ei kannata käyttää ollenkaan. 30 kVA:n muuntaja voidaan korvata kokoluokkaa isommalla muuntajalla. 100 kVA:n muuntajalla on laaja taloudellinen käyttöalue. 200 kVA:n ja 315 kVA:n muuntajan taloudellinen käyttöalue melkein sama. Tämä merkitsee käytännössä sitä, että 100 kVA:n taloudellisen käyttöalueen päättyessä voi valita joko 200 kVA:n tai 315 kVA:n muuntajan. Liitteen kuvaajista (10/5-10/10) huomaa, että 200 kVA:n muuntajan kokonaiskustannukset ovat hieman pienemmät kuin 315 kVA:n. 315 kVA:sta ylöspäin olevilla muuntajan kokoluokilla löytyvät selkeät taloudelliset käyttöalueet.

9.3. Muuntajien kuormitusmallit

Muuntajien häviökustannukset laskettiin kolmella eri kuormitusmallilla. Ensimmäisessä kuormitusmallissa oletetaan kuormituksen kasvavan pitoajan loppuun saakka 2,9 %:lla. Toisessa kuormitusmallissa kuormitus kasvaa ensin kymmenen vuotta 2,9 %:lla, minkä jälkeen kuormitus ei enää kasva tai kasvaa vain lievästi. Kolmannessa kuormitusmallissa muuntaja mitoitetaan alussa heti riippuen muuntajan koosta suurimpaan suositeltavaan kuormaan. Suositeltava alkukuorma pienillä muuntajilla (30 kVA-200 kVA) on 0,80 kertaa muuntajan nimellistehosta ja suurilla muuntajilla (315 kVA-1000 kVA) on 0,40 kertaa muuntajan nimellistehosta. Kolmannessa kuormitusmallissa kuormituksen kasvu on samanlainen kuin muuntajan toisessa kuormitusmallissa. Kolmella eri kuormitusmallilla tehdyistä häviölaskuksista tuli selkeästi esille taloudellisin kuormitusmalli. Kolmannessa kuormitusmallissa häviökustannukset ovat alhaisimmat.

Häviökustannuksiltaan edullisinta kuormitusmallia olisi hyvä pyrkiä käyttämään muuntajan mitoituksessa. Käytännössä on eri asia, miten häviökustannuksiltaan edullisinta vaihtoehtoa on mahdollista aina käyttää. Taloudellista kuormitusmallia on käytännössä järkevää käyttää silloin, kun tiedetään muuntopiirin tarkka kuormituksen kasvu.

9.4. Herkkyysanalyysi

Laskentaparametreihin liittyy epävarmuustekijöitä, minkä vuoksi on hyvä tarkastella, miten tärkeiden parametrien muuttuminen vaikuttaa lopputuloksiin. Taloudellisiin käyttöalueisiin vaikuttavat korko, kuormituksen kasvu, pitoaika ja häviöiden hinta. Seuraavissa kappaleissa käsitellään lyhyesti, miten edellä mainittujen parametrien vaikutuksen huomaa häviökustannuksissa.

Laskennoissa on valittu laskentakoroksi 5 %, mutta koron suuruus vaihtelee markkinoiden ja taloudellisen tilanteen mukaisesti. Herkkyysanalyysiin valittiin korkotasot 3,5 ja 8 %. Edellä mainittuja korkotasoja vaihdettiin Excel-taulukoon. Kuvaajista näkyi selvästi, että matalalla korkotasolla tulisi käyttää suurempia muuntajia tai paksumpia poikkipintoja. Korkealla korkotasolla asia on toisinpäin luonnollisesti eli silloin kannatta suosia pienempiä muuntajia ja ohuempia poikkipintoja.

Pitoajan tarkka arvioiminen on hankalaa verkostosuunnittelussa. Pitoajat vaihtelevat 30-50 vuoden välillä riippuen mistä komponentista on kyse. Kaapeleilla käytetään yleensä 50 vuoden pitoaikaa ja avojohdoille 30 vuoden pitoaikaa. Excel-taulukon avulla tarkasteltiin pitoajan vaikutusta häviökustannuksiin. Pitoajan vaihtelusta voi tehdä johtopäätöksen, että lyhyemmällä pitoajalla on suurempi vaikutus häviökustannuksiin. Esimerkiksi pitoajan muuttuminen 20:stä 30 vuoteen on suurempi vaikutus häviökustannuksiin kuin muutos 40:stä 50:een. Tämä johtuu siitä, että pidemmällä aikavälillä nykyarvon vaikutus on hyvin pieni.

