

## OYS:n keskijänniteverkon nykytilanteen kartoitus

Jari Tolonen

Teollisuuden ja luonnonvarojen osaamisalan opinnäytetyö  
Sähkövoimatekniikka  
Insinööri (AMK)

KEMI 2014

## ALKUSANAT

Haluan kiittää Sauli Kurttilaa mielenkiintoisesta opinnäytetyön aiheesta ja opastuksesta OYS:n verkkoon. Kiitän myös DI Jaakko Ettoa Lapin ammattikorkeakoulusta erinomaisesta opastuksesta ja lisäksi myös muita henkilöitä, jotka edesauttoivat työni valmistumista.

Olhavassa 27.3.2014

Jari Tolonen

## TIIVISTELMÄ

LAPIN AMMATTIKORKEAKOULU, Teollisuuden ja luonnonvarojen osaamisala

Koulutusohjelma:	Sähkötekniikan koulutusohjelma
Opinnäytetyön tekijä(t):	Jari Tolonen
Opinnäytetyön nimi:	OYS keskijänniteverkon nykytilan kartoitus
Sivuja (joista liitesivuja):	121 (18)
Päiväys:	27.3.2014
Opinnäytetyön ohjaaja(t):	DI Jaakko Etto Sairaalainsinööri Sauli Kurttila
<p>Opinnäytetyön toimeksiantaja oli Pohjois-Pohjanmaan Sairaanhoidopiiri ja kohteena oli OYS:n 20 kV:n jakeluverkko. OYS:n keskijänniteverkko on rakennettu 1970-luvulla, eikä siihen ole tehty sen jälkeen suuria muutoksia. Aihe oli ajankohtainen, koska sairaalan ja keskijänniteverkon saneerausohjelma on alkamassa.</p> <p>Opinnäytetyössä käsiteltiin keskijänniteverkossa käytössä olevia komponentteja, esimerkiksi katkaisijoita ja kiskojärjestelmiä. Opinnäytetyössä tutustuttiin sähköjakeluverkon rakenteeseen, selvitettiin ja tarkistettiin kojeistojen komponenttien sekä verkon kaapelointien sähkötekniset ominaisuudet.</p> <p>Suojauksien tarkistusta varten laskettiin jakeluverkon vikavirrat ja kaapelien kuormitettavuus. Opinnäytetyössä tarkistettiin verkon komponenttien kestoisuus eri vikatilanteissa, suojauksien toimivuus sekä selektiivisyys. Opinnäytetyössä tarkasteltiin myös kojeistojen ja kaapeliyhteyksien kuormitettavuus normaalikytkennöissä ja eri poikkeustilanteissa.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena saatiin laskettua keskijänniteverkon vikavirrat ja selvitettiin, että verkko on suojattu oiko- ja maasuluilta. Eri kuormitustilanteiden ja ylikuormitettavuuden osalta jatkotarkastelu olisi tarpeellista. Kojestot ja muuntajat on tarpeellista uusien käyttövarmuuden, iän sekä tilojen saneeraustarpeen takia. Silmukaverkon kuormitettavuus on hyvä. Tuloksena syntyi myös teknisiä taulukoita sekä esitetään päätelmät sähköverkon nykytilanteesta ja saneerauksessa huomioitavista tekijöistä.</p>	
Asiasanat: sähköjakelu, relesuojaus, kaapelointi	

## ABSTRACT

LAPLAND UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES, Industry and natural resources

Degree programme:	Electrical Engineering
Author(s):	Jari Tolonen
Thesis title:	Survey of the Current State of OYS Medium Voltage Network
Pages (of which appendixes):	121 (18)
Date:	27 March 2014
Thesis instructor(s):	Jaakko Etto, MSc (EI.eng) Sauli Kurttila, Hospital Engineer
<p>This thesis was made for NOHD and focus was on evaluating 20 kV's distribution of University hospital of Oulu. The medium voltage network of University hospital of Oulu was built in the 1970's and major changes have not been made after that. This issue is topical because renewal work of both the hospital and the medium voltage network of the hospital are starting in the near future.</p> <p>This thesis deals with the components used in the medium voltage network for example the circuit breakers and busbar systems. In the thesis, the structure of the distribution network was got acquainted with and the electrical characteristics of the components in the apparatuses as well as of the cabling in the electricity network were clarified and checked. For the inspection of the protection the fault currents in the distribution network and the load of the cables were calculated.</p> <p>In addition, the withstand of the electricity network components in various fault conditions, their security, functionality and selectivity were studied. The thesis also examined the apparatuses and the cable connections and their load capacity in the normal connections and in the different exceptional situations.</p> <p>In this study, the fault current of the distribution network was calculated and it was clarified that electricity network is protected from short circuits and earth faults. The different power loading and the overloading situations should be investigated further. The apparatuses and transformers need to be updated due to their reliability, age and the renovation needs. Meshed network loading capacity was good. The technical tables are also the results of this thesis and there are conclusions drawn according to the current situation in the electricity network as well as the facts to be paid attention to during the renovation.</p>	
Keywords: electricity supply, relay protection, cabling.	

## SISÄLLYS

ALKUSANAT.....	2
TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT .....	4
SISÄLLYS .....	5
KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET .....	8
1 JOHDANTO.....	9
2 OYS.....	10
3 VERKON RAKENNE .....	11
3.1 Lainsäädäntö ja määräykset .....	11
3.2 Rengasverkko.....	14
3.3 Silmukoitu verkko.....	15
3.4 Säteittäinen verkko .....	16
4 KESKIJÄNNITEKOJEET .....	17
4.1 Kojeistot.....	17
4.2 Katkaisijat .....	19
4.2.1 Ilmakatkaisijat .....	20
4.2.2 Vähäöljykatkaisijat .....	20
4.2.3 SF <sub>6</sub> -katkaisija.....	21
4.2.4 Tyhjiökatkaisijat .....	22
4.2.5 Erottimet .....	23
4.3 Kiskot.....	24
4.3.1 Yksikiskojärjestelmä .....	24
4.3.2 Kaksikiskojärjestelmä.....	25
5 MUUNTAJAT .....	27
5.1 Tehomuuntajat .....	28
5.2 Mittamuuntajat.....	29
5.3 Muuntajien laskentakaavat. ....	31
6 KESKIJÄNNITEKAAPELIT .....	33
7 RELESUOJAUS .....	35
7.1 Suojareleet .....	35
7.1.1 Sähkömekaaniset releet .....	35
7.1.2 Staattiset releet.....	35

7.1.3	Numeeriset releet.....	36
7.1.4	Ylivirtarele.....	37
7.1.5	Differentiaalirele.....	38
7.1.6	Nollavirtarele.....	39
7.1.7	Maasulun suuntarele.....	39
7.1.8	Jännitereleet.....	40
7.2	Yli- ja alijännitesuojaus.....	40
7.3	Selektiivisyys.....	41
8	VIKAVIRTUALASKENTA.....	43
8.1	Oikosulkulaskenta.....	43
8.1.1	Thevenin menetelmä.....	44
8.2	Oikosulkukestoisuus.....	48
8.3	Maasulkulaskenta.....	50
8.3.1	Maasta erotetun verkon vikavirran laskenta.....	51
8.3.2	Kaksoismaasulku.....	55
8.3.3	Maadoitusjännite ja kosketusjännite.....	56
9	OYS:N SÄHKÖVERKKO.....	58
9.1	Pääsyöttösuunta pääkytkinlaitoksen kautta (normaalikäyttö).....	59
9.2	Varasyöttösuunta pääkytkinlaitoksen kautta.....	60
9.3	Erittäin harvinainen poikkeustilanekäyttö muuntamon M6 kautta.....	61
9.4	Tulevaisuuden suunnitelmat.....	62
10	OIKOSULKUPIIRIN IMPEDANSSIT.....	63
10.1	Syöttävät verkot.....	63
10.2	Muuntajat.....	63
10.3	Kaapelit.....	64
11	VIKAVIRRAT.....	67
11.1	Oikosulkuvirrat.....	67
11.1.1	Pääsyöttösuunta pääkytkinlaitoksen kautta.....	67
11.1.2	Varasyöttösuunta pääkytkinlaitoksen kautta.....	69
11.1.3	Syötön tullessa kojeiston M6 kautta.....	70
11.1.4	Dynaaminen ja terminen kestoisuus.....	72
11.1.5	Oikosulkuvirrat pienjännitemuuntajissa.....	72
11.2	Maasulkuvirrat.....	73
11.2.1	Pääsyöttösuunta.....	75
11.2.2	Varasyöttösuunta.....	76

11.2.3	Pääsyöttösuunta M6-kojeiston kautta.....	77
11.2.4	Sallitut kosketusjännitteet.....	78
12	KAAPELIEN KUORMITETTAVUUS.....	79
13	RELESUOJAUS.....	82
13.1	Oikosulkusuojaus.....	82
13.1.1	Jakelumuuntajan oikosulkusuojaus.....	82
13.1.2	Kojeistojen oikosulkusuojaus.....	83
13.1.3	Kaapeliyhteyksien ylivirta- ja oikosulkusuojaus.....	84
13.1.4	Suojaustoiminnot.....	85
13.2	Maasulkusuojaus.....	87
13.3	Yli ja alijännitesuojaus.....	88
13.4	Muuntajan suojaus.....	88
13.5	Selektiivisyys.....	88
14	POHDINTA.....	90
	LÄHTEET.....	92
	LIITTEET.....	93

## KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

OE	Oulun Energia
OYS	Oulun yliopistollinen sairaala
PKL	pääkytkinlaitos
X	katkaisija
-----	kisko
-	erotin



## 1 JOHDANTO

Häiriöttömän sähköenergian saannin varmistaminen ja sähkön laadun kasvavat vaatimukset luovat energiaa jakavalle ja suojaavalle järjestelmälle vaatimuksia. Sähköenergian saannin keskeytyminen laitoksilla tai tuotantoprosesseissa voi aiheuttaa taloudellisia tai jopa henkilövahinkoja. Hyvällä relesuojauksella poistetaan viat mahdollisimman nopeasti ja rajoitetaan vian vaikutukset mahdollisimman pienelle alueelle.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää ja tutkia OYS:n keskijänniteverkkoa ja sen suojausta ja kartoittaa verkon nykytilannetta. Aihe oli ajankohtainen, koska sairaalan ja keskijänniteverkon saneerausohjelma on alkamassa. Opinnäytetyössä käsitellään myös keskijänniteverkossa käytössä olevia komponentteja esimerkiksi katkaisijoita ja kiskojärjestelmiä.

Opinnäytetyön toimeksiantaja oli Pohjois-Pohjanmaan Sairaanhoidopiiri ja kohde oli OYS:n 20 kV:n jakeluverkko. OYS:n keskijänniteverkko on rakennettu 1970-luvulla, eikä siihen ole tehty sen jälkeen suuria muutoksia. Opinnäytetyössä tutustutaan verkon rakenteeseen ja lasketaan sähköverkon impedanssit eri vikatilanteiden laskentaa varten. Suojauksien tarkistusta varten lasketaan jakeluverkon vikavirrat ja kaapelien kuormitettavuus. Opinnäytetyössä tarkistetaan myös verkon komponenttien kestoisuus eri vikatilanteissa ja suojauksien toimivuus sekä selektiivisyys. Opinnäytetyössä tarkasteltiin myös kojeistojen ja kaapeliyhteyksien kuormitettavuus normaalikytkennöissä ja eri poikkeustilanteissa.

Opinnäytetyö rajattiin koskemaan OYS:n keskijännitesilmukkaverkkoa. Opinnäytetyön tavoitteena oli tutustua sähköverkon rakenteeseen ja dokumentaatioon sekä selvittää verkon komponenttien tyypit, nimellisvirrat ja oikosulkukestoisuudet. Opinnäytetyössä tarkastettiin myös suojauksien toimivuus ja selektiivisyys sekä esitetään päätelmät sähköverkon nykytilanteesta ja saneeraukseen huomioitavista tekijöistä.

## 2 OYS

Oulun yliopistollisen keskussairaalan rakennustyöt aloitettiin 1968. Presidentti Urho Kekkonen muurasi peruskiven joulukuussa samana vuonna. Rakennustyöt valmistuivat vaiheittain 1975. Oulun yliopistollinen keskussairaala aloitti toimintansa 1973 ja se vihittiin käyttöön 1976. (Manninen 1995, 186.)

Oulun yliopistollinen sairaala huolehtii Pohjois-Pohjanmaan alueen erikoissairaanhoidosta ja koko Pohjois-Suomen erityistason sairaanhoidosta. Pohjois-Pohjanmaan, Länsi-Pohjan, Keski-Pohjanmaan ja Lapin sairaanhoitopiirit sekä Kainuun sosiaali- ja terveydenhuollon kuntaryhmä kuuluvat OYS:n erityistason alueeseen (kuva 1). Lääketieteen kaikki erikoisalajat ovat edustettuina Oulun yliopistollisessa sairaalassa. (PPSHP:n www-sivut 2014, hakupäivä 14.1.2014.)



**Kuva 1.** OYS:n erityistason sairaanhoidon vastuualue (PPSHP:n www- sivut 2014, hakupäivä 14.1.2014)

### 3 VERKON RAKENNE

#### 3.1 Lainsäädäntö ja määräykset

SFS-6001standardissa on annettu yli 1 kV:n vaihtojännitteisten sähköasennusten suunnittelua ja rakentamista koskevat vaatimukset. Standardit koskevat myös käytössä olevien suurjänniteasennusten muutos-, korjaus- ja laajennustöitä. Standardi ei ole taannehtiva, vaan käytössä olevia asennuksia saa edelleen käyttää, jos ne täyttävät rakentamisajankohdan voimassa olleet määräykset eikä asennusten käytöstä aiheudu vaaraa.

Sähköturvallisuuslakia 14.6.1996/410 sovelletaan laitteisiin ja laitteistoihin, joita käytetään sähkön tuottamisessa, siirrossa, jakelussa tai käytössä. Laissa määritellään esimerkiksi seuraavasti: Sähkölaitteet ja laitteistot on suunniteltava, rakennettava, valmistettava ja korjattava sekä huollettava ja käytettävä niin, että niistä ei aiheudu hengelle, terveydelle tai omaisuudelle vaaraa. Ne eivät saa aiheuttaa sähköisesti tai sähkömagneettisesti kohtuutonta häiriötä. Niiden toiminta ei saa häiriintyä helposti sähköisesti tai sähkömagneettisesti. (SFS 6002 2012, 9.)

”Sähkölaitteisto saadaan ottaa käyttöön vasta, kun käyttöönottotarkastuksessa on selvitetty, ettei siitä aiheudu 5§:ssä tarkoitettua vaaraa tai häiriötä.” (SFS 6002 2012, 10.)

Sähkölaitteiston haltijalle tulee laatia käyttöönottotarkastuksesta tarkastuspöytäkirja tietyin poikkeuksin, jotka luetellaan 5.7.1996/517 päätöksessä. (SFS 6002 2012, 35.)

Sähkölaitteistot jaetaan kolmeen luokkaan (1, 2 ja 3) ja näissä oleviin alaluokkiin (A, B ja C). Sähkönjakeluverkko kuuluu luokkajaon perusteella luokkaan 3 C. Sähkölaitteistolle on käyttöönottotarkastuksen lisäksi tehtävä varmennustarkastus, kun kyseessä on luokan 1 - 3 laitteisto. Muutamissa tapauksissa varmennustarkastusta ei välttämättä tarvitse suorittaa. Varmennustarkastus on suoritettava ”verkonhaltijan kalenterivuoden aikana rakennetuille sähköverkoille seuraavan kalenterivuoden kuluessa.” (SFS 6002 2012, 35 - 36.)

Laissa 1996/517 määrätään sähkölaitteistojen käytöstä ”sähkölaitteistojen haltijan on huolehdittava siitä, että laitteiston kuntoa ja turvallisuutta tarkkaillaan ja että havaitut puutteet ja viat poistetaan riittävän nopeasti.” (SFS 6002 2012, 36.)

Lain 1996/410 mukaan ”ministeriö voi määrätä, että tietynlaiset sähkölaitteistot on huollettava määrävälein sekä säännöllistä huoltoa vaativien laitteistojen hoitoa varten on ennalta laadittava huolto- ja kunnossapito-ohjelma.” Sähköturvallisuuden ylläpitävä kunnossapito-ohjelma on laadittava luokkien 2 ja 3 sähkölaitteistoille. (SFS 6002 2012, 11 - 35.)

Määräaikaistarkastus on tehtävä luokan 3 sähkölaitteille viiden vuoden välein. Tarkastuksen voi suorittaa valtuutettu tarkastaja, mutta 3 A kohdassa tarkoitetuille sähkölaitteistoille vain valtuutettu laitos. (SFS 6002 2012, 37.)

Sähkölaitteiston haltija on velvollinen suorittamaan kuntotarkastuksia riittävän usein. Kuntotarkastuksen suoritusstiheyteen vaikuttaa valmistajan ohjeet, laitteiston ikä ja asennuspaikan kriittisyys. SENER:n verkkosuosituksessa TA 1:97:ssä on suosituksia aikoihin, jos muuten ei löydy luotettavaa menetelmää tiheyden määrittämiseen, seuraavasti:

- kuntotarkastus kolmen vuoden välein suurjänniteavojohdoille ja ulkokytkinlaitoksille, samalla suoritetaan kuntotarkastus suojareleistyksille ja maadoitusjohtimille
- kuntotarkastus kuuden vuoden välein keskijänniteilmajohdoille, muuntamoille, samalla suoritetaan kunnontarkastus sisäkytkinlaitoksille ja maadoitusjohtimille
- kunnontarkastus ilman itse valvontaa kolmen vuoden ja itse valvonnalla kuuden vuoden välein suurjännite- ja keskijänniteverkkojen ylivirta- ja maasulkusuojauksien suojareleille.
- kunnontarkastus kuuden vuoden välein pienjänniteverkkoille (mukaan lukien ulkovalaistusverkot) ja jakokeskuksille, samalla suoritetaan kunnontarkastus ylivirta- ja maasulkusuojauksille
- kunnontarkastus mittaus (maadoitusimpedanssin) kuuden vuoden välein kun maadoitus yhden maadoitusjohtimen varassa ja 12 vuoden välein jos maadoitusjohtimia useampia. (SENER verkostosuositus TA 1:97.)

Kauppa ja teollisuusministeriö on antanut turvallisuutta koskevat viranomaismääräykset päätöksessä 1193/1999 sähkölaitteistojen turvallisuudesta. Turvallisuusvaatimukset täyttyvät, jos laitteistot täyttävät kansainväliset IEC- ja CENELEC- standardeissa asetet-

tut vaatimukset. Luettelo olennaisia turvallisuusvaatimuksia vastaavista standardeista S10-2000 (TUKES 2000.)

SFS-6000 standardissa on enintään 1 kV:n sähköasennuksia koskevat vaatimukset. Tavallisten sähköasennusten lisäksi sähköasemat, johdot, laitteet, johtojärjestelmät, ohjauslaitteet, maadoitukset ja sähkötilan ympäristöstä erottavat aidat ja rakennukset luetaan kuuluviksi sähköasennuksiin.