Kuormituksen kasvun arvioiminen on kaikista vaikeinta, kun suunnitellaan uutta muuntopiiriä. Yleensä talouslaskelmissa käytetään verkkoyhtiön keskimääräistä kasvuprosenttia. Kasvuprosentilla on suuri merkitys taloudellisen poikkipinnan tai muuntajan valinnassa. Excel-taulukolla tehdyssä vertailussa 5 % kasvulla tulisi käyttää suurempia muuntajia ja paksumpia poikkipintoja. Häviökustannukset ja terminen kuormitettavuus ovat syitä, joiden vuoksi kannattaa käyttää suurilla kasvuprosenteilla kalliimpia muuntajia tai paksumpia poikkipintoja.

Häviökustannuksiin vaikuttaa suoraan häviöenergian hinta. Tällä hetkellä häviöiden hinta on noin 45 €/MWh. Excel-taulukon avulla tutkittiin miten häviöiden hinnan nousu vaikuttaa häviökustannuksiin. Viiden euron korotus tämän hetkiseen häviöiden hintaan merkitsee vajaan viiden prosentin häviökustannusten nousua. Häviöiden hinnasta voidaan todeta, että häviöillä ja häviöenergian hinnalla on suuri merkitys johtimen, muuntajan tai kaapelin taloudelliseen käyttöalueeseen.

9.5. Excel-taulukon käyttöohje

Excel-taulukko laskee automaattisesti parametrien ja kaavojen avulla taloudelliset käyttöalueet muuntajille, kaapeleille ja avojohdoille. Excel-taulukkoon tarvitsee muuttaa ainoastaan teknisiä ja taloudellisia parametreja. Tarvittavat kaavat on syötetty valmiiksi Excel-taulukoihin. Seuraavalla sivulla on esitetty kuvat 17 ja 18, minkälainen näkymä tulee muuntajan, kaapeleiden ja avojohdojen teknisistä ja taloudellisista parametreista, kun aukaisee Excel-taulukon. Taloudellisia ja teknisiä parametreja on hyvä päivittää säännöllisin väliajoin. Alla on merkitty parametrien viereen kirjaimilla, mitä tulisi muuttaa vuosittain (V) ja tarvittaessa (T). Tyhjään soluun ei tarvitse muuttaa mitään. Jos vaihdetaan kuormituksen kasvuprosenttia tai pitoaikaa, on hyvä muistaa tarkistaa myös terminen kuormitettavuus.

Taloudelliset parametrit:	
Korkokanta [%]	T
Kuormituksen kasvu [%]	T
Häviöhinta [€/kWh]	V
Vuosienergia [kWh]	T
Pitoaika [a]	T
Apukerroin [k]	
Diskonttauskerroin [k]	
Mitoitusteho [kW]	
Muuntajan kilpiarvot:	
Nimelliskuormitushäviöt [kW]	T
Tyhjäkäyntihäviöt [kW]	T
Muuntajan nimellisteho [kVA]	
Rakentamiskustannukset [€]	V

Kuva 17. Muuntajan parametrien näkymä Excel-taulukossa

Rakentamiskustannukset [€/km]	V
Resistanssi [Ω /km +40 °C]	T
Tehokerroin	T
Häviöiden hinta [€/kWh]	V
Jännite [V]	
Kuormituksen kasvu [%]	T
Korkokanta [%]	T
Apukerroin [k]	
Diskonttauskerroin [k]	
Pitoaika [a]	T
Mitoitusteho [kW]	
Vuosienergia [kWh]	T

Kuva 18. Kaapelien ja avojohtojen parametrien näkymä Excel-taulukossa

10. YHTEENVETO

Työn päätavoitteena oli laatia tekninen ja taloudellinen ohjeistus Rovakairan maastosuunnittelijoiden ja käyttöhenkilöiden käyttöön. Ohjeistuksessa painotetaan erityisesti häviökustannusten merkitystä taloudellisessa mitoittamisessa. Mitoitustehon, teknisten ja taloudellisten parametrien ja kuormitustietojen avulla laskettiin Excel-ohjelmalla häviökustannukset ja kokonaiskustannukset kaapeleille, avojohdoille ja jakelumuuntajille. Laskennassa saatujen tietojen pohjalta tehtiin kuvaajat taloudellisista käyttöalueista. Käyttöalueiden avulla voidaan valita, mitä kaapeleita, muuntajia ja avojohtoja on taloudellisesti järkevä käyttää. Myös Rovakairan tekninen ohjeisto päivitettiin nykypäivän standardien mukaiseksi.