Suomessa sähköverkko jaetaan käytetyn jännitetason perusteella siirto ja jakeluverkkoihin. Siirtoverkkojen jännite on 400, 220 tai 110 kV. Siirtoverkoista ja sähköasemista muodostuu koko maan kattava kantaverkko. Kantaverkko on yhteydessä Ruotsin, Venäjän ja Norjan sähköverkkoihin, mikä mahdollistaa tuonnin ja viennin eri maiden välillä.

Kantaverkosta siirretään sähköä jakeluverkkoon alueverkkojen kautta. Alueverkon jännite on yleensä 110 kV. Paikalliset sähköyhtiöt omistavat yleensä alueverkon. Jakeluverkoilla siirretään sähköä pienille ja keskisuurille sähkönkäyttäjille. Jakeluverkot voidaan jakaa keski- ja pienjänniteverkkoon. Suomessa yleensä keskijänniteverkon jännite on 20 kV toisin paikoin kaupunkien keskustoissa myös 10kV ja pienjänniteverkon 400 V. (Lakervi & Partanen 2008, 11.)

Suomessa sähköä siirretään kolmivaiheista vaihtosähköjärjestelmää käyttäen, jossa on kolme vaihejohtoa. Pienjänniteverkossa on lisäksi nollajohto ja kuorma kytketään usein sen ja vaiheen väliin tai vaiheiden väliin. Taajuus on Suomessa 50 Hz.

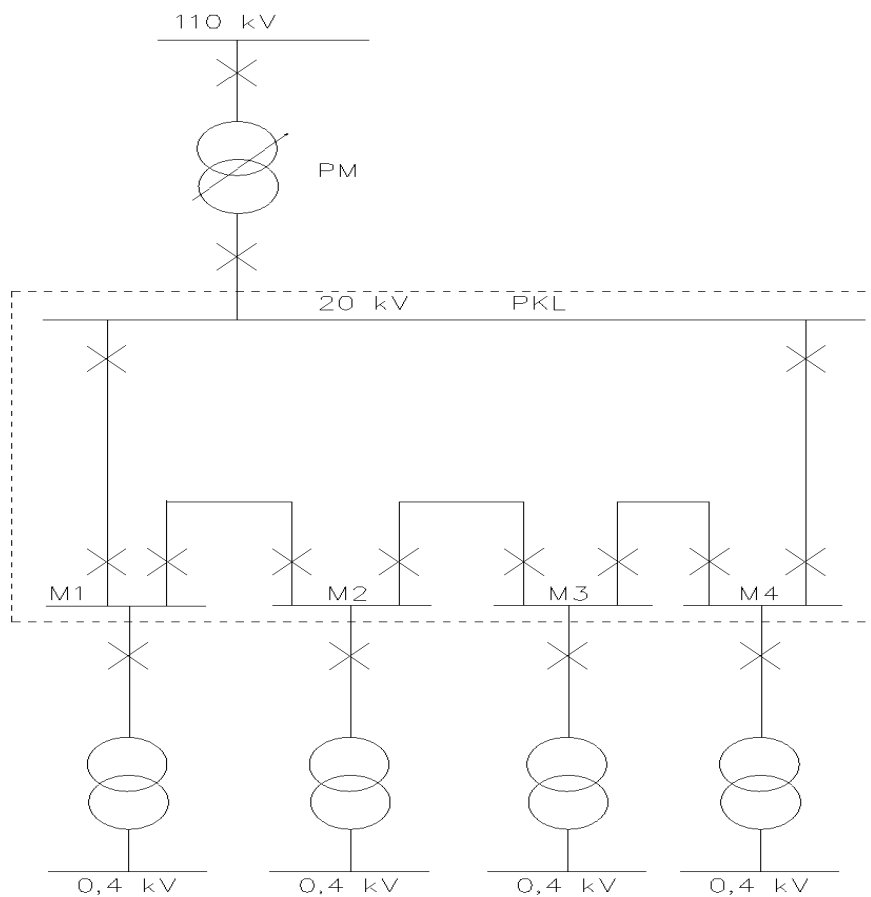
Kolmivaihejärjestelmässä puhutaan kahden vaiheen välisestä nimellisjännitteestä. Pienjänniteverkossa kuluttajalla tämä on 400 V. Vaiheen ja maan välinen vaihejännite saadaan jakamalla nimellisjännite  $\sqrt{3}$  :a. Vaihejännitteeksi saadaan näin 230 V.

Sähköverkko voidaan rakentaa rengasverkoksi, silmukoiduksi tai säteittäiseksi. Verkon tehtävänä on siirtää sähkötehoa. Tehon pysyessä samana jännitteen nosto pienentää virtaa, josta seuraa häviöiden pieneneminen. Verkostotyypeillä on omat etunsa ja haittansa. (Lakervi & Partanen 2008, 11 - 13.)

Kantaverkko rakennetaan ja käytetään yleensä rengasverkkona. Siirto- ja keskijänniteverkot rakennetaan rengasverkoiksi mutta käytetään avoimena. (Lakervi & Partanen 2008, 13.)

### 3.2 Rengasverkko

Rengasverkkoa käytetään yleensä suurilla jännitteillä. Kuviossa 1 on esitetty pistekatkosuurakulmion sisällä 20 kV:n rengasverkko. Päämuuntaja syöttää pääkiskoa, johon liittyy 20 kV:n rengasverkko.

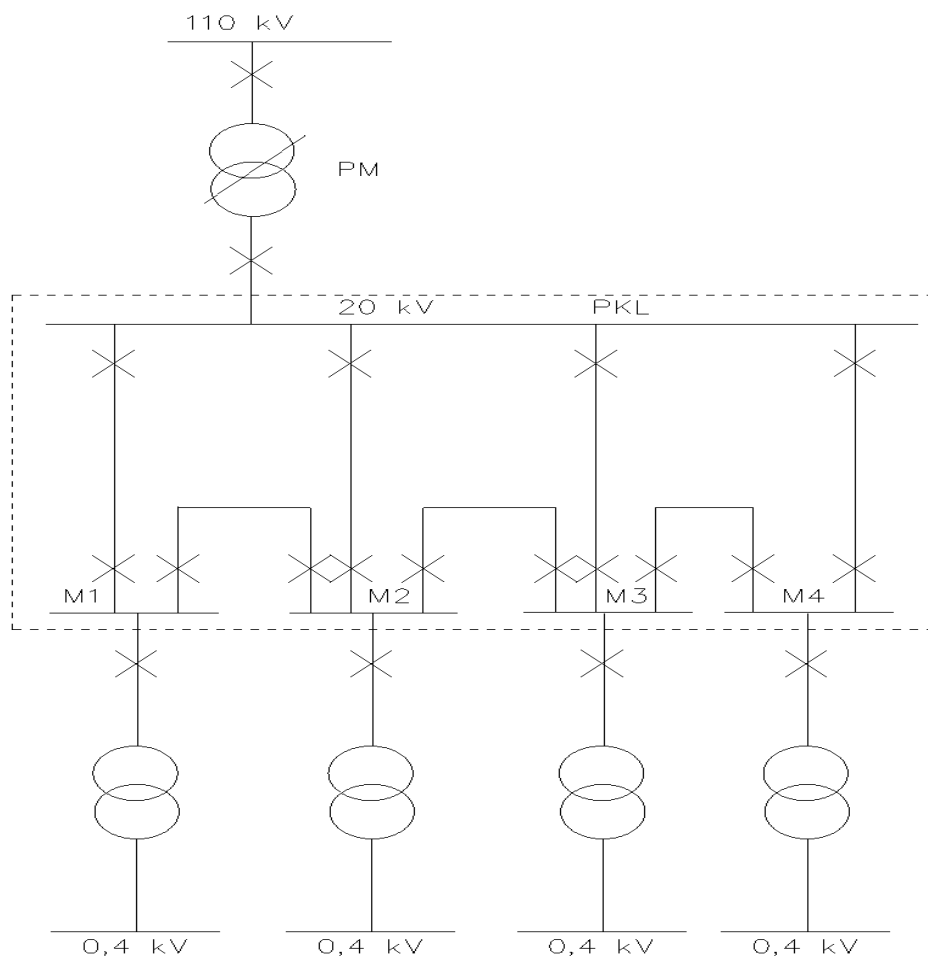


**Kuvio 1. Rengasverkon toteutuksen periaate**

Rengasverkossa syöttö on varmistettu. Jännitevakavuus on parempi ja tehohäviöt pienemmät kuin säteittäisessä verkossa. Oikosulkuvirrat ovat suuremmat kuin säteittäisessä verkossa. Suojaus on vaikeampaa ja kalliimpaa kuin säteittäisessä verkossa.

### 3.3 Silmukoitu verkko

Silmukoidussa verkossa rengasverkkoon on lisätty renkaan sisäisiä väliyhteyksiä. Kuviossa 2 on esitetty pistekatkosuorakulmion sisällä 20 kV:n silmukoitu verkko. Päämuuntaja syöttää 20 kV:n pääkiskoa, johon liittyy silmukoitu verkko.

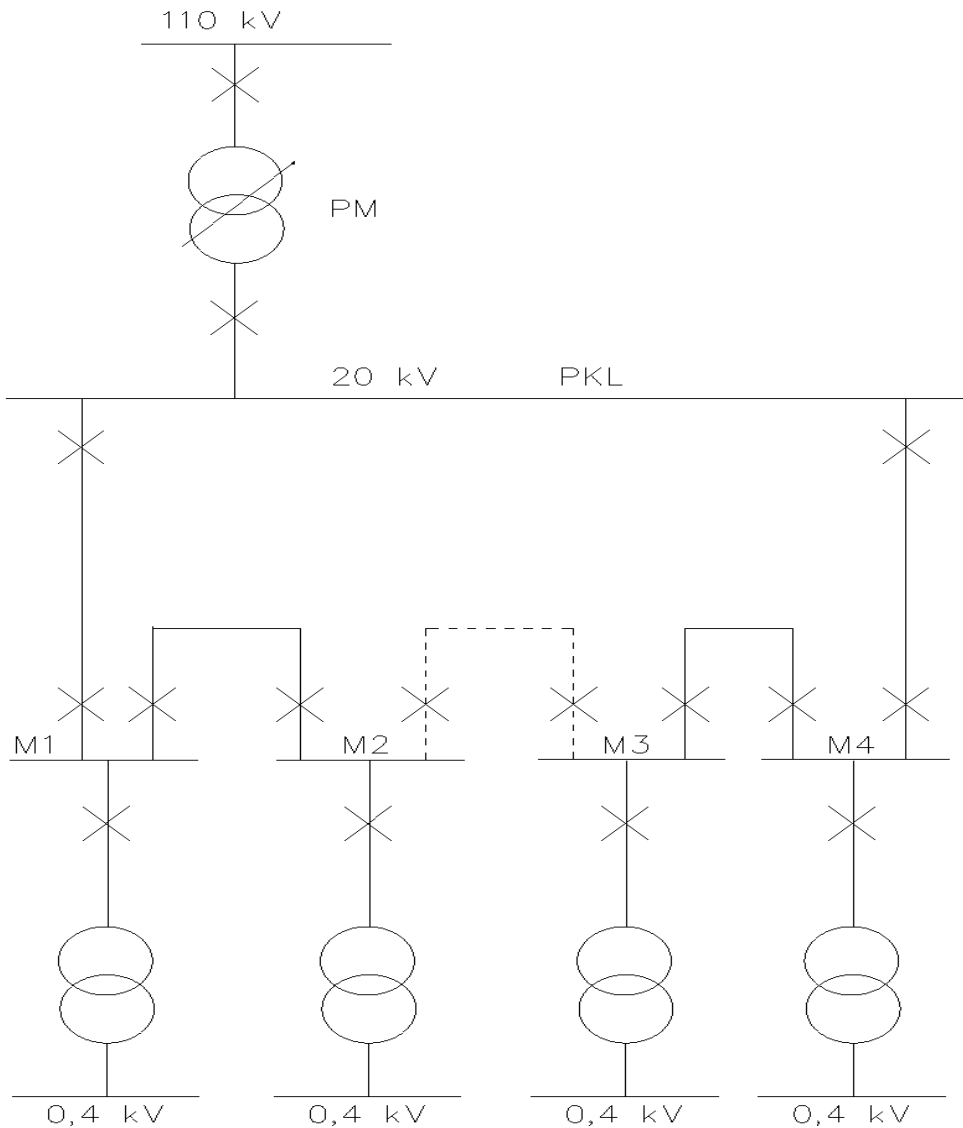


**Kuvio 2. Silmukoidun verkon toteutuksen periaate**

Silmukoidussa verkossa syöttöjen varmistuksia on lisätty. Jännitevakavuus paranee, tehohäviöt pienenevät ja oikosulkuvirrat kasvavat. Suojaus vaikeutuu ja kallistuu. Keski-jännitteellä hyvin harvinainen toteutustapa.

### 3.4 Säteittäinen verkko

Säteittäisessä verkossa verkko on rakennettu säteittäin kuten kuviossa 3. Päämuuntaja syöttää pääkiskoa, johon liittyy säteittäisiä verkkoja. Katkoviivalla on esitetty johdinyhteys normaalisti auki katkaisijalta.



**Kuvio 3. Säteittäisen verkon toteutuksen periaatekuva**

Verkko on selkeä ja suojausten toteutus helpointa ja syöttöä ei ole varmistettu. Suomessa tämä on yleisesti käytetty rakennustapa keski- ja pienjännitteellä. Nykyään on yleistynyt keskijännitteellä rakennustapa, jossa rakennetaan verkko renkaaksi mutta käytetään säteittäisesti.



## 4 KESKIJÄNNITEKOJEET

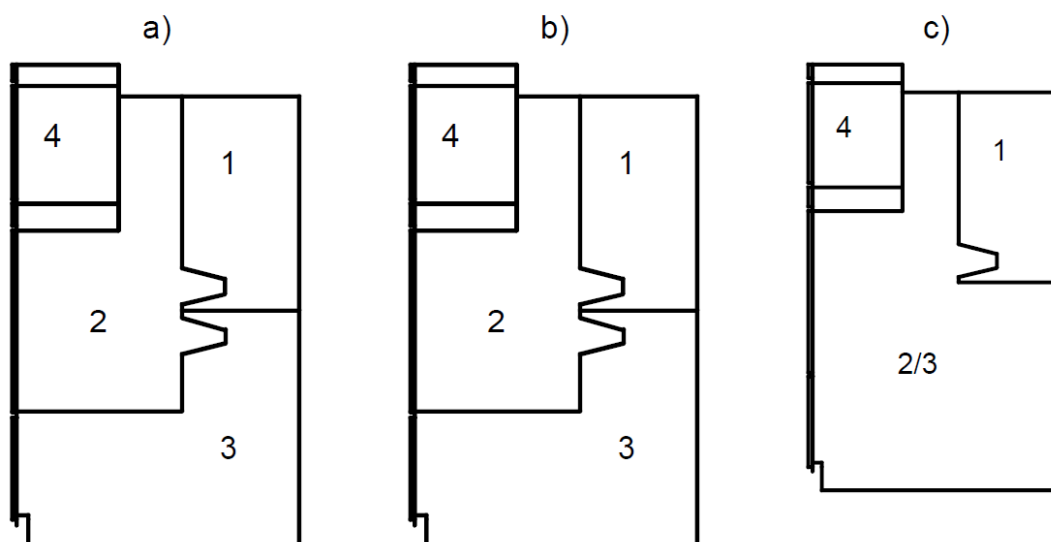
### 4.1 Kojeistot

Rakennekokonaisuus, joka sisältää kaikki tarvittavat kytkentä-, suojaus-, ohjaus- ja valvontalaitteet. Kojeistolta edellytetään käyttövarmuutta, henkilöturvallisuutta, hyvää käytettävyyttä ja huoltovapautta. Jakelujärjestelmässä suojausjärjestelmä ja kojeisto muodostavat yhdessä toimivan kokonaisuuden. Pienjänniteverkossa kojeistoa kutsutaan jakokeskukseksi. (Elovaara & Haarla 2011, 117.)

Kojeistoilla tarkoitetaan yleensä tehdasvalmisteista kokonaisuutta, joka sisältää sähkön siirrossa muuntamisessa tai muuttamisessa tarvittavia suoja-, kytkin-, valvonta- ja ohjauslaitteita. Kojeistoja on ulko- ja sisäkäyttöön. Niitä tehdään avorakenteisina sekä koteloituina. Käytetty eriste on nykyisin myös keskeinen kojeiston luokitteluperuste. (Elovaara & Haarla 2011, 76, 117.)

Kehitys on kulkenut keskijänniteverkossa avoimista rakenteista kohti suljettuja rakenteita. Nykyisin rakennettavat sisäkojeistot ovat koteloituja keskuksia tai kytkinlaitoksia ilma- tai SF<sub>6</sub> eristeellä. Ulkokuoren perusteella kojeistot ryhmitellään metallikuorisiin tai eristysainekuorisiin. Nykyään valtaosa jakelukojeistoista on metallikuorisia. Metallikuoriset jaotellaan sisäisen osastoinnin ja toteutuksen perusteella seuraavasti kenno-, metalli- ja tilakoteloitu. (Elovaara & Haarla 2011, 120.)

Kennokoteloidussa kojeistossa ensiökojeiden osastointia ei vaadita, edes kennojen välillä. Mutta tavallisesti kokoojakiskosten päälle omiin kennoihin ja tiloihin erotellaan toisiokojeet, katkaisijat, mittamuuntajat ja kaapelinpäätteet. Kuviossa 4 erilaisia kojeistotyyppisiä. (ABB:n www-sivut 2014, hakupäivä 5.1.2014.)



**Kuvio 4. Kojeistotyypit a) metallikoteloitu b) tilakoteloitu ja c) kennokoteloitu . 1 on kokoojatila, 2 on katkaisijatila, 3 on lähtötila ja 4 on toisiokojetila (ABB:n www-sivut 2014, hakupäivä 5.1.2014)**

Metallikoteloitussa kojeistossa kokoojakiskot, toisiokojeet, katkaisijat ja kaapelinpäätteet ovat omissa tiloissaan. Tilojen väli on maadoitettua metallia ja läpivienneissä katkaisijalta kiskoihin on sulkulevyt jotka ohjautuvat automaattisesti esim. vaunun liikkeestä. Kuvio 4a on metallikoteloitu kojeisto. (ABB:n www-sivut 2014, hakupäivä 5.1.2014.)

Tilakoteloitussa kojeistossa kokoojakiskot, toisiokojeet, katkaisijat ja kaapelinpäätteet ovat omissa tiloissaan. Tilojen väli on kokonaan tai osittain eristysaineinen. Kuviossa 4b on tilakoteloitu keskijännitekojeisto. (ABB:n www-sivut 2014, hakupäivä 5.1.2014.)

Kojeistoja on ilmaeristeisiä tai kaasueristeisiä. Ilmaeristeisessä eristysaineena käytetään pääasiallisena normaalia ilmaa. Käytettäessä eristysaineena eristyskaasua, joka on eri paineessa kuin normaali ilmanpaine, puhutaan kaasueristeisistä kojeistoista. (ABB:n www-sivut 2014, hakupäivä 5.1.2014.)

Kalustustavan perusteella kojeisto ryhmitellään ulosvedettäviin tai kiinteällä kalustuksella oleviin kojeistoihin. Ulosvedettävässä eli vaunukojeistossa kennon kytkinlaite on sijoitettu liikkuvaan vaunuun, joka vedettäessä ulos saa aikaan luotettavan avausvälin virtapiiriin. Kiinteällä kalustuksella kojeet on asennettu kiinteästi kennorakenteisiin ja kiskostoihin. (ABB:n www-sivut 2014, hakupäivä 5.1.2014.)

## 4.2 Katkaisijat

Katkaisijoita käytetään virtapiirin avaamiseen ja sulkemiseen niitä voidaan ohjata käsin tai automaattisesti. Yleensä katkaisijan toimintaa ohjaa suojarole, joka esimerkiksi ylivirran tai maasulun vaikutuksesta avaa katkaisijan. Suojarele on kytketty virtapiiriin mittamuuntajien avulla. ( Elovaara & Haarla 2011,162 - 163.)

Katkaisijan on kyettävä avaamaan virtapiirin suurin mahdollinen virta ja kytkemään nimellisjännitteinen virtapiiri oikosulkuun. Koskettimien avautuessa virta ei katkea heti vaan pysyy suljettuna valokaaren välityksellä. Valokaari sammuu sitä ympäröivällä sammutusväliaineella. Katkaisijat luokitellaan väliaineen perusteella seuraavasti:

- ilmakatkaisijat
- öljykatkaisijat
- vähäöljykatkaisijat
- paineilmakatkaisijat
- SF<sub>6</sub>-katkaisijat
- tyhjökatkaisijat ( Korpinen www-sivut, hakupäivä 20.12.2013.)

Vähäöljy, SF<sub>6</sub>- ja tyhjökatkaisijat ovat yleisimmin käytössä.

Katkaisijan valintaan vaikuttavia seikkoja ovat

- kuormituksen laatu ja suurin jatkuva virta
- suurin käyttöjännite
- suurin oikosulkuvirta ja sen kesto
- taajuus
- ympäristöolosuhteet
- mekaaniset mitat ( Elovaara & Haarla 2011, 162.)

#### 4.2.1 Ilmakatkaisijat

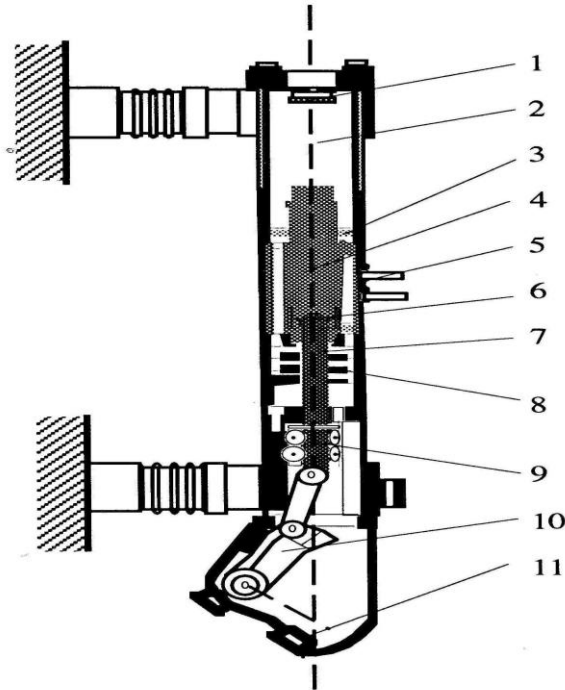
Ilmakatkaisijan väliaineena toimii normaalipaineinen ilma. Tätä tekniikkaa on käytetty maailmanlaajuisesti yli 100 vuoden ajan. Ilmakatkaisijan etuja ovat pienet itsensä aiheuttamat ylijännitteet ja suuri kytkentätiheys. Huoltovälit ovat myös aika pitkät. Ilmakatkaisijoilla nimellisvirrat voivat olla 10 kA: n asti ja katkaisuvirta 25 - 50 kA, joskus huomattavasti suurempiakin. Katkaisijoita valmistetaan 500 V:n nimellisjännitteeseen asti. Ilmakatkaisija voidaan varustaa erityisellä magneettisella puhalluksella. Katkaistava virta muodostaa magneetikentän, jonka avulla valokaari ohjataan levyrakenteiseen sammutuskennostoon. Sammutuskennostossa valokaari pitenee, jäähtyy ja sammuu. Mitoitusjännite voi olla näillä suurimmillaan 24 kV. ( Elovaara & Haarla 2011, 172, 173.)

#### 4.2.2 Vähäöljykatkaisijat

Sammutusväliaineena käytetään öljyä mutta sen määrä on erittäin pieni ja jokaisella vaiheella on oma sammutuskammionsa. Katkaisutapahtumassa valokaari höyrystää öljyn ja höyrystyminen sitoo lämpöä sekä jäähdyttää valokaarta. Höyryn kehittämä paine saa aikaan öljyvirtauksen joka suunnataan solakoiden avulla kohti valokaarta ja tämän seurauksena kosketinkärkien välinen eristyslujuus kasvaa nopeasti. Tyypillinen käyttöalue on 7,2 - 123 kV. Vähäöljykatkaisijoita on vielä runsaasti käytössä, mutta niitä on korvattu lähinnä SF<sub>6</sub>- ja tyhjökatkaisijoilla. Useat valmistajat ovat lopettaneet niiden valmistuksen. (Aura & Tonteri 1993, 276 - 277.)

Vuoden välein katkaisijan osat huolletaan, mitataan ja tarkastetaan sekä kuuden vuoden välein vaihdetaan öljy ja tiivisteet. 100 toimintakerran jälkeen huolletaan katkaisija, mutta vikavirtojen katkaisu aiheuttaa nopeamman huoltotarpeen.

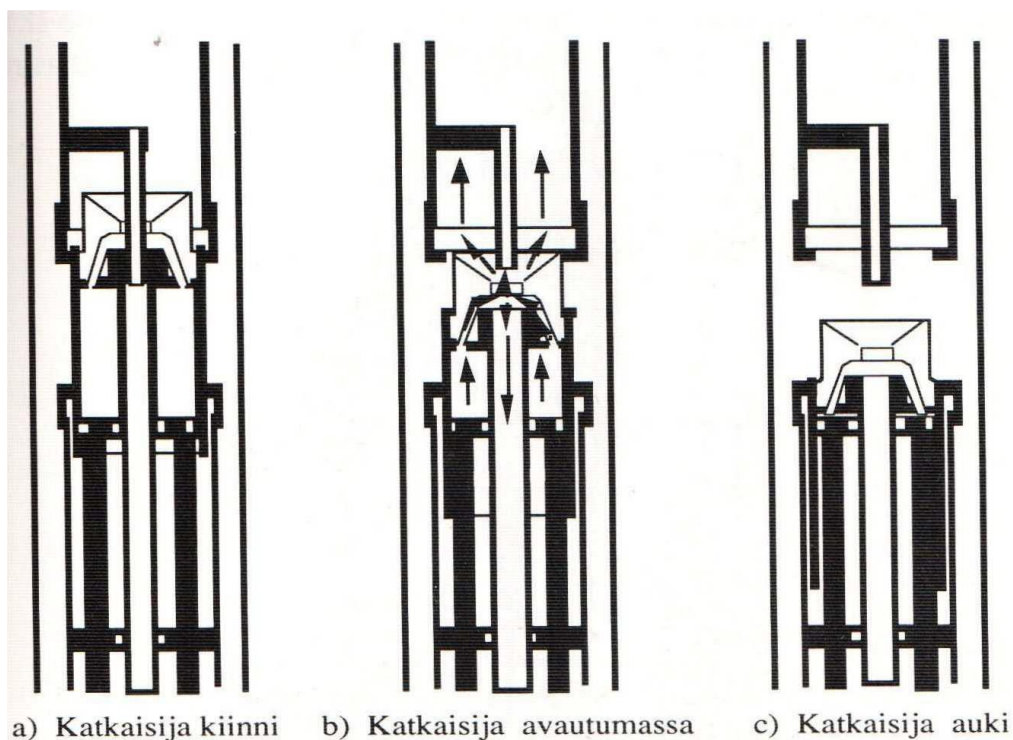
Keskijännitteellä käytetyn vähäöljykatkaisijan rakenne ja osat on esitelty kuviossa 5. Käsien tai sähkömoottorilla viritetään jousimekanismi, jonka energia katkaisutapahtumassa siirretään vipujen välityksellä katkaisupilariin. Vipu siirtää nopeasti liikkuvaa kosketinta pois päin kiinteästä koskettimesta syntyy valokaari koskettimien erkaantumisessa, joka synnyttää paineen nousun paisuntatilassa. Paineennousun seurauksena öljy virtaa suuttimien kautta valokaareen sammuttaen sen.



**Kuvio 5. Periaatekuva vähäöljykatkaisijan yhdestä vaiheesta. 1 on ylipaineventtiili, 2 on paisuntatila, 3 on öljy, 4 on kiinteiden kosketinten kiinnitysrunko, 5 on ylempi kosketinliitântä, 6 on kiinteä kosketin, 7 on liikkuva kosketin, 8 on öljyvirtausta ohjaavat suuttimet, 9 on rullakoskettimet, 10 on käyttömekanismi ja 11 on öljyntyhjennystulppa ( Aura & Tonteri 1993, 277)**

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

SF<sub>6</sub>- katkaisijoissa sammutusväliaineena käytetään rikkiheksafluoridikaasua. Kuviossa 6 on SF<sub>6</sub>-katkaisijan periaatekuva. Katkaisutapahtumassa aukiohjauseste vapautuu ja moottorijousen energia vetää pufferisylinterin alas. Pääkoskettimet avautuvat, ja virta siirtyy valokaarikoskettimille. Valokaari syttyy valokaarikoskettimien avautuessa ja paine nousee sylinterissä. Alkutilanteessa ylävalokaarikosketin estää kaasun virtauksen, kunnes kosketin on auennut tarpeeksi. Koskettimen auettua tarpeeksi ylävalokaarikosketin päästää kaasun virtaamaan edestakaisin valokaarikanavassa. Seuraavassa virran nollakohdassa valokaari muuttuu jäähtymisen ansiosta eristeeksi ja virta katkeaa. (Aura & Tonteri 1993, 278 - 280.)

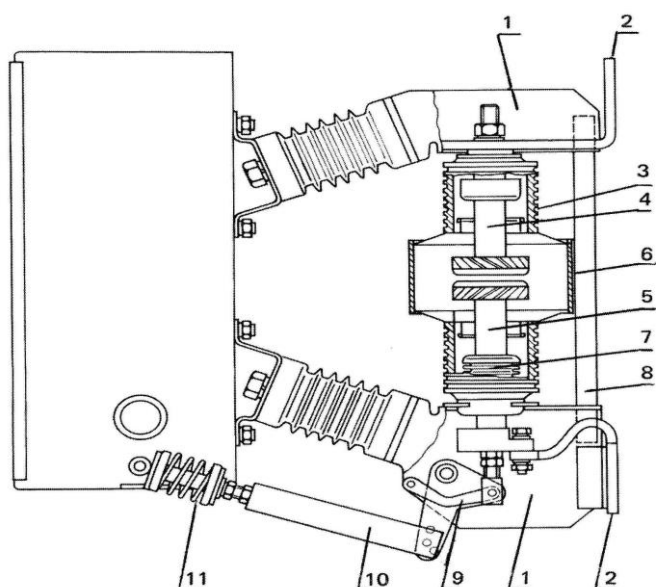


**Kuvio 6. Periaatekuva SF<sub>6</sub>-katkaisijan sammutuskammioiden rakenteesta ja toiminnasta katkaisun aikana. Katkaisija normaalitilassa a, katkaisutapahtuma käynnissä b, katkaisija auki c ( Aura & Tonteri 1993, 279)**

Huoltoväli uusilla SF<sub>6</sub> katkaisijoilla on jo yli 10 vuotta. Mekaaninen elinikä on yleensä 5000- 10000 toimintakertaa. ( Elovaara & Haarala 2011, 180.)

#### 4.2.4 Tyhjiökatkaisijat

Valokaaren katkaisu perustuu katkaisukammiossa olevaan pieneen paineeseen tyhjiöön. Rakenne on yksinkertainen, kuten kuvio 7 osoittaa. Katkaisutapahtumassa tyhjiössä olevat kiinteä ja liikkuva kosketin irtaantuvat toisistaan, valokaari syttyy ja jää palaamaan ionisoituneeseen, koskettimien kosketuspinnolta höyrystyneeseen metallipilveen. Virran nollakohdassa höyry tiivistyy, ionisaatio katoaa ja valokaari sammuu. Tyhjiökatkaisija vaatii jatkuvan ulkoisen puristusvoiman kyetäkseen johtamaan mitoitus- ja oikosulkuvirrat. ( Elovaara & Haarala 2011, 182.)



**Kuvio 7. Tyhjiökatkaisijan rakenne. 1 on katkaisuyksikön kannattimet, 2 on liittimet, 3 on keraaminen eristin, 4 on kiinteä kosketin, 5 on liikkuva kosketin, 6 on sammutuskammio, 7 on metallipalje, 8 on eristävä tukitanko, 9 on ohjaava vipu, 10 on eristävä välitanko ja 11 on ohjausvoiman antava jousi ( Elovaara & Haarala 2011, 183)**

Katkaisijaa ei tarvitse yleensä huoltaa. Ohjain voidellaan 10 vuoden määrävlein. Täydellä oikosulkuvirralla sähköinen elinikä on tyypillisesti 20 - 100 toimintaa ja 1000 - 20000 toimintaa nimellisvirralla. Katkaisijan ja ohjaimen mekaaninen elinikä on 30 - 30000 toimintaa. Tyhjiökatkaisijoiden mitoitusvirrat keskijännitealueella ovat 2000 - 3000A ja katkaisukyky 31,3 - 40 kA. (Elovaara & Haarla 2011, 183.)

#### 4.2.5 Erottimet

Erotin muodostaa virtapiirin ja muun laitoksen välille turvallisen avausvälin. Erotinta ei ole tarkoitettu virtapiirin avaamiseen tai sulkemiseen joten siltä ei vaadita virran sulke- ja katkaisukykyä (paitsi kuormaerotimelta). Erottimen avausvälin täytyy näkyä tai siinä on oltava luotettava mekaaninen asennonosoitin. Vaaraa aiheuttavan käytön estämiseksi erotin pitää pystyä lukitsemaan auki- tai kiinniasentoon. (Elovaara & Haarala 2011, 190.)

Kuormaerotin kykenee suoriutumaan melko suurten kuormitusvirtojen katkaisusta ja pienten oikosulkuvirtojen kytkemisestä. Suomessa sitä käytetään runsaasti keskijänniteverkossa. (Elovaara & Haarla 2011, 190.)

### 4.3 Kiskot

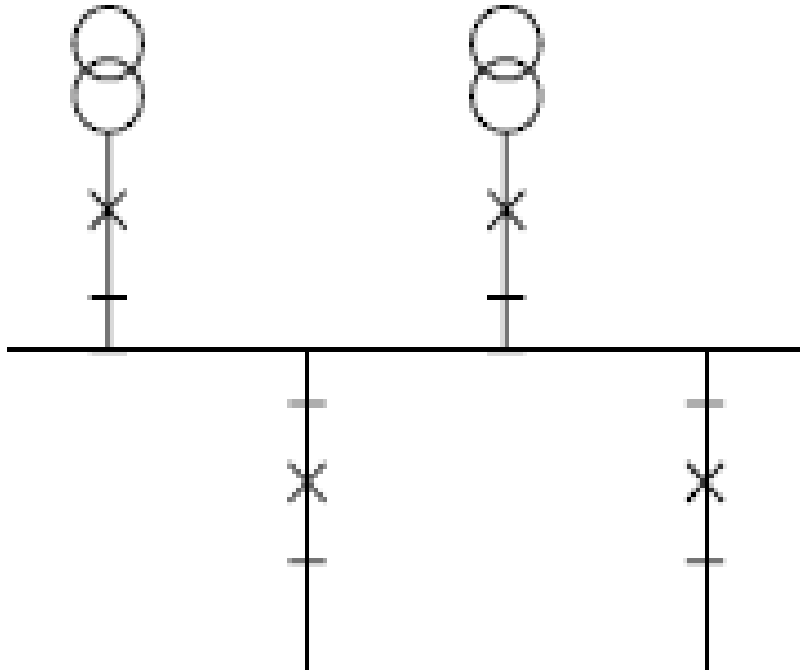
Kytkinlaitoksissa ja jakokeskuksissa käytetään kiskostoja sähkön siirtoreitteinä. Pääkisko nimitystä käytetään, kun siihen liitytään katkaisijalla. Jos liittyminen tapahtuu ainoastaan erottimilla, puhutaan apukiskosta. Tärkeimpiä kiskojärjestelmiä ovat yksikiskojärjestelmä, kisko-apukiskojärjestelmä, kaksoiskiskojärjestelmä ja rengaskiskojärjestelmä. Valintaan vaikuttavia seikkoja ovat

- heti ja myöhemmin liitettävät johdot ja muuntajat
- huolto ja korjaustöiden suorittaminen
- normaalien ja poikkeuksellisten kytkentöjen suorittaminen
- tehonjaon ryhmittelymahdollisuus
- luotettavuus ja käytettävyys
- yksinkertaisuus
- kiskovian haitallisuus
- tilantarve, kustannukset ( Elovaara & Laiho 1998, 304 - 305.)

#### 4.3.1 Yksikiskojärjestelmä

Yksikiskojärjestelmä on yksinkertainen ja selväpiirteinen. Kiskoston hankintakustannukset ovat pienimmät ja suojausautomaattikka helpoin: kuviossa 8 on yksikiskojärjestelmän periaate. Huonoja puolia yksikiskojärjestelmässä ovat vaatimattomat kytkentämahdollisuudet ja se, että vika katkaisijassa tai kiskossa aiheuttaa käyttökeskeytyksen. (ABB:n [www-sivut](http://www.abb.com) 2014, hakupäivä 3.1.2014.)

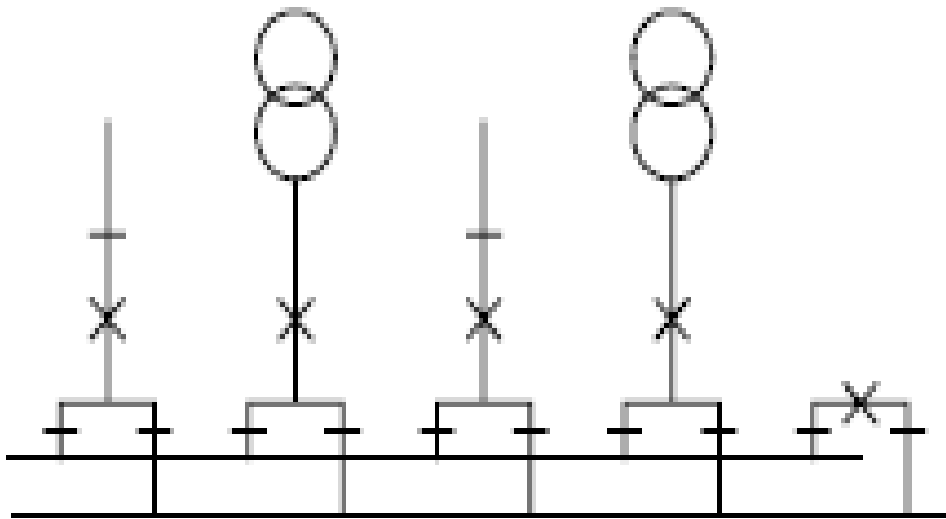




**Kuvio 8. Yksikiskojärjestelmä periaatekuva. Kaksi muuntajaa syöttää kiskoa josta lähtee kaksi johtolähtöä (ABB:n [www-sivut](http://www.abb.com) 2014, hakupäivä 3.1.2014)**

#### 4.3.2 Kaksikiskojärjestelmä

Kaksikiskojärjestelmä syöttöjä ja kuormituksia voidaan muuttaa ja ryhmitellä käytön aikana. Kuviossa 9 on kaksikiskojärjestelmän periaatekuva. Kumpi tahansa kisko saadaan jännitteettömäksi käytön aikana aukaisemalla kiskojen välissä oleva katkaisija. (ABB:n [www-sivut](http://www.abb.com) 2014, hakupäivä 3.1.2014.)