Ohjeiston tekeminen ei sujunut ongelmitta. Tekniikan ohjeistuksen laatimisessa joutui perehtymään pien- ja suurjännitestandardeihin, jotka ovat yleisesti ottaen vaikeasti luettavia ja ymmärrettäviä. Tämän vuoksi oli oltava tarkkana, ettei ohjeistukseen tule virhetulkintoja. Taloudellisen ohjeistuksen laatimisessa ongelmat liittyivät häviöiden laskentaan. Laskennassa vaikeinta oli ymmärtää, mitä diskonttauskerrointa käytetään, kun häviökustannukset diskontataan rakentamisajankohtaan. Taloudellisten parametrien määrittämisessä oli myös ongelmia pitkien pitoaikojen vuoksi. Esimerkiksi taloudellisista parametreista häviöiden hinta oli vaikea määrittää, koska häviöenergian hinta voi vaihdella vuosittain.

Liitteen 10 kuvaajista ja Excel-taulukoista tehdyistä häviölaskelmista voidaan tehdä johtopäätöksiä komponenttien taloudellisista käyttöalueista. Kuvaajista huomaa selkeästi, että kaikkia kaapeleita, avojohtoja ja jakelumuuntajia ei ole häviökustannusten vuoksi järkevää käyttää. Maakaapelin poikkipintasarjoja on hyvä käyttää AXMK 240, -95, -50 ja -25. Keski-jännitejohdoista on suositeltavaa käyttää Sparrow, Pigeon ja AL 132. Päälystetyistä keski-jännitejohdoista taloudelliset käyttöalueet voidaan hoitaa PAS 150 ja -95. Jakelumuuntajista tulisi käyttää 50, 100, 200, 315, 500, 800 ja 1000 kVA:n muuntajakokoja. Opinnäytetyössä laskettiin kolmella eri kuormitusmallilla häviökustannukset ja tutkittiin, mikä on taloudellisin kuormitusmalli. Häviölaskelmien pohjalta häviökustannuksiltaan taloudellisin vaihtoehto saavutetaan, kun muuntaja mitoitetaan heti alussa suurimpaan suositeltavaan alkukuormaan. Pienillä muuntajilla (30 kVA-200 kVA) suositeltava alkukuorma on 0,80 kertaa muuntajan nimellistehosta ja suurilla muuntajilla (315 kVA-1000 kVA) 0,40 kertaa muuntajan nimellistehosta.

Taloudellisen ohjeistuksen lopputuloksen muodostaa Excel-taulukko, johon voidaan päivittää vuosittain tarvittavat tekniset ja taloudelliset parametrit. Parametrien ja Excel-ohjelmaan syötettyjen kaavojen avulla saadaan kuvaajat, joista näkee komponenttien taloudelliset tehoalueet. Maastosuunnittelijat voivat käyttää apunaan kuvaajia, Excel-taulukkoa ja teknistä ohjeistoa verkostosuunnittelussa. Suunnitteluohjeiston avulla maastosuunnittelijat säästävät aikaa. Esimerkiksi korkokannan muuttuessa suunnittelijat voivat päivittää Excel-taulukon ja miettiä, mikä on sillä hetkellä häviökustannuksiltaan taloudellisin vaihtoehto. Taloudellisen ohjeiston lisäksi suunnittelijat joutuvat ottamaan huomioon verkostosuunnittelussa myös Rovakairan teknisessä ohjeistossa käsiteltävät tekniset reunaehdot, jotka ovat jännitteenalenema, oikosulkukestoisuus, kuormitettavuus ja sähköturvallisuusmääräysten suojauksille määritetyt ehdot. Teknisestä ohjeistosta on myös hyötyä käyttöhenkilöille, jotka miettivät keski-jänniteverkon suojauksia. Käyttöhenkilöt voivat katsoa tarvittaessa esimerkiksi maasulkuun koskevia määräyksiä tai paljonko saa olla kosketusjännite tietyllä maasulun kestoajalla.

11. LÄHDELUETTELO

/1/ ABB:n TTT- käsikirja, Luku 7: Oikosulkusuojaus, 2000.

/2/ Aura, Lauri, Tonteri, Antti J, Sähkölaitostekniikka, 1. painos, WSOY, 1996.

/3/ Harsia, Pirkko, Johdon lämpeneminen, [WWW-dokumentti],
<<http://www.virtuaaliamk.fi/opintojaksot/030503/1132057231100/1132058075250/1132059523782/1149570994413.html>>20.5.2010.