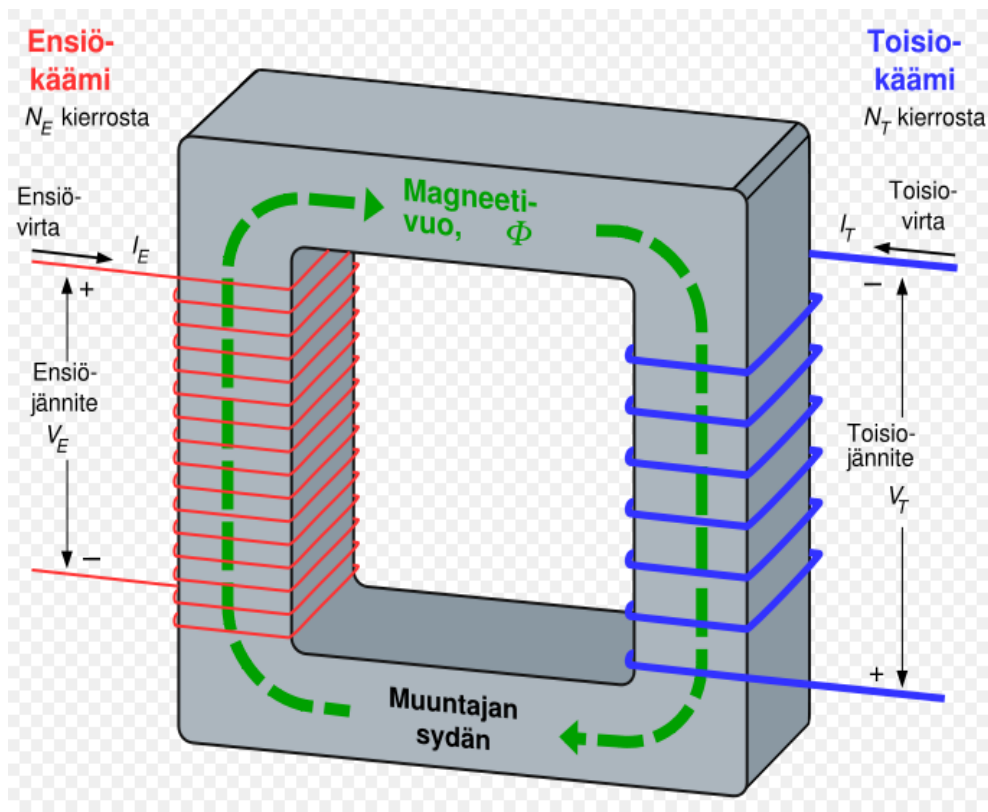
**Kuvio 9. Kaksikiskojärjestelmä periaatekuva. Kaksi muuntaja syöttää kiskoja joista lähtee kaksi johtolähtöä. Kiskokatkaisija yhdistää kiskoja (ABB:n www-sivut 2014, hakupäivä 3.1.2014)**

Kaksoiskiskojärjestelmän tärkeimmät edut yksikiskojärjestelmään verrattuna ovat

- kuormat voidaan jakaa pysyvästi tai tilapäisesti kahteen ryhmään
- toinen kisko on toisen varalla
- katkaisijat ovat ohikytkevissä selektiivisyyden säilyessä
- kiskokatkaisijalla voidaan suorittaa monenlaisia erikoistehtäviä (Elovaara & Laiho 1988, 306.)

## 5 MUUNTAJAT

Muuntaja muuntaa jännitteen sopivaksi ja rajoittaa oikosulkutehoa. Toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Kuviossa 10 on yksivaiheisen muuntajan periaatekuva toiminnasta. Muuntajan ensiökäämissä kulkeva vaihtovirta synnyttää rautasydämeen muuttuvan magneettivuon. Magneettivuo indusoi toisiokäämin napoihin jännitteen, joka riippuu toisiokäämin kierrosmäärästä. (Lappeenrannan teknillinen yliopisto www-sivut 2014, hakupäivä 3.1.2014.)

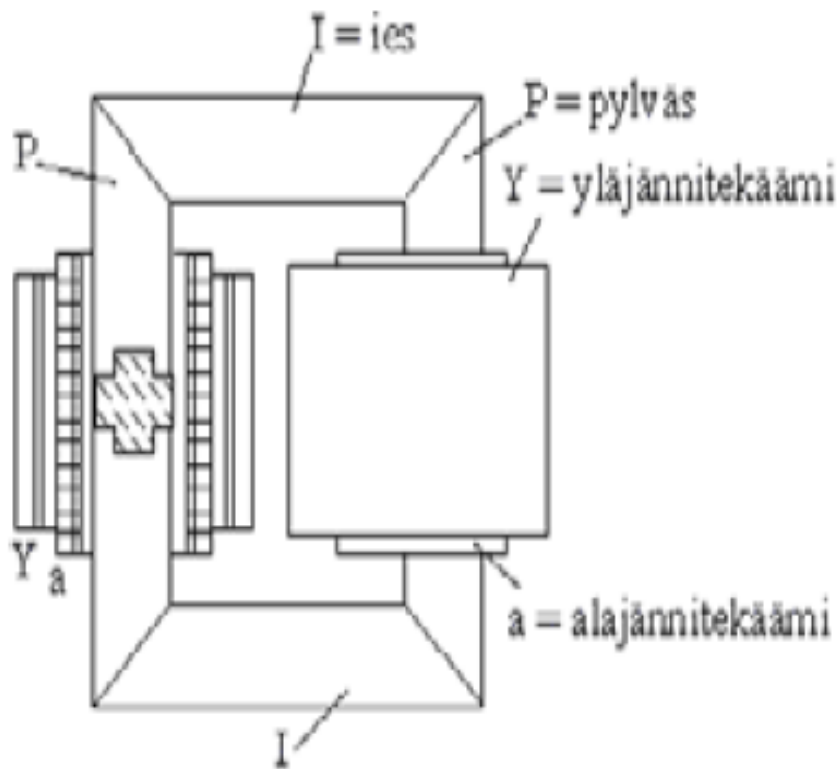


**Kuvio 10.** Yksivaihemuuntajan periaatekuva. Muuntajan ensiökäämissä kulkeva vaihtovirta synnyttää rautasydämeen muuttuvan magneettivuon. Magneettivuo indusoi toisiokäämin napoihin jännitteen joka riippuu toisiokäämin kierrosmäärästä (Lappeenrannan tekninen yliopisto www-sivut 2014, hakupäivä 3.1.2014)

Rautasydäntä ja käämityksiä lämmittää syntyvät häviöt. Lämpö on johdettava ilmaan, jottei muuntaja tuhoudu. (Korpinen www-sivut, hakupäivä 3.1.2014.)

## 5.1 Tehomuuntajat

Tehomuuntajissa käämimateriaaleina käytetään kuparia ja alumiinia. Muuntaja voi olla sydän- tai vaippamuuntaja. Hajavuo ja hajareaktanssien pienentämiseksi muuntajan ensiö- ja toisiokäämitys sijoitetaan samalle pylväälle. Kuviossa 11 on esitetty yksivaiheinen sydänmuuntaja, jonka käämitys on jaettu kahteen osaan. (Korpinen www-sivut, hakupäivä 3.1.2014.)



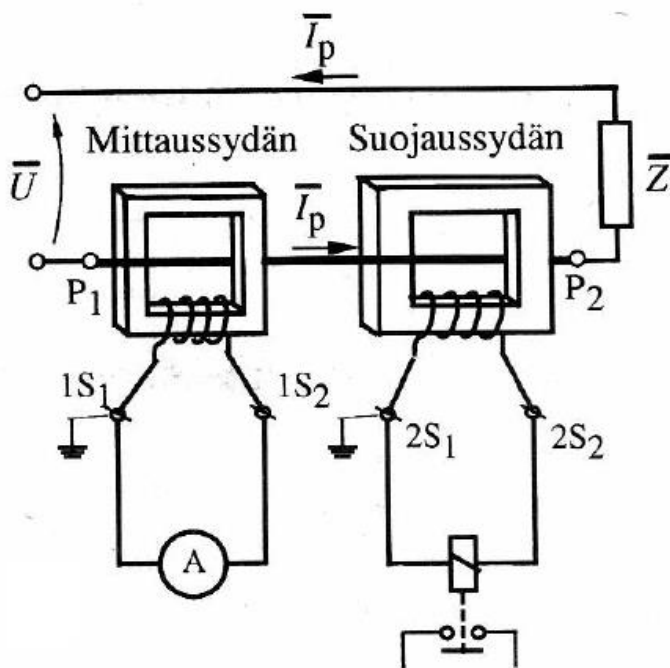
**Kuvio 11. Yksivaiheisen sydänmuuntajan periaatekytkentä. Ensiö ja toisiokäämi on samalla pylväällä. Suljettu magneettipiri muodostuu ikeistä ja pylväistä (Korpinen www-sivut 2014, hakupäivä 3.1.2014)**

Sydänmuuntajan rakenne on yksinkertaisempi ja jäähdytyksen kannalta edullisempi kuin vaippamuuntajan, ja tästä syystä kolmivaihemuuntajista suurin osa on näitä. Tehomuuntajien jäähdytysaineena käytetään ilmaa tai öljyä. Muuntajia nimitetään jäähdytysaineen mukaan kuiva- tai öljymuuntajiksi.

## 5.2 Mittamuuntajat

Mittamuuntajat muuntavat virran tai jännitteen mittakojeille tai suojarelleille sopivaan arvoon ja eristävät ensiö- ja toisiopiirin toisistaan. Virtamuuntaja muuntaa virran ja jännitemuuntaja jännitteen. Mittamuuntajia käytetään helpottamaan mittareiden ja suojarleiden rakentamista. (Aura & Tonteri 1996, 81.)

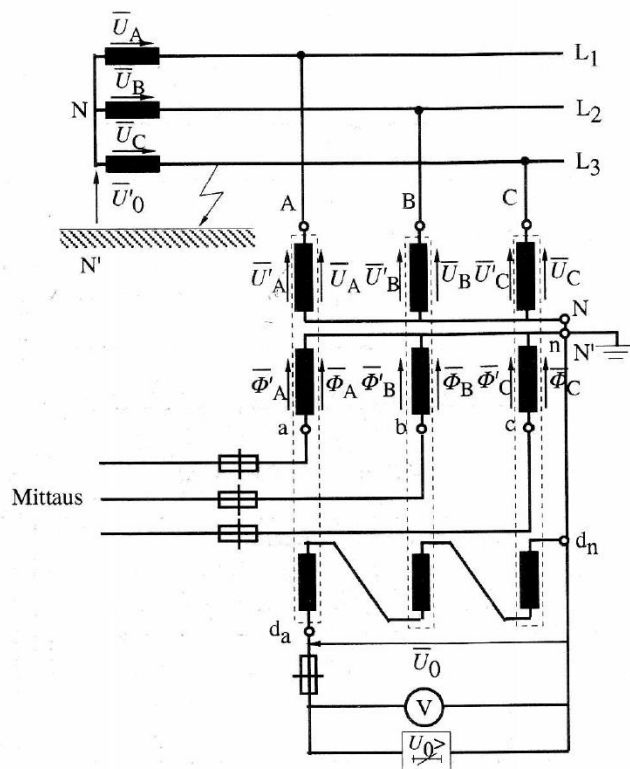
Virtamuuntaja pienentää tavallisesti ensiövirran mittareille ja releille sopivaan arvoon. Virtamuuntajan ensiön käämin kierrosluku on pieni ja toision suuri. Virtamuuntaja valitaan joko suojaus tai mittaustehtävään. Virtamuuntajassa voi olla myös useampia sydämiä, kuten kuviossa 12. Sydämillä on yksi ensiökäämi ja jokaisella sydämellä oma toisiokäämi. Tällaista virtamuuntajaa voidaan käyttää suojaukseen ja mittaukseen yhtä aikaa. (Aura & Tonteri 1996, 81.)



**Kuvio 12. Kaksisydäminen virtamuuntaja. Mittausydämen toisiossa virtamittari ja suojaussydämessä suojarlele (Aura & Tonteri 1996, 81)**

Virtamuuntaja eristää ensiön galvaaniselta yhteydeltä toisioon, joka mahdollistaa mittareiden ja releiden vapaamman sijoittelun sekä suojaa toisioon kytkettyjä kojeita ylivirroilta. (Aura & Tonteri 1996, 81.)

Jännitemittamuuntaja on pienitehoinen muuntaja jossa voi olla useampia sydämiä mitauskäämi, suojauskäämi tai avokolmiokäämi. Kuviossa 13 on kolme yksivaihemuuntajaa, joilla kullakin kolme eri käämiä. Vaiheiden jännitteet saadaan toision mittausjohdoista. Alimmaisat käämit on kytketty avokolmioon, ja jos maasulkua ei ole, jännite on nolla. (Aura & Tonteri 1996, 96.)



**Kuvio 13. Maasulkusuojauksen maadoitusjännitemuuntajaryhmä. Vaiheiden jännitteet nähdään mittaus johdoista. Avokolmion avulla voidaan todeta maasulku jännitteen nousuna. Vakioaikaylijänniterele  $U_0 >$  laukaisee tai hälyttää (Aura & Tonteri 1996, 96)**

Jännitemuuntaja pienentää tavallisesti ensijännitteen mittareille ja releille sopivaan arvoon sekä eristää ensiön galvaaniselta yhteydeltä toisioon. Mahdollistaa mittareiden ja releiden vapaamman sijoittelun. (Aura & Tonteri 1996, 96.)

### 5.3 Muuntajien laskentakaavat.

Muuntajan muuntosuhteella tarkoitetaan ensiö- ja toisiokäämien jännitteiden suhdetta. Muuntajan ensiö- tai toisiojännite ja niitä vastaavat virrat voidaan laskea seuraavalla kaavalla (Aura & Tonteri 1996, 89 - 97):

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1)$$

- $U_1$  on ensiöjännite (V).
- $U_2$  on toisiojännite (V).
- $N_1$  on ensiökäämin kierrosluku.
- $N_2$  on toisiokäämin kierrosluku.
- $I_1$  on ensiökäämin virta (A).
- $I_2$  on toisiokäämin virta (A).

Muuntajan oikosulkuimpedanssi voidaan laskea seuraavalla kaavalla (Huotari & Partanen 1998, 18):

$$Z_m = \frac{z_{m\%}}{100\%} \times \frac{U_n^2}{S_n} \quad (2)$$

- $Z_m$  on muuntajan oikosulkuimpedanssi ( $\Omega$ ).
- $z_{m\%}$  on muuntajan suhteellinen oikosulkuimpedanssi (%).
- $U_n^2$  on muuntajan nimellisjännite (kV).
- $S_n$  on muuntajan nimellisteho (MVA).

Muuntajan oikosulkuresistanssi voidaan laskea seuraavalla kaavalla (Huotari & Partanen 1998, 18):

$$R_m = \frac{r_{m\%}}{100\%} \times \frac{U_n^2}{S_n} \quad (3)$$

- $R_m$  on muuntajan oikosulkuresistanssi ( $\Omega$ ).
- $r_{m\%}$  on muuntajan suhteellinen oikosulkuresistanssi (%).

$U_n^2$  on muuntajan nimellisjännite (kV).

$S_n$  on muuntajan nimellisteho (MVA).

Muuntajan oikosulkureaktanssi voidaan laskea seuraavalla kaavalla (Huotari & Partanen 1998, 18):

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2} \quad (4)$$

$X_m$  on muuntajan oikosulkureaktanssi ( $\Omega$ ).

$Z_m$  on muuntajan oikosulkuimpedanssi ( $\Omega$ ).

$R_m$  on muuntajan oikosulkuresistanssi ( $\Omega$ ).

Muuntajaa kytkettäessä verkkoon syntyy kytkentäsäysvirta, joka on monta kertaa suurempi kuin muuntajan nimellisvirta, ja tämä täytyy huomioida suojarleiden asettelussa. Suojareleiden laukaisu voidaan estää esimerkiksi salpareleellä, joka havaitsee kytkentäsäysvirrassa 100 Hz:n komponentin.

Muuntajia voidaan kytkeä rinnan jos seuraavat ehdot toteutuvat:

- jännitteiden oltava samat
- kytkentäryhmät samat
- oikosulkuimpedanssien ero korkeintaan 10 %
- mitoitustehoissa eroa korkeintaan 1:3 (Lappeenrannan teknillisen yliopiston www-sivut 2014, hakupäivä 3.1.2014).



## 6 KESKIJÄNNITEKAAPELIT

Tehdasvalmisteinen keskijännitekaapeli on kosteutta ja korroosiota estävän vaipan sisällä, mikä suojaa johtoa mekaaniselta vahingoittumiselta. Vaipan sisällä voi olla yksi tai useampia sähköenergian siirtoon tarkoitettuja johtimia ja kaapelilla voidaan korvata avojohto. (Elovaara & Haarala 2011, 303.)

Kaapeleita valmistetaan 500 kV:n nimellisjännitteeseen asti. Johtimien lisäksi kaapelissa rakenneosia ovat johdinsuoja, johdineristys, hohtosuoja, kosketussuoja ja ulkoiset suojakerrokset. Kuvassa 2 keskijännitekaapeli AHXAMK-W. (Prysmian Group:n www-sivut 2013, hakupäivä 27.12.2013.)

Johdinmateriaalina käytetään yleensä alumiinia, koska kuparin käyttö on vähentynyt kalliin hinnan vuoksi. Eristysmateriaalina käytetään nykyään yleensä muoveja. (Elovaara & Haarala 2011, 307.)



**Kuva 2. 20 kV keskijännitekaapeli AHXAMK-W. Kuparinen maaköysi, alumiini johdin, johdinsuoja, PEX-eristys, hohtosuoja, paisuntakerros, kosketussuoja ja vaippa ( Prysmian Group:n www-sivut 2013, hakupäivä 27.12.2013)**

Kaapelien tekniset arvot vaihtelevat jonkin verran valmistajan mukaan. Kaapelien todelliset resistanssit, reaktanssit ja kapasitanssit löytyvät kaapelinvalmistajien omilta sivuilta. Laskuissa kannattaa käyttää kaapelinvalmistajan omia arvoja.

Johtojen resistanssi keskijänniteverkossa voidaan laskea seuraavalla kaavalla Huotari & Partanen 1998, 20):

$$R_j = l \times r_j \quad (5)$$

- $R_J$  on johdon resistanssi ( $\Omega$ ).  
 $l$  on johdon pituus (km).  
 $r_j$  on johtimen resistanssi kilometriä kohti ( $\Omega/\text{km}$ )

Johtojen reaktanssi keskijänniteverkossa voidaan laskea seuraavalla kaavalla (Huotari & Partanen 1998, 20):

$$X_J = l \times x_j \quad (6)$$

- $X_J$  on johdon reaktanssi ( $\Omega$ ).  
 $l$  on johdon pituus (km).  
 $x_j$  on johtimen reaktanssi kilometriä kohti ( $\Omega/\text{km}$ )

Kuormituksen kasvu voidaan laskea seuraavalla kaavalla (Huotari & Partanen 1998, 21):

$$k_v = k \left( 1 + \frac{p}{100\%} \right)^t \quad (7)$$

- $k_v$  on virran suuruus tietyn ajan kuluttua.  
 $k$  on lähtöarvo.  
 $p$  on korkoprosentti.  
 $t$  on aika vuosina.

## 7 RELESUOJAUS

### 7.1 Suojareleet

Sähköverkon vikoja ei voida koskaan kokonaan poistaa vaikka niitä voidaan ehkäistä ja vikoja vastaan voidaan suojautua esimerkiksi reletekniikalla. Suojauksen pitää poistaa vika mahdollisimman nopeasti ja luotettavasti. Mitä nopeammin vika saadaan kytkettyä pois päältä sitä pienemmiksi siitä aiheutuvat vahingot jäävät. (Elovaara & Haarala 2011, 335.)

Nykyään on käytössä sähkömekaanisia, staattisia ja numeerisia releitä. Numeeriset releet ovat nykyaikaisimpia ja monipuolisempia.

#### 7.1.1 Sähkömekaaniset releet

Sähkömekaaniset releet ovat vanhimpia ja jossain määrin vielä käytössä olevia suojareleitä. Ensimmäiset releet, niin sanotut ensioreleet, mittasivat toimintasuurensa suoraan päävirtapiiristä, kun virta ylitti asetteluarvon vapauttaa katkaisija välitangon avulla laukaisujousen. Yleisempiä ovat toisio- eli sekundäärireleet, joissa mittamuuntajien toisio yhdistetään releeseen. Tällä tavalla päästään parempaan tekniseen ja taloudellisempaan ratkaisuun. Toisio-releitä voidaan myös koestaa käytön aikana. (Mörsky 1993, 21 - 23.)

Sähkömekaanisen releet ovat mekaanisesti hitaita, arkoja tärinälle ja mekaanisesti kuluvia. Säännöllisesti huollettuna rele toimii suhteellisen luotettavasti. Sähkömekaanisen releen etuja ovat toiminnan havainnollisuus, tunnottomuus ylijännitteelle ja sähkömagneettisille häiriöille. (Mörsky 1993, 21 - 23.)

#### 7.1.2 Staattiset releet

Staattiset releet ilmestyivät markkinoille 1960-luvun lopussa. Staattisia releitä on käytössä paljon ja niitä valmistetaan vieläkin. Staattinen rele tarvitsee apuenergiaa toimiakseen. Lähtöreleenä voidaan siksi käyttää apurelettä, joka sisältää riittävän määrän koskettimia sekä laukaisua että hälytyksiä varten. Staattinen rele kytketään sovitusuunta-

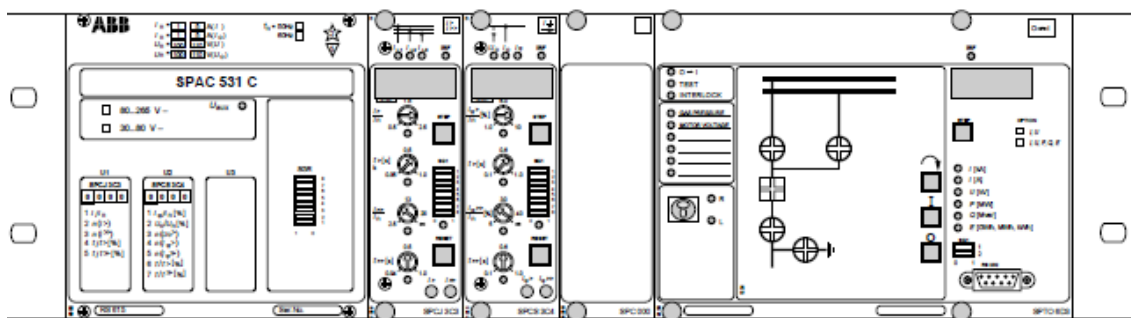
jan välityksellä mittamuuntajan toisiopiiriin. Sovitusmuuntaja muuttaa jännite- ja virtasuureet elektroniikalle sopiviksi. Sovitusmuuntaja myös suojaa ylijännitteiden ja ylivirtojen muodostamalta dynaamiselta ja termiseltä vaikutukselta elektroniikkaa. Samaan releeseen voidaan rakentaa useita suojaustoimenpiteitä. Johtosuojaukseen voidaan esimerkiksi käyttää relettä joka voi sisältää ylivirta- ja maasulkusuojan sekä jälleenkytkentälogiikan. (Mörsky 1993, 23 - 25.)

Staattisen releen etuja sähkömekaanisen releeseen verrattuna ovat lyhyet toiminta-ajat, pieni tehonkulutus, pieni koko, hyvä värinänkestävyys ja monipuolisempi informaation käsittely. Huonoiksi puoliksi sähkömekaanisiin releisiin verrattuna voidaan laskea apuenergian tarve, periaatteessa herkkyys ulkoisille häiriöille, ylijännitteille ja virroille. (Mörsky 1993, 23 - 25.)

### 7.1.3 Numeeriset releet

Numeeriset releet ilmestyivät markkinoille 1980-luvun loppupuolella, ja ne ovat mikroprosessorilla varustettuja releitä. Suojaustoimintojen integroiminen samaan laitteeseen oli tunnusomaista ensimmäisen sukupolven numeerisille releille. Johtosuojaukseen oli esimerkiksi integroitu ylivirta-, oikosulku-, maasulkusuoja ja jälleenkytkentälogiikka. Uusi ominaisuus oli itsediagnostiikka, joka antaa hälytyksen releen sisäisistä vioista. Toisen sukupolven releet voivat lähettää myös muita tietoja kosketintietojen ohella ja tieto kulkee molempiin suuntiin. Lukea voidaan mittaustietoja, asettelu- ja tilatietoja ja rele ottaa vastaan ohjaus- ja asettelutietoja. (Mörsky 1993, 25 - 35.)

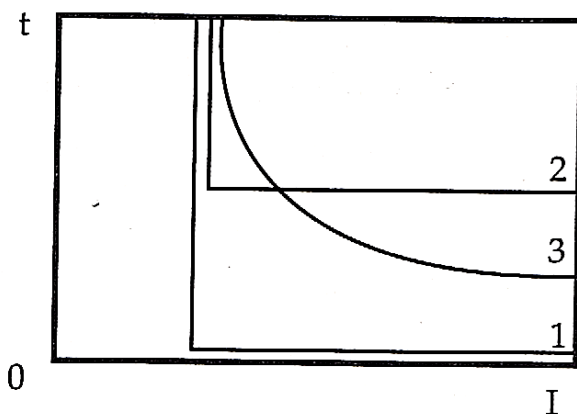
Numeerisen releen (kuva 3) etuja elektroniseen releeseen verrattuna ovat jatkuva itsediagnostiikka, releen muisti ja releen kommunikointi esimerkiksi keskusvalvomon kanssa. Releen mittaustietoja tai tallentuneita vikatietoja voidaan kaukolukea, tai releasetteluja voidaan lukea ja muuttaa kauko-ohjatusti. (Mörsky 1993, 25 - 35.)



**Kuva 3. Kennoterminaali SPAC 531 C layout (ABB:n www-sivu 2013, hakupäivä 20.12.2013)**

#### 7.1.4 Ylivirtarele

Mittausvirran ylittäessä asetteluarvon havahtuu ylivirtarele ja toimii, jos havahtuminen jatkuu yli asetteluajan. Ylivirtareleessä voi olla useampia portaita, jotka voidaan asettaa toimimaan eri tavalla. Portaat voivat olla hetkellinen, vakioaika- tai käänteisaikahidas- teisia tai näiden yhdistelmiä. Kuviossa 14 voi nähdä, miten toimintakäyrät poikkeavat toisistaan.



**Kuvio 14. Ylivirtareleiden toimintakäyriä. 1 on hetkellinen ylivirtarele, 2 on vakio- aikaylivirtarele ja 3 on käänteisaikaylivirtarele (Mörsky 1993, 36)**

Hetkellinen rele toimii heti mittausvirran ylittäessä asetteluarvon. Vakioaika ylivirtareleessä asetteluarvon ylittävän virran suuruus eivät vaikuta releen toimintanopeuteen. Käänteisaikaylivirtarele toimii sitä nopeammin, mitä suurempi on mittausvirta asettelu-

virtaan nähden. Käänteisaika releen laukaisuaika voidaan laskea seuraavalla kaavalla (ABB:n www-sivut 2014, hakupäivä 3.1.2014):

$$t = \frac{k \times \beta}{\left(\frac{I}{I_0}\right)^{\alpha} - 1} \quad (8)$$

- t on toiminta-aika (s)  
 k on aseteltava kerroin  
 I on virran arvo (A)  
 I<sub>0</sub> on aseteltu virran arvo (A)

Maasulku- ja ylivirtarele sisältää jyrkkyydeltään neljä erilaista käyrästä. Vakiot määrittävät ominaiskäyrän jyrkkyyden ja ne löytyvät taulukosta 1.

**Taulukko 1. Käänteisaikareleen ominaiskäyrästä ja niiden vakiot  $\alpha$  ja  $\beta$**

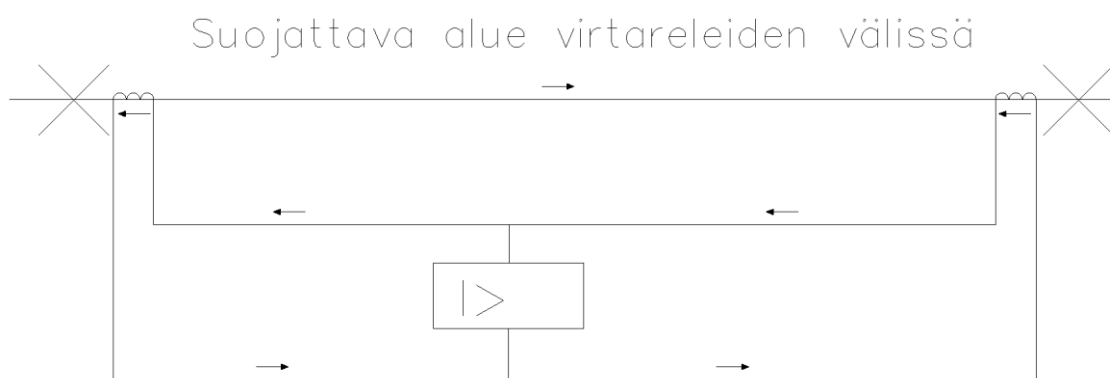
Ominaiskäyrä	$\alpha$	$\beta$
Normal inverse	0,02	0,14
Very inverse	1,0	13,5
Extremely inverse	2,0	80,0
Long time inverse	1,0	120,0

Ylivirtareleitä käytetään yleensä säteittäisissä verkoissa, joissa kuormitusvirta on pienempi kuin pienin vikavirta. Silmukkaverkoissa voidaan ylivirta- ja oikosulkusuojana käyttää suunnattua ylivirtarelettä, joka päättelee virran suunnan jännitteen ja virran vaihekulman avulla. (Mörsky1993, 35 - 37.)

#### 7.1.5 Differentiaalirele

Differentiaalirele toimii, kun suojattavaan kohteeseen tulevien ja lähtevien virtojen summa on asetteluarvoa suurempi. Virtamuuntajat sijoitetaan valvottavan suoja-alueen molemmille puolille kuten kuviossa 15. Normaalitylanteessa molempien virtamuuntajien mittaama virta on sama eikä rele I> havaitse erovirtaa. Vian syntyessä suoja-alueelle virtamuuntajien mitaamat virrat poikkeavat toisistaan ja erotus kulkee I> releen kautta, ja jos virta ylittää asetteluarvon, rele vetää. Differentiaalirele suojaa vain virtamuuntaji-

en välisen alueen. Mitä suurempi on kohteen läpi kulkeva virta, sitä suuremman virtaeron vaatii differentiaalirele toimiakseen luotettavasti.



**Kuvio 15. Differentiaalireleen toimintaperiaate. Rele toimii kun suojattavaan kohteeseen tulevien ja siitä lähtevien virtojen summa on asetteluarvoa suurempi**

Differentiaalirele mahdollistaa tehokkaan suojauksen olemalla hyvin nopea ja selektiivinen. Virtamuuntajat on valittava hyvin huolellisesti. Mittaustiedon siirtoyhteyden järjestäminen pitkillä matkoilla voi muodostua ongelmaksi. (Mörsky 1993, 46 - 50.)

#### 7.1.6 Nollavirtarele

Ylivirtarele, joka mittaa virtamuuntajien toisioiden paluupiirin summavirtaa, ei tunnista vikavirran suuntaa ja toimii maasuluissa. Nollavirtalaukaisun esto kytkentöjen aikana tarvitaan, koska nollavirtaa voi esiintyä silloin ilman vikaa. Nollavirtarelettä käytetään maasulkujen havaitsemiseen. Virta-asettelu herkällä nollavirtareleellä on pieni ja hidastus suuri. Virta-asettelu karkealla nollavirtareleellä on suuri ja hidastus pieni. (Elovaara & Haarala 2011, 353 - 354.)

#### 7.1.7 Maasulun suuntarele

Maasulun suuntarele  $Q_0$  on nollavirtarele, joka toimii vain jos vikavirran suunta on oikea. Vikavirran suunnan rele päättelee nollavirran ja nollajännitteen vaihekulman perus-

teella. Selektiivisyyteen pyritään vakioaikaasettelussa aika-asetteluja porrastamalla, mutta paras selektiivisyys saavutetaan käänteisaikaasettelua käyttämällä. (Elovaara & Haarala 2011, 354.)

#### 7.1.8 Jännitereleet

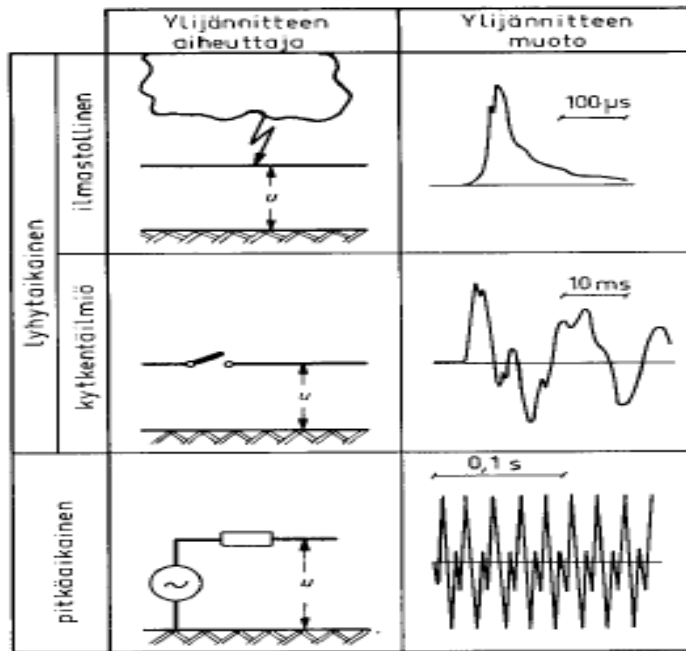
Jännitereleet mittaavat jännitettä ja toimivat, kun jännite ylittää tai alittaa verkon sallitut arvot. Jännitereleitä on hetkellisiä tai vakioaikajännitereleitä. Hetkellinen rele toimii heti mittausjännitteen ylittäessä/alittaessa asetteluarvon. Mittausjännitteen ylittäessä/alittaessa asetteluarvon havahtuu vakioaikajänniterele ja toimii, jos havahtuminen jatkuu yli asetteluajan. Ylijänniterelettä voidaan myös käyttää maasulkusuojauksessa nollajännitteen valvontaan. (Mörsky 1993, 78.)

#### 7.2 Yli- ja alijännitesuojaus

Verkossa esiintyy käyttöjännite, lyhytaikaisia ja pitkäaikaisia ylijännitteitä kuvio 16. Ylijännite ylittää suurimman sallitun käyttöjännitteen huippuarvon,  $U_m \sqrt{2}$  vaiheiden välillä tai arvon  $U_m \sqrt{2} / \sqrt{3}$  maan ja vaiheiden välillä. Verkossa esiintyvät jänniterasitukset ovat lähtökohtana eristysmitoitukselle. Verkossa esiintyvät ylijännitteet pyritään rajoittamaan niin, etteivät ne vahingoita kojeistojen kalliita laitteita. Pieniä yli- ja alijännitteitä vastaan voidaan suojautua yli- ja alijännitereleillä. (Elovaara & Laiho 1988, 167.)

Venttiilisuojia ja suojakipinävälejä voidaan kytkinasemilla käyttää ilmastollisten ylijännitteiden suojaukseen ja rajoittamiseen. Keskijänniteverkossa voidaan myös käyttää yli- ja alijänniterelettä sekä maasulkujänniterelettä. (Aura & Tonteri 1993, 224.) Jakelumuuntajat 20/04 kV suojataan yleensä metallioksidisuojin (MO-suoja) kun nimellisteho on 200 kVA tai yli. (Lakervi & Partanen 2008, 149.)



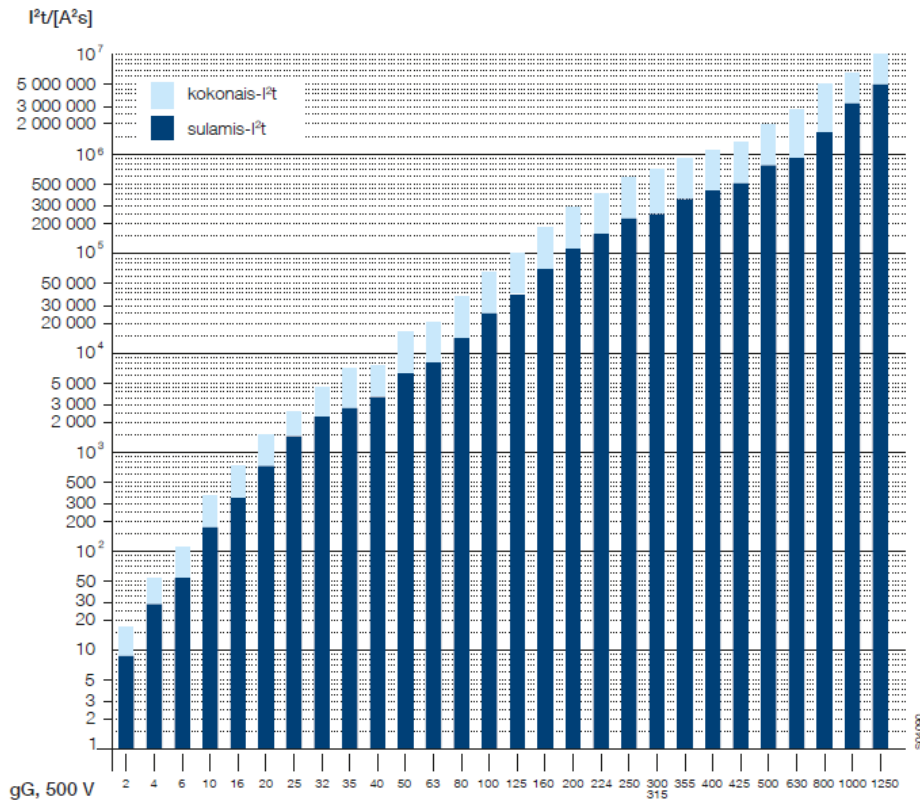


**Kuvio 16.** Verkossa esiintyvät ylijännitelajit ja sen muoto (Elovaara & Haarala 2008, 12)

### 7.3 Selektiivisyys

Vika pyritään rajoittamaan niin pienelle alueelle kuin mahdollista muun verkon jäädessä toimimaan normaalisti. Selektiivisyydessä on huomioitava kolme eri asiaa: aikaselektiivisyys, mittaussuureselektiivisyys ja suuntaselektiivisyys. Kahvasulakkeiden selektiivisyys voidaan tarkistaa  $I^2t$ -kuvioista 17, esimerkiksi 400 A:n kahvasulakkeella pitää olla kuvion mukaan 800 A:n etusulake, jotta selektiivisyys toteutuisi. Pienemmän sulakkeen  $I^2t$  kokonaisarvon pitää olla pienempi kuin suuremman sulakkeen  $I^2t$  sulamisarvo. (ABB www-sivut 2014, hakupäivä 14.1.2014.)