/4/ Harsia, Pirkko, Johdon mitoitus kiinteistöverkossa, [WWW-dokumentti],
<<http://www.virtuaaliamk.fi/opintojaksot/030503/1132057231100/1132058075250/1132059523782/1149570994413.html>>20.5.2010.

/5/ Kaipia, Tero, 1000 V, Sähkönjakelujärjestelmän teknistaloudellisen kannattavuuden tarkastelu, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2004.

/6/ Konsen, Lauri, Keskipitkän aikavälin myyntiennusteen parantaminen energiayhtiössä, Tampereen teknillinen yliopisto, 2008.

/7/ Lakervi, Erkki; Partanen, Jarmo, Sähkönjakelutekniikka, Otatiето, 2008.

/8/ Mönkäre, Sinikka, Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös, (491/1998), Helsinki, 31.10.2000.

/9/ Mörsky, Jorma, Relesuojaustekniikka, 1.painos, Otatiето, 1992.

/10/ Parikka, Jukka, Verkkoinisinöörin haastattelu, Rovaniemi, 24.9.2010.

/11 / Peijariniemi, Ville, Haja-asutus -ja maaseutualueiden pienjänniteverkon rakentamisen ja saneeraamisen yhdenmukaistaminen, Tampereen ammattikorkeakoulu, 2007.

/12/ Rakennusten lämmitysenergian kulutuksen normitus, [pdf-dokumentti],
<http://www.motiva.fi/files/2840/Rakennusten_lammitysenergiankulutuksen_normitus.pdf>21.7.2010.

/13/ Rouhiainen, Jukka, Maasulkuvirtojen kehitys ja kompensointi Haminan Energia Oy:n keskijänniteverkossa, 2008.

/14/ Rovakairan Vuosikertomus, 2009.

/15/ Seppälä, Anssi, Tyypikäyrämenettelyn laskentaohje, [www-dokumentti],
<http://www.energia.fi/content/root%20content/energiateollisuus/fi/s%C3%A4hk%C3%B6/s%C3%A4hk%C3%B6kauppa/ediel-sivut/ohjeet%20ja%20suositukset/liitteet/tyypik%C3%A4yr%C3%A4menettelyn%20laskentaohje_enease.pdf?SectionUri=%2Ffi%2Fsahko%2Fsahkokauppa%2Fediel-sivut%2Fohjeetjasuositukses>21.7.2010.

/16/ SFS-käsikirja 600, Pienjänniteasennukset ja sähkötyöturvallisuus, 1. painos, Suomen standardisoimisliitto SFS ry, 2007.

/17/ SFS-käsikirja 601, Suurjänniteasennukset ja ilmajohdot, 1. painos, Suomen standardoimisliitto SFS ry, 2009.

/18/ Simonen, Martti, Sähkönjakeluverkon suunnitteluperusteet, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2006.

/19/ Sorsa, Hannu, Sähköverkkoyhtiön keskijänniteverkon kehittämissuunnitelma, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2004.

/20/ Tella, Mikko, Sähköverkkoyhtiön keskijänniteverkon kehittämissuunnitelma, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2007.

/21/ Verkostosuositus SA 4:09, kaapeloitujen pj-liittymisjohtojen mitoitus ja suojaus, Energiateollisuus ry, Helsinki, 2009.

/22/ Verkostosuositus SA 5:94, Keskijänniteverkon sähköinen mitoittaminen, Energiateollisuus ry, Helsinki, 2003.

/23/ Verkostosuositus SA 2:08, Pienjänniteverkon ja jakelumuuntajan sähköinen mitoittaminen, Energiateollisuus ry, Helsinki, 2003.

12. LIITELUETTELO

LIITE 1	Korjauskertoimet maa-asennukselle
LIITE 2	Pienjännitekaapelien kuormitettavuudet
LIITE 3	AMKA-johtojen kuormitettavuudet
LIITE 4	KJ-avojohtojen kuormitettavuudet, resistanssit ja reaktanssit
LIITE 5	Lämmitystarveluvut eri paikkakunnalle
LIITE 6	Verkkokomponenttien yksikköhinnat
LIITE 7	Muuntajien tekniset arvot
LIITE 8	Pienjännitekaapelien ja AMKA-johtojen tekniset arvot
LIITE 9	Kuormitustiedot
LIITE 10	Esimerkkikuvaajat
LIITE 11	Esimerkkilaskut