Aikaporrastuksella toteutetussa suojauksessa tulisi suojausportaiden välinen aika olla vähintään numeerisilla releillä 0,15 s, elektronisilla releillä 0,3 s ja mekaanisilla releillä 0,5 s.



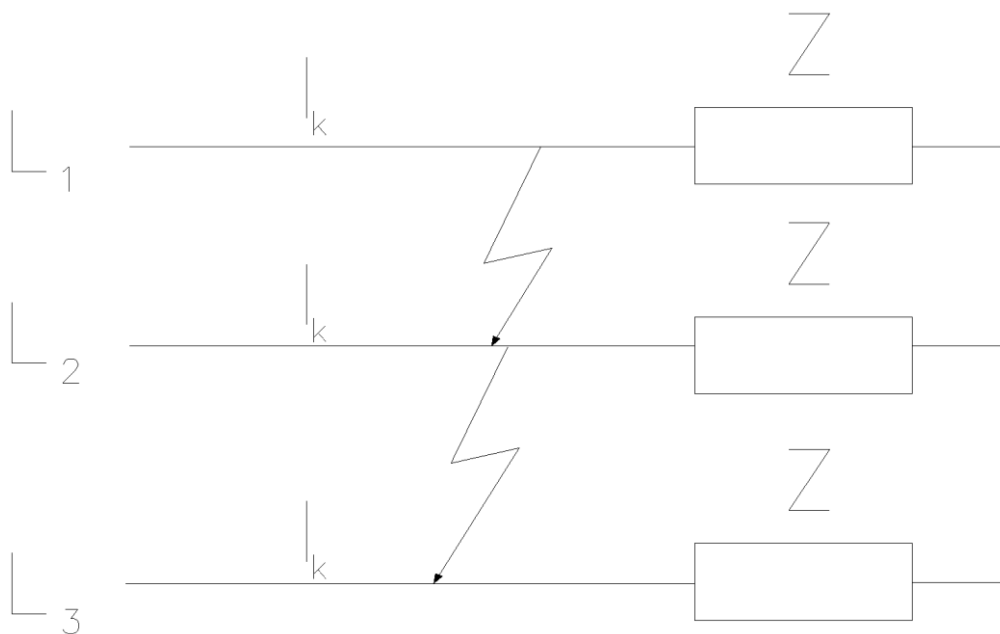
**Kuvio 17. OFAA- kahvasulakkeiden  $I^2t$ - arvot (gG) ja selektiivisyys (ABB:n www-sivut 2014, hakupäivä 14.1.2014)**

## 8 VIKAVIRTALASKENTA

### 8.1 Oikosulkulaskenta

Oikosulku voi tapahtua suoraan, vikaimpedanssin tai valokaaren kautta. Virtapiiri sulkeutuu eristysvian tai ulkoisen kosketuksen avulla. Oikosulku voi tapahtua kahden tai kolmen vaihejohdon välillä. Virta oikosulussa on yleensä suurempi kuin kuormitusvirta. Virtapiiri voi sulkeutua myös maan ja vaiheen välillä, jolloin kyseessä on maasulku. Oikosuluista aiheutuu häiriöitä sähköjakeluun. Henkilövahingot sekä komponenttien kuumenemiset ovat myös mahdollisia seurauksia. (Lakervi & Partanen 2008, 28.)

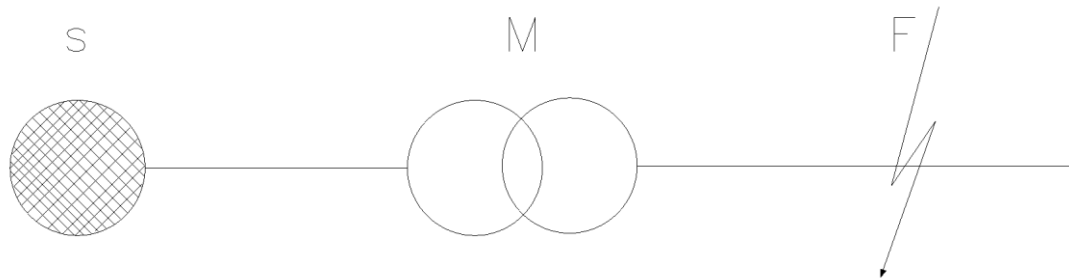
Määriteltäessä oikosulkusuojauksen asetteluja, johdinten ja komponenttien oikosulukestoisuutta tarvitaan oikosulkulaskentaa. Laskenta voidaan tehdä itseisarvoilla, koska vikavirran vaihekulma ei ole tärkeä. Laskenta voidaan tehdä Thevenin menetelmällä. Kolmivaiheinen oikosulku on sähköverkkoa eniten rasittava vika. Kuviossa 18 on esitetty kolmivaiheinen oikosulku. (Lakervi & Partanen 2008, 28.)



**Kuvio 18. Kolmivaiheisen oikosulun periaatekuva**

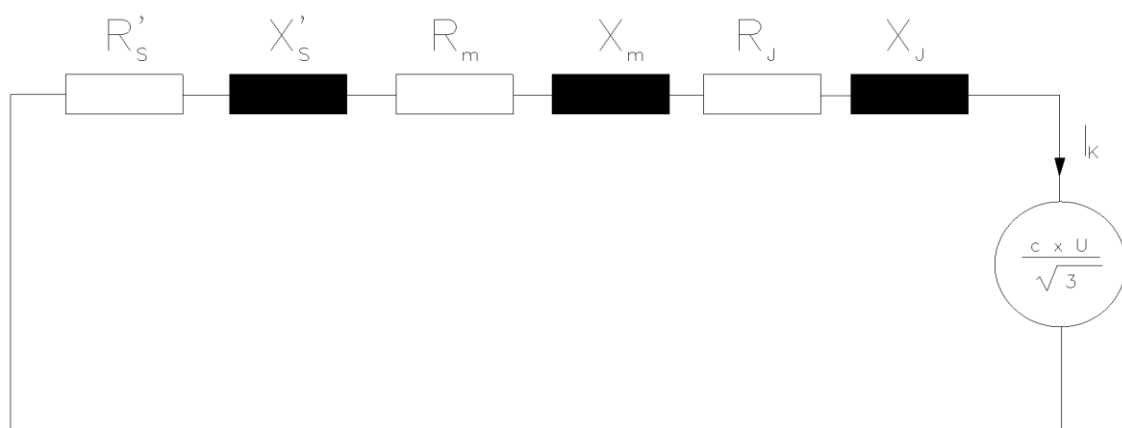
## 8.1.1 Thevenin menetelmä

Thevenin menetelmä soveltuu hyvin teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen määrittämiseen. Thevenin teoreemassa vikapaikkaan sijoitetaan sähkömotorinen voima. Kuviossa 19 on tarkasteltava piirin periaatekuva kaapelilla tehtynä, jonka avulla voi tarkastella tilannetta. (Huotari & Partanen 1998, 8.)



**Kuvio 19. Periaatekytkentä tarkasteltavasta piiristä. S on syöttävä verkko, M on muuntaja ja F pisteessä vastukseton kolmivaiheinen oikosulku**

Tilanteesta tehdään yksivaiheinen johto sijaiskytkentä kuvio 20. Kokonaisimpedanssi  $Z_{\text{kok}}$  muodostuu syöttävästä verkosta, päämuuntajasta ja johdoista. Oikosulkuresistanssit ja – reaktanssit tulee redusoida oikosulkupaikan jännitteeseen. (Huotari & Partanen 1998, 8.)



**Kuvio 20. Tarkasteltavasta piiristä tehty yksivaiheinen johdin sijaiskytkentä.  $R'_s$  on syöttävänverkon redusoitu resistanssi,  $X'_s$  on syöttävänverkon redusoitu reaktanssi,  $R_m$  muuntajan resistanssi,  $X_m$  on muuntajan reaktanssi,  $R_J$  on johdon resistanssi ja  $X_J$  on johdon reaktanssi (Huotari & Partanen 1998, 8)**

Kolmivaiheinen oikosulkuvirta voidaan laskea seuraavalla kaavalla (Huotari & Partanen 1998, 9):

$$I_{K3} = \frac{c \times U}{\sqrt{3} \times Z_{kok}} \quad (9)$$

$I_{K3}$  on kolmivaiheinen oikosulkuvirta (A).

$c$  on jännitekerroin.

$U$  on nimellisjännite (V).

$Z_{kok}$  on virtapiirin kokonaisimpedanssi ( $\Omega$ ).

Kertoimen  $c$  arvo määräytyy käytössä olevan nimellisjännitteen mukaan ja määritellään IEC 60909-0 standardissa. Taulukko 2 jännitekertoimen määrittäminen. (Huotari & Partanen 1998, 9.)

**Taulukko 2. Jännitekertoimen  $c$  arvon määräytyminen (Huotari & Partanen 1998, 9)**

Nimellisjännite $U_n$	Maksimioikosulkuvirta $C_{max}$	Minimioikosulkuvirta $C_{min}$
Pienjännite 100 V -1000 V	1,05	0,95
Keskijännite >1 kV – 35 kV	1,10	1,00
Suurjännite >35 kV-230 kV	1,10	1,00

Keskijännitteellä 20 kV maksimioikosulkuvirta lasketaan kertoimella 1,10. Syöttävän verkon impedanssi  $Z_s$  voidaan laskea alkuoikosulkuvirran  $I_k''$  tai näennäistehon  $S_k''$  avulla. Nämä arvot saadaan syöttävän verkon haltijalta.

Syöttävän verkon impedanssi voidaan laskea seuraavan kaavan avulla (Huotari & Partanen 1998, 15):

$$Z_s = \frac{c U_n^2}{S_k''} = \frac{c U_n}{\sqrt{3} I_k''} \quad (10)$$

$Z_s$  on syöttävän verkon impedanssi ( $\Omega$ ).

$c$  on jännitekeroin taulukko 1.

$U_n$  on nimellisjännite (V).

$S_k''$  on näennäisteho (VA).

$I_k''$  on alkuoikosulkuvirta (A).

Syöttävän verkon impedanssi voidaan jakaa reaktanssiosaan seuraavalla kaavalla silloin, jos tarkemmin ei tiedetä (Huotari & Partanen 1998, 16):

$$X_s = 0,995 \times Z_s \quad (11)$$

$X_s$  on syöttävän verkon reaktanssi ( $\Omega$ ).

$Z_s$  on syöttävän verkon impedanssi ( $\Omega$ ).

Syöttävän verkon impedanssi voidaan jakaa resistanssiosaan seuraavalla kaavalla (Huotari & Partanen 1998, 16):

$$R_s = 0,1 \times X_s \quad (12)$$

$R_s$  on syöttävän verkon resistanssi ( $\Omega$ ).

$X_s$  on syöttävän verkon reaktanssi ( $\Omega$ ).

Oikosulkuresistanssi voidaan redusoida alajännitepuolelle seuraavalla kaavalla (Elovaara & Laiho 1988, 50):

$$R_s' = \left( \frac{U_2}{U_1} \right)^2 \times R_s \quad (13)$$

$R_s'$  on yläjännitepuolen redusoitu oikosulkuresistanssi alajännitepuolella ( $\Omega$ ).

$R_s$  on yläjännitepuolen verkon oikosulkuresistanssi ( $\Omega$ ).

$U_1$  on muuntajan ensiöpuolen jännite (kV).

$U_2$  on muuntajan toisiopuolen jännite (kV).

Oikosulkureaktanssi voidaan redusoida alajännitepuolelle seuraavalla kaavalla (Elovaara & Laiho 1988, 50):

$$X'_s = \left( \frac{U_2}{U_1} \right)^2 \times X_s \quad (14)$$

$X'_s$  on yläjännitepuolen redusoitu oikosulkureaktanssi alajännitepuolella ( $\Omega$ ).

$X_s$  on yläjännitepuolen verkon oikosulkureaktanssi ( $\Omega$ ).

$U_1$  on muuntajan ensiöpuolen jännite (kV).

$U_2$  on muuntajan toisiopuolen jännite (kV).

Kokonaisimpedanssi  $Z_{\text{kok}}$  voidaan laskea seuraavalla kaavalla (Huotari & Partanen 1998, 18):

$$Z_{\text{kok}} = \sqrt{(R'_s + R_m + R_J)^2 + (X'_s + X_m + X_J)^2} \quad (15)$$

$R'_s$  on verkon resistanssi redusoituna oikosulkupaikan jännitteeseen ( $\Omega$ ).

$X'_s$  on verkon reaktanssi redusoituna oikosulkupaikan jännitteeseen ( $\Omega$ ).

$R_m$  on muuntajan resistanssi ( $\Omega$ ).

$X_m$  on muuntajan reaktanssi ( $\Omega$ ).

$R_J$  on johdon resistanssi ( $\Omega$ ).

$X_J$  on johdon reaktanssi ( $\Omega$ ).

Relesuojauksen asettelujen määrittämiseksi keskijänniteverkossa täytyy laskea kaksivaiheinen oikosulkuvirta eli minimioikosulkuvirta. Kaksivaiheisen oikosulkuvirran tulee olla suurempi kuin suojareleen asetteluarvo, jotta suojarele toimisi vian sattuessa. (Martimo 2011, kurssimateriaali.)

Minimioikosulkuvirran laskennassa kolmivaiheinen oikosulkuvirta  $I_{K3}$  lasketaan kaavalla 1. Jännitekerroin  $c$  taulukosta 1, joka keskijännitteellä 20 kV on 1,00.

Kaksivaiheinen oikosulkuvirta voidaan laskea seuraavalla kaavalla, jos myötä- ja vastaimpedanssit ovat yhtä suuria (Huotari & Partanen 1998, 11):

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{k3} \quad (16)$$

$I_{k2}$  on kaksivaiheinen oikosulkuvirta (A).

$I_{k3}$  on kolmivaiheinen oikosulkuvirta (A).

## 8.2 Oikosulkukestoisuus

Johtimien ja laitteiden on kestävä dynaamiset ja termiset rasitukset oikosulun aikana. Yleensä 10 ms oikosulun alusta saavutetaan oikosulun hetkellinen huippuarvo, niin sanottu sysäysoikosulkuvirta  $i_p$ , ja tämän sysäysoikosulkuvirran avulla määritellään dynaaminen kestoisuus. (Huotari & Partanen 1998, 23.)

Sysäysoikosulkuvirta voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$i_p = k \times \sqrt{2} \times I_k'' \quad (17)$$

$i_p$  on sysäysoikosulkuvirta (A).

$k$  on sysäyskerroin.

$I_k''$  on alkuoikosulkuvirta (A).

Alkuoikosulkuvirran arvona voidaan jakeluverkoissa käyttää kolmivaiheisen oikosulkuvirran arvoa, kun ei tarvitse huomioida tahtikoneiden alku- ja muutosreaktansseja ja niiden vaikutusta oikosulkuvirtaan. (Martimo 2011, kurssimateriaali.)

Sysäyskertomelle voidaan käyttää suurjänniteverkoissa arvoa 1,8 jos tarkkoja arvoja ei tunneta. Sysäyskerroin voidaan laskea seuraavalla kaavalla (Huotari & Partanen 1998, 24):

$$k = 1,022 + 0,969 \times e^{\frac{-3,03 \times R}{X}} \quad (18)$$



Terminen oikosulkukestoisuus voidaan laskea seuraavalla kaavalla (Elovaara & Haarala 2011, 84):

$$I_{1st} = I_k'' \sqrt{(m + n) \times t_k} \quad (19)$$

- $I_{1st}$  on termien kesto 1 sekunnissa (A)  
 $I_{k3}$  on kolmivaiheinen maksimi oikosulkuvirta (A).  
 $m$  on tasavirtatekijä.  
 $n$  on vaihtovirtatekijä  
 $t_k$  on oikosulun kesto (s)

jakeluverkoissa yleensä  $I_k'' = I_{k3} \rightarrow m = 0$  ja  $n = 1$

Laitteiden IEC: standardoimat mitoitusvirrat ja niitä vastaavat oikosulkuvirran huippuarvot ja termiset kestovirrat on esitetty taulukossa 3. Taulukon k arvo on 1,768.

**Taulukko 3. IEC:n määrittelemät mitoitusvirrat (rms) ja niitä vastaavat  $I_p$  ja  $I_{thr}$  arvot**

$I_r / A$	400	630	800	1250	1600	2000	2500	3150
$I_{thr} / kA$	5,0	6,3	8,0	10	12,5	16	20	25
$i_p / kA$	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63

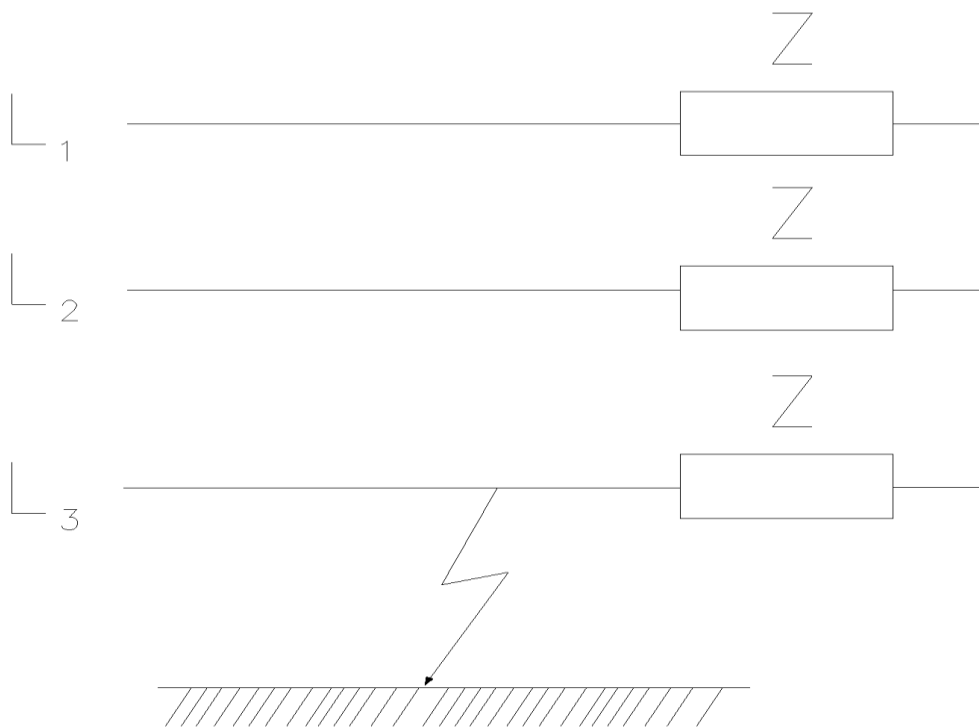
Kojeiston kestävä pisin oikosulkuaika voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$t = \frac{(I_{1s})^2}{(I_{kt})^2} \quad (20)$$

- $I_{kt}$  on kojeistoon vaikuttava maksimi oikosulkuvirta (A).  
 $I_{1s}$  on komponentin 1 sekunnin maksimioikosulkuvirta (A).  
 $t$  on oikosulun maksimi kesto aika (s).

### 8.3 Maasulkulaskenta

Maasulussa syntyy johtava yhteys vaihejohtimen ja maan/maadoitetun osan välille. Maasulun yleisimpiä aiheuttajia ovat puut, ukkonen, eläimet, työkoneet, eristimen rikkoutuminen ja johdin katkeamat. Maasulku voi aiheuttaa ylijännitteitä, kosketusjännitevaaraa ja häiriöjännitteitä, joka voi olla yksivaiheinen, kaksivaiheinen tai kaksoismaasulku. Kuviossa 21 on esitetty yksivaiheisen maasulun periaatekuva. Yksivaiheinen maasulku voi tapahtua suoraan tai vikaimpedanssin kautta. (Mörsky 1993, 298.)



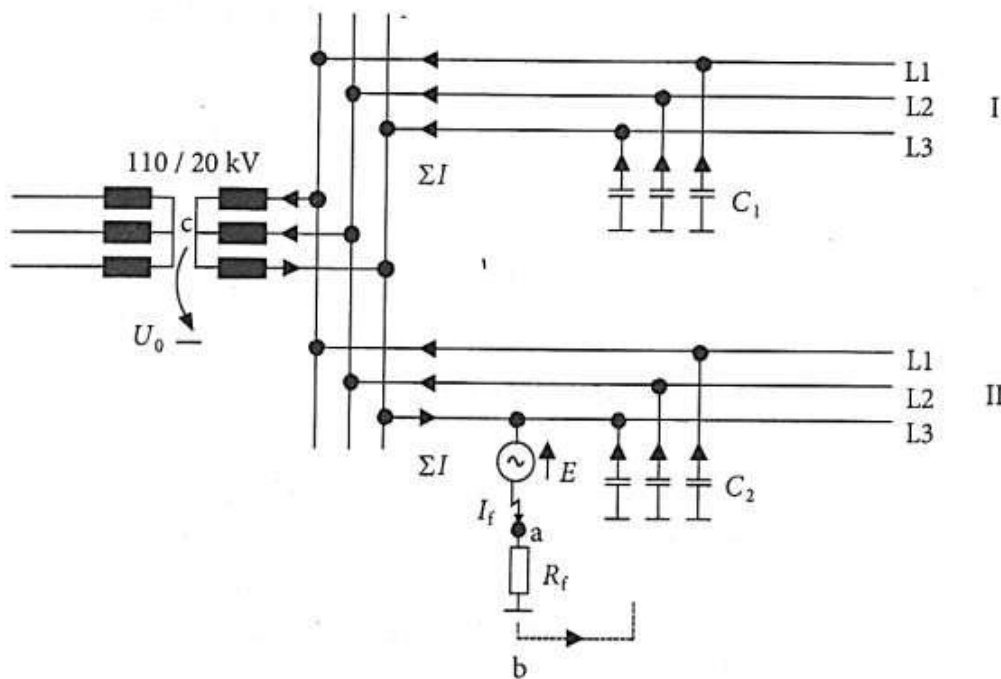
**Kuvio 21. Yksivaiheisen maasulun periaatekuva**

Keskijänniteverkon avojohdossa maasulkuvirta on noin 0,067 A/km ja maakaapelissa kaapelityypistä riippuen 2,7- 4 A/km. Kaapeleilla maasulkulaskennassa tulisikin käyttää kaapelinvalmistajien tarkkoja arvoja. Tärkeimpiä maasulun indikaattoreita ovat tähtipistejännitteen-, vaihejännitteen muutos, summavirta, yliaallot ja suurtaajuiset muutosvirrat. (Lakervi & Partanen 2008, 190.)

## 8.3.1 Maasta erotetun verkon vikavirran laskenta

Suomessa keskijänniteverkot ovat yleensä maasta erotettuja järjestelmiä. Maasta erotetussa järjestelmässä muuntajien ja generaattorien tähtipisteitä ei ole kytketty maahan.

Yksivaiheisessa maasulussa viallisen vaiheen jännite ja varausvirta pienenevät. Jännitteet ja varausvirrat kasvavat terveissä vaiheissa maata vasten. Terveiden vaiheiden varausvirrat kulkevat vikapaikan kautta muuntajan käämitykselle kuten kuviosta 22 voi havaita. Vikaresistanssi  $R_f$  pienentää maasulkuvirtaa.  $R_f$  on maan ja johtimen välinen kokonaisresistanssi. (Mörsky 1993, 298 - 301.)



**Kuvio 22.** Maasta erotetussa verkossa maasulkuvirran  $I_f$  ja nollijännitteen  $U_0$  muodostuminen yksivaiheisessa maasulussa (Lakervi & Partanen 2008, 183)

Vikaresistanssiton maasulkuvirta voidaan laskea seuraavalla kaavalla (Aura & Tonteri 1993, 164):

$$I_f = \sqrt{3}\omega C_0 U \quad (21)$$

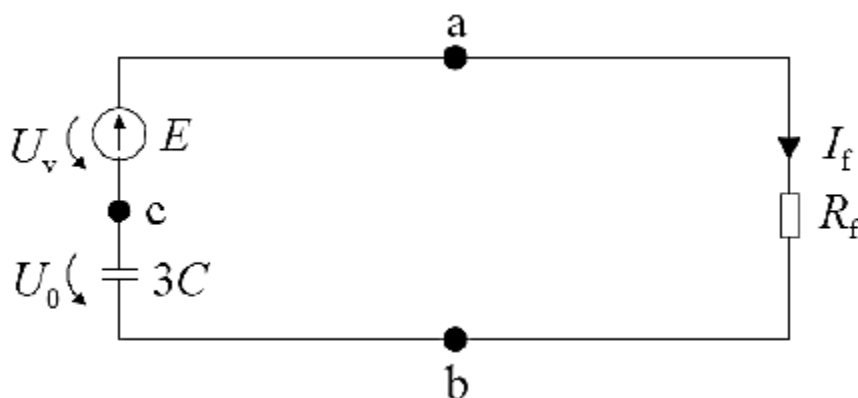
$I_f$  on maasulkuvirta (A)

$\omega$  on  $2\pi f$ ,  $f$  on taajuus. (Hz).

$C_0$  on vaiheen maakapasitanssi (F).

$U$  on nimellisjännite (V)

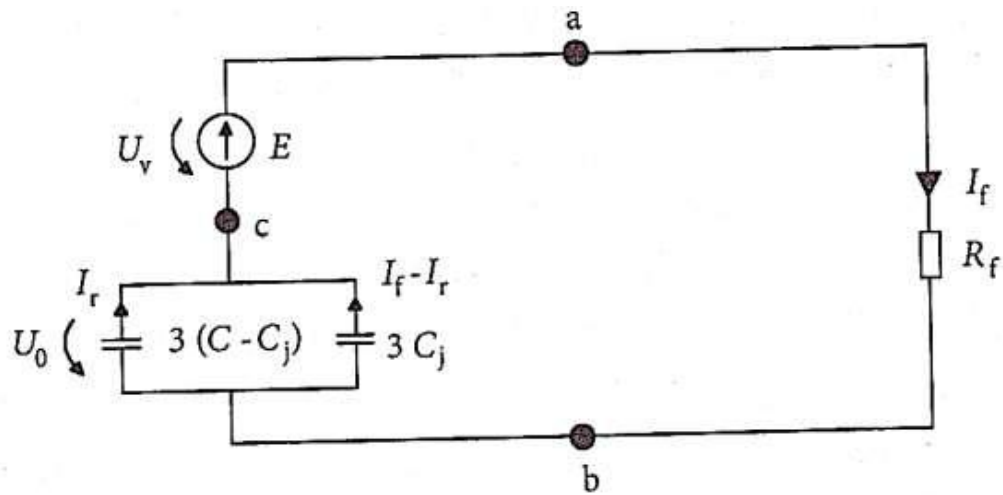
Maasulkulaskelmissa johtimien ja muuntajakäämien impedanssit ovat vaihejohtimien maakapasitansseihin  $C$  nähden hyvin pieniä, joten ne oletetaan nolliksi. Thevenin menetelmän mukainen maasta erotetun verkon sijaiskytkentä kuvio 23. (Lakervi & Partanen 2008, 183.)



**Kuvio 23. Maasta erotetun verkon maasulkuvirtapiiriin sijaiskytkentä. Jännitelähde  $E$ ,  $R_f$  vikaresistanssi ja  $3C$  koko verkon maakapasitanssi (Lakervi & Partanen 2008, 184)**

Maasulkupaikkaan sijoitetaan Thevenin jännitelähde  $E$  ja virtapiiri kulkee vikaresistanssin  $R_f$  ja verkon maakapasitanssien  $3C$  läpi. Maakapasitanssit ovat rinnan maan ja verkon tähtipisteen  $c$  välillä. (Lakervi & Partanen 2008, 184.)

Lähtöjä ollessa useampia, voidaan Thevenin sijaiskytkentä piirtää kuvio 24 mukaiseksi. Thevenin virtalähde  $E$ , Maaresistanssi  $R_f$ ,  $C$  koko verkon maakapasitanssi ja  $C_j$  vioittuneen haaran maakapasitanssi. (Lakervi 1996, 52.)



**Kuvio 24. Thevenin mukainen sijaiskytkentä useampilähtöisestä maasulkupiiristä. Piste c on verkon tähtipiste, johon verkon maakapasitanssit rinnan kytkeytyvät (Lakervi 1996, 52)**

Vikaresistanssin kautta kulkeva maasulkuvirta voidaan laskea seuraavalla kaavalla (Lakervi & Partanen 2008, 195):

$$I_f = \frac{3\omega C}{\sqrt{1+(3\omega CR_f)^2}} \times U_v \quad (22)$$

- $I_f$  on maasulkuvirta (A)
- $\omega$  on  $2\pi f$ ,  $f$  on taajuus. (Hz).
- $C$  on kokonaismaakapasitanssi (F)
- $R_f$  on vikaresistanssi ( $\Omega$ ).
- $U_v$  on vaihejännitejännite ennen vikaa (V).

Johtolähdön maasulkuvirta  $I_r$  voidaan laskea seuraavalla kaavalla (Lakervi 1996, 56):

$$I_r = \frac{C - C_j}{C} \times I_f \quad (23)$$

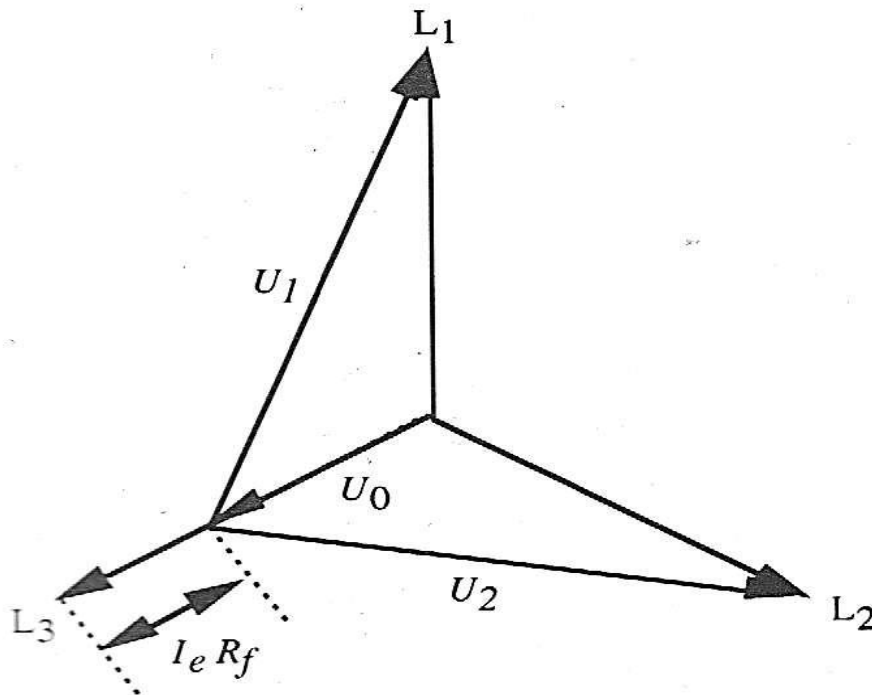
- $I_r$  on vioittuneen lähdön alkupään maasulkuvirta (A).
- $C$  on koko verkon maakapasitanssi (F).
- $C_j$  on vioittuneen lähdön maakapasitanssi (F).
- $I_f$  on kokonaismaasulkuvirta (A).

Verkon nolapisteen ja maan välille syntyy jännite-ero maasulun aikana, nolajännite  $U_0$ . Nollajännite voidaan laskea seuraavalla kaavalla (Lakervi & Partanen 2008, 195):

$$U_0 = \frac{U_v}{\sqrt{1 + (3\omega CR_f)^2}} \quad (24)$$

- $U_0$  on Nollajännite (V).  
 $U_v$  on vaihejännite (V).  
 $\omega$  on  $2\pi f$ ,  $f$  on taajuus. (Hz).  
 $C$  on verkon maakapasitanssi (F)  
 $R_f$  on maasulkuresistanssi ( $\Omega$ ).

Maasta erotetun verkon osoitinpiirros kuviosta 25 nähdään maasulkuvirran aiheuttama nolapisteen siirtyminen.



**Kuvio 25.** Maasta erotetun verkon jännitteiden osoitinpiirros.  $U_1$  ja  $U_2$  terveiden vaihejohtimien jännite.  $I_e R_f$  on vikapaikan johtimen jännite.  $U_0$  on tähtipistejännite (Aura & Tonteri 1993, 165)

Maasulkuvirta voidaan laskea myös seuraavasti, jos kaapelin tuottama maasulkuvirta tiedetään:

$$I_f = l \times A/\text{km} \quad (25)$$

$I_f$  on kokonaismaasulkuvirta (A).

$l$  on johdon pituus (km)

$A/\text{km}$  on johdon tuottama maasulkuvirta per kilometri (A/km)

Kaapelin maakapasitanssi voidaan laskea myös seuraavasti, jos kaapelin tuottama maakapasitanssi kilometriä kohti tiedetään:

$$C_k = l \times C/\text{km} \quad (26)$$

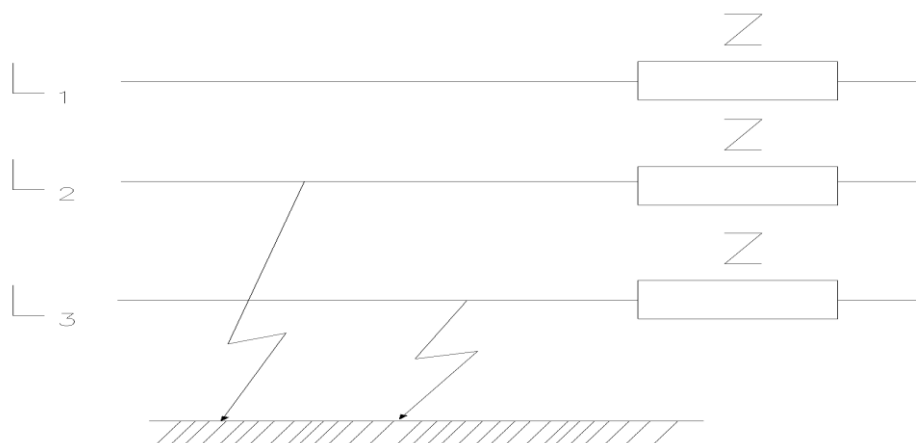
$C_k$  on kokonaismaakapasitanssi (F).

$l$  on kaapelin pituus (km)

$C/\text{km}$  on kaapelin maakapasitanssi per kilometri (F/km)

### 8.3.2 Kaksoismaasulku

Maasulku kahdessa eri vaiheessa samaan aikaan kuten kuviossa 26 on kaksoismaasulku. Vikapaikat voivat olla kaukanakin toisistaan. Kaksoismaasulussa vikavirta voi olla hyvin suuri ja voi aiheuttaa suuria vahinkoja kaapeleiden vaipoille. (Lakervi & Partanen 2008, 198.)



**Kuvio 26. Kaksoismaasulun periaatekuva**

Hyvin usein yksivaiheisena maasulkuna alkanut tilanne johtaa kaksoismaasulkuun. Nopea maasulkusuojaus ja ylijännitesuojien hyvä kunto ehkäisevät kaksoismaasulkuja. Oikosulkusuojaus yleensä laukaisee alkaneet kaksoismaasulut, koska vikavirtaa on riittävästi vikapaikoissa. (Lakervi & Partanen 2008, 198.)

### 8.3.3 Maadoitusjännite ja kosketusjännite

Maasulkupaikassa maasulkuvirta aiheuttaa maadoitusjännitteen ja siitä aiheutuu kosketusjännite. Standardissa SFS 6001 määritellään sallitut kosketusjännitteet (taulukko 4). Kosketusjännite on riippuvainen kestoajasta. (Lakervi & Partanen 2008, 187 - 188.)

**Taulukko 4. SFS 6001 standardin suurin sallittu kosketusjännite vian keston mukaan (Lakervi & Partanen 2008, 188)**

Virran kesto aika (s)	Sallittu kosketusjännite $U_{TP}$ (V)
10	80
1	102
0,9	110
0,7	132
0,6	160
0,5	215
0,4	280
0,3	390
0,2	500
0,14	600
0,04	800

Maadoitusjännite voidaan laskea seuraavalla kaavalla (Lakervi & Partanen 2008, 187):

$$U_{\text{maad}} = I_f \times R_{\text{maad}} \quad (27).$$

$U_{\text{maad}}$  on maadoitusjännite (V).

$I_f$  on maasulkuvirta (A).

$R_{\text{maad}}$  on maadoitusresistanssi



Maasulun aikana maadoitusjännite ei saa ylittää seuraavan kaavan mukaista arvoa. (Lakervi & Partanen 2008, 188.)

$$U_{\text{maad}} \leq k \times U_{\text{TP}} \quad (28)$$

$U_{\text{maad}}$  on maadoitusjännite (V).

$k$  on vakio.

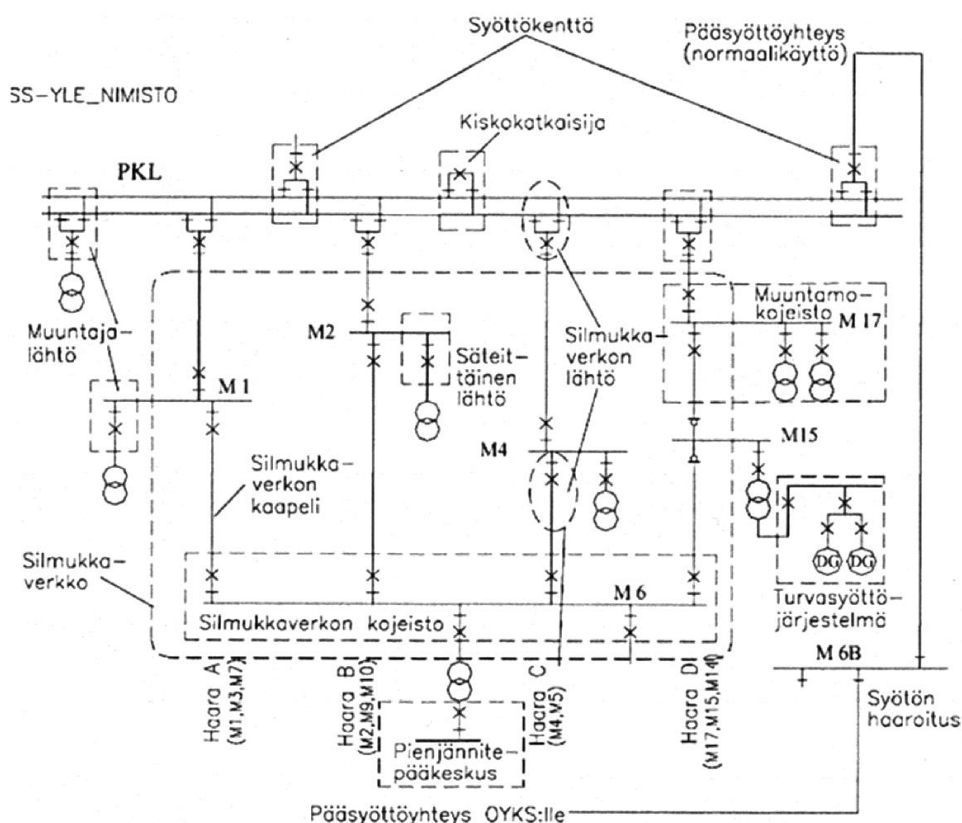
$U_{\text{TP}}$  on kosketusjännite (V).

Vakio  $k$ :n arvoksi tavoitellaan 2:ta. Huonoissa maadoitusolosuhteissa, joissa tavoitetta ei voida saavuttaa, käytetään kerrointa 4. Tällöin muuntamolle tehdään potentiaalinohjaus tai jokainen pienjännitejohtohaara maadoitetaan pituudesta riippumatta. Koko muuntopiirin ollessa erittäin huonosti johtavaa maaperää voidaan käyttää  $k$ :n arvona 5:tä. Tällöin muuntamolle tehdään potentiaalinohjaus ja jokainen liittymä maadoitetaan tai rakennuksen ympärille rakennetaan potentiaalinohjaus. (Lakervi & Partanen 2008, 188 - 189.)

Maadoituksia parantamalla, maasulkuvirtaa pienentämällä tai maasulkusuojauksen toiminta-aikaa lyhentämällä voidaan maadoitusjännitteelle asetellut vaatimukset saavuttaa. Jakamalla verkko pienempiin osiin tai käyttämällä sammutettua verkkoa voidaan maasulkuvirtaa pienentää. Keskijänniteverkoissa maasulkuvirtaa pienentämällä voidaan parantaa mahdollisuutta valokaarimaasulun itsestään sammumiseen. (Lakervi & Partanen 2008, 187 - 189.)

## 9 OYS:N SÄHKÖVERKKO

OYS:n keskijänniteverkkoa voidaan syöttää kolmesta eri paikasta (liite 1 kuvio 27). Pääsyöttösuunta pääkytkinlaitoksen PKL/12 kautta tulee Oulunsuun sähköasemalta. Pääsyöttösuunnan tuleva kaapeli on haaroitettavissa M6B-kojeistossa PKL:lle tai M6/06:lle. Varasyöttöyhteys PKL:lle on muuntamon M8 kautta OE:n verkosta. Oikosulkuun teho tulee OE:n verkosta. Tehoa vikakohtaan virtaa kaikkien mahdollisten johdinyhteyksien kautta sieltä mistä sitä on saatavissa.



**Kuvio 27. Pääsyöttötilanne syöttö tulee Oulunsuun sähköasemalta M6B kojeiston kautta pääkytkinlaitokselle. Energia jaetaan säteilijäisille muuntajalähdöille ja silmukkaverkkoon pääkytkinlaitoksen kautta. Silmukkaverkossa on neljä haaraa A, B, C ja D**

Esimerkkiverkko on rakennettu silmukoiduksi ja käytetään silmukoituna. Normaalisti tällaista rakennetta ei käytetä keskijännitteellä, mutta nyt on haluttu varmistaa sähkön katkeamaton saanti. Nykyinen keskijänniteverkko on suunniteltu toimimaan sähköverkon huolto- ja korjaustöiden ajan sähkön saannin häiriintymättä. Sähkönjakelun käyttövarmuutta on parannettu järjestämällä sähkönsyöttö useampaa siirtoreittiä pitkin.

Kaikissa galvaanisesti yhteen kytketyissä johtimissa kehittyä maasulkuvirtaa. Syöttösuunta on tarkastelupisteestä vikaan päin oleva suunta. Teho säteittäisessä verkossa tulee yhtä haaraa pitkin, mutta silmukoidussa verkossa vikaan tulee tehoa aina kahdesta tai useammasta suunnasta. Esimerkiverkossa kaikista PKL:n johtolähdöistä tulee tehoa vikakohtaan.

### 9.1 Pääsyöttösuunta pääkytkinlaitoksen kautta (normaalikäyttö)

Kuviossa 27 on pääsyöttösuunnan periaatekuva. Piirros ei vastaa täysin yleiskaaviota. Todellisuudessa silmukkaverkossa on enemmän kojeistoja ja niissä säteittäisiä muuntajalähtöjä.

Pääkytkinlaitokselta lähtee säteittäisiä muuntajalähtöjä ja silmukkaverkko, joka sisältää neljä haaraa A, B, C ja D. Silmukkaverkon haarat A, B ja C ovat keskenään identtisesti suojattuja, mutta haara D on lievemmin suojattu. PKL:lta lähtevissä silmukkaverkon haaroissa A, B ja C on kaksiportainen vakioaikaylivirtasuojaus 200 A 0,8 s ja 500 A 1 s sekä haarassa D 250 A 0,8 s ja 600 A 1 s. Haaroissa A, B ja C kaikkien kaapeleiden päissä on pitkittäisdifferentiaalisuojat, jotka laukaisevat kaapeleissa sattuvat oikosulut jännitteettömiksi 20 ms:n kuluttua. Tätä suojaa haarassa D ei ole.

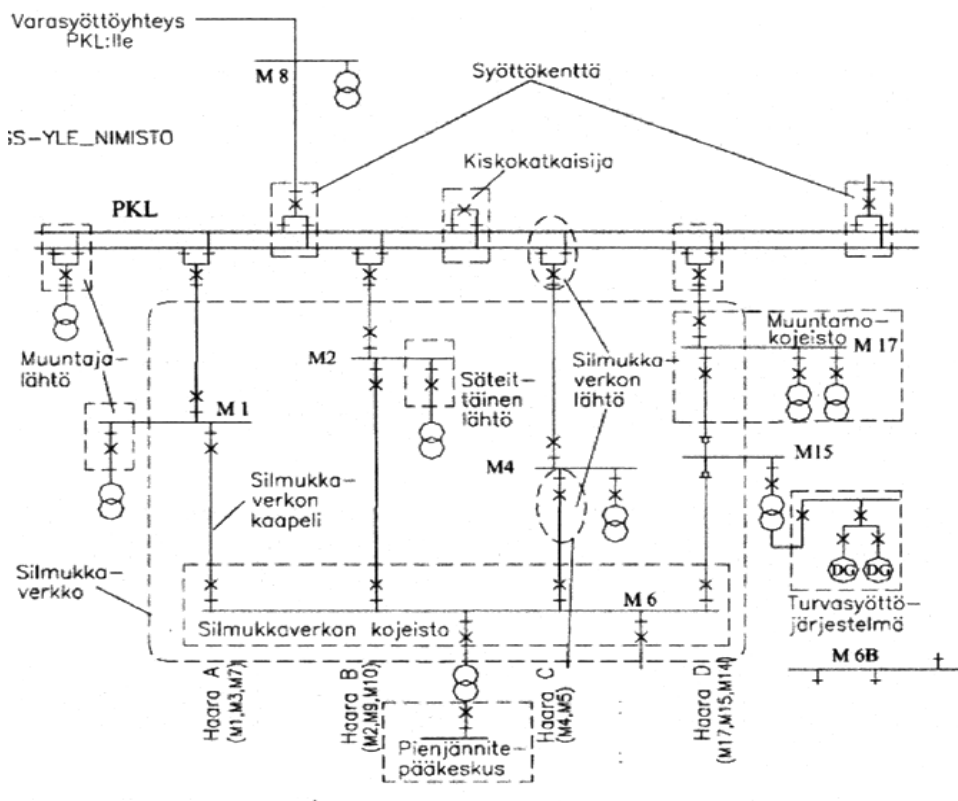
Silmukkaverkon haarojen A, B ja C kojeistojen molemmilla puolilla on suunnatut käänteisaikaoikosulkusuojat, ja suuntaus on kojeistosta syöttösuuntaan. Silmukkaverkon kojeistossa tapahtuvan oikosulun laukaisun suorittaa vikapaikan syöttösuunnassa ensimmäisenä olevan kojeiston suunnatut ylivirtareleet noin 0,8 - 0,15 sekunnin viiveellä. Nämä releet toimivat samalla myös muuntajalähtöjen varasuojina. Silmukkaverkon haarassa D on kaksiportainen ylivirtasuojaja, ja maasulkusuojaja PKL:lla, M6 ja M17 kojeistoissa on käänteisaikaylivirtasuojaus. Kojetoissa M17 ja M6 ylivirtasuojaja on suunnattu. Muissa D-haaran kojeistolähdöissä on vain kuormaerottimet. Säteittäiset muuntajalähdöt kojeistossa M17 on suojattu kaksiportaisella suuntaamattomalla ylivirta- ja kaksiportaisella suunnatulla maasulkusuojajalla.

PKL ja M6 kojeistosta lähtevissä lähdöissä on suunnattu maasulkusuojaus. M6-kojeistossa on myös maasulun jänniterele ja vikatapauksessa maasulkuvirta synnyttää M6 kojeistolle maasulkujännitteen. Kun jännite ylittää maasulkujännitereleen asettelu-

arvon, kiskokatkaisija laukaisee M6-kojeistossa haarat A, B ja D auki, ja verkkoa syötetään tämän jälkeen säteittäisesti. PKL/14 kennotermiäli välittää valvonta- ja ohjausjärjestelmään kentän erottimien ja katkaisijan asentotiedot ja hälytykset. Ohjausjärjestelmä myös antaa katkaisijan auki- ja kiinniohjauskäskyt.

## 9.2 Varasyöttösuunta pääkytkinlaitoksen kautta

Varasyöttötilanteessa syöttö tulee OE:lta M8:n kautta pääkytkinlaitokseen, kuten kuvio 28 voi nähdä. PKL/14:n ylivirtasuojaukset ja releen laukaisukosketin on kytketty pois käytöstä ja verkkoa käytetään samoin kuin normaalisyötöllä.

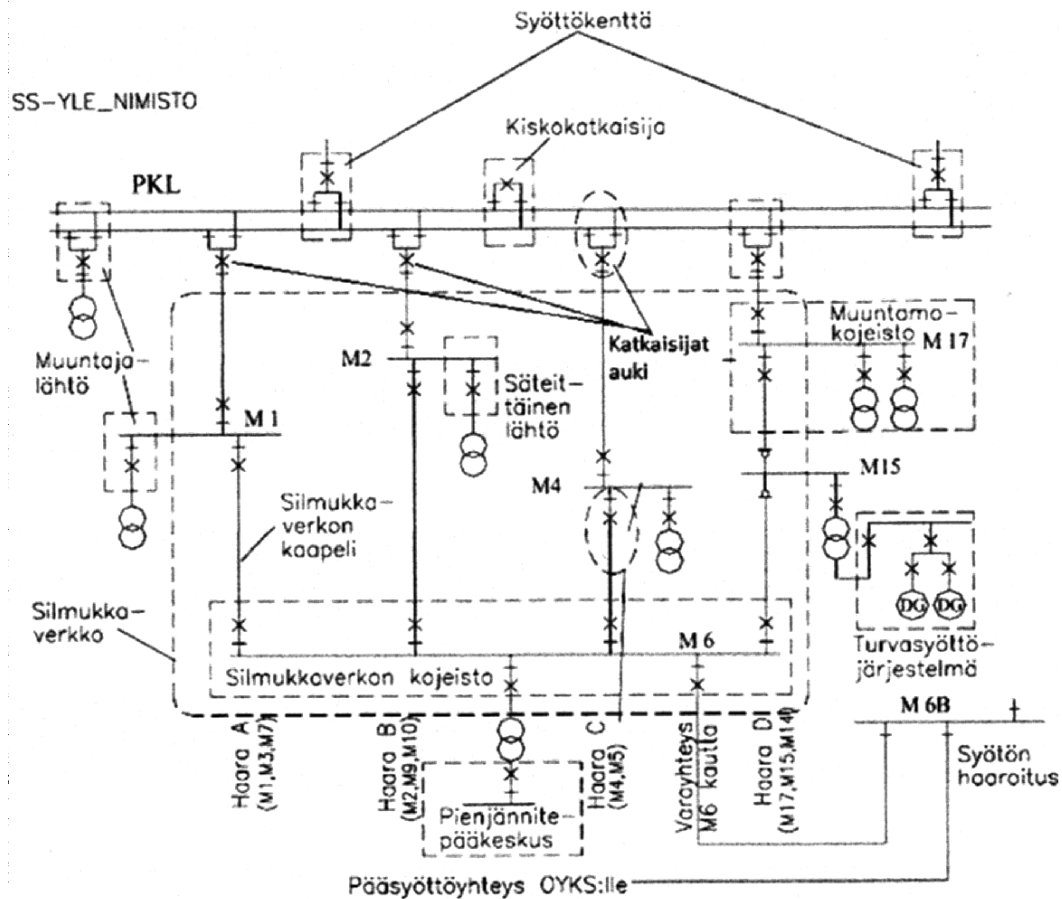


**Kuvio 28.** Varasyöttötilanne energia tulee OE:lta M8:n kautta pääkytkinlaitokseen. Energia jaetaan säteittäisille muuntajalähdöille ja silmukkaverkkoon pääkytkinlaitoksen kautta. Silmukkaverkossa on neljä haaraa A, B, C ja D

PKL/14-kennotermiäli välittää valvonta ja ohjausjärjestelmään kentän erottimien ja katkaisijan asentotiedot ja hälytykset. Ohjausjärjestelmä myös antaa katkaisijan auki- ja kiinniohjauskäskyt.

## 9.3 Erittäin harvinainen poikkeustilannekäyttö muuntamon M6 kautta

Erittäin harvinainen poikkeustilannekäyttö muuntamon M6 kautta, silmukoitu verkko purettava avaamalla käsin kolme katkaisijaa pääkytkinlaitokselta. Suositeltavin kytkentä on esitetty kuviossa 29, koska haara D:llä on suurin tehonsyöttökyky.



**Kuvio 29.** Syötön tullessa muuntamon M6 kautta täytyy avata käsin pääkytkinlaitokselta A, B ja C haarojen katkaisijat. Verkko muuttuu säteittäiseksi ja suojaukset toimivat oikein

#### 9.4 Tulevaisuuden suunnitelmat

Oulun yliopistollinen sairaala on aloittamassa laajan saneerausohjelmaan, joka kestää noin 15 vuotta. Keski-jänniteverkon saneerauksella pitäisi ennakoita tulevia muutoksia. Lastenkaaren rakennukseen on tulossa suuri saneeraus, tai se voidaan joutua purkamaan pois uuden rakennuksen tieltä. Eteläpäätyyn on tulossa uusia rakennuksia, ja ne tarvitsevat ehkä uuden muuntamon tai muuntamoita. PKL:n poistamista on ehdotettu, koska se on kallis kokonaisuus pitää toimintakunnossa.

## 10 OIKOSULKUPIIRIN IMPEDANSSIT

Syöttävien verkkojen oikosulkuvirrat on esitetty taulukossa 5.

**Taulukko 5. Syöttöjen maksimi- ja minimoikosulkuvirrat ennen päämuuntajaa**

Syöttö	Maksimi ( kA )	Minimi ( kA )
Pääsyöttö	12,6	2,15
Varasyöttö	6,05	2,42

## 10.1 Syöttävät verkot

Oulun Energialta saatuja maksimi- ja minimivirtoja vastaavat impedanssiarvot saadaan laskettua kavalla 9. Kerroin  $c$  on taulukossa 2. Maksimioikosulkuvirtalaskuissa käytetään kerrointa 1,10 ja minimoikosulkulaskuissa kerrointa 1,0. Laskut on esitetty liitteessä 2 ja tulokset taulukossa 6.

Varasyöttösuunta lasketaan samalla tavalla ja tulokset viedään taulukkoon 6.

**Taulukko 6. Syöttöjen 20 kV:n puolelle redusoidut resistanssi, reaktanssi ja impedanssi**

Syöttö	Min / Max	$R'_S$ ( $\Omega$ )	$X'_S$ ( $\Omega$ )	$Z'_S$ ( $\Omega$ )
Pääsyöttö	Max	0,0201	0,2012	0,2022
Pääsyöttö	Min	0,1070	1,070	1,0756
Varasyöttö	Max	0,0419	0,4187	0,4208
Varasyöttö	Min	0,0952	0,9517	0,9565

## 10.2 Muuntajat

Muuntajien reaktansseja ja resistansseja tarvitaan oikosulkulaskennassa. Muuntajien kilpitiedot on taulukossa 7.

**Taulukko 7. Muuntajien teknisiä tietoja**

Muuntaja	U ( kV / kV )	P <sub>k</sub> ( kW )	Z <sub>k</sub> ( % )	S ( kVA )
PM pääsyöttö	110/ 21	59,3	10,23	10 000
PM varasyöttö	110/21	105	9,81	25 000
800	20 / 0,4	7,7	4,9	800
1250	20 / 0,4	9,7	5,09	1250

Muuntajan kilpitietoja hyväksi käyttäen voidaan laskea oikosulkuimpedanssi kaavalla 2. Nimellisjännitteeksi valitaan se jänniteporras, jossa oikosulkulaskenta tehdään. Esi-merkkilasku on esitetty liitteessä 3 ja tulokset taulukossa 8.

**Taulukko 8. Muuntajien oikosulkuresistanssit ja reaktanssit PM 20 kV:n tasolle ja 800 ja 1250 kVA:n muuntajat 400 V:n jännitetasolle laskettuna**

Muuntaja	20 kV	0,4 kV	R <sub>m</sub> (Ω)	X <sub>m</sub> (Ω)	Z <sub>m</sub> (Ω)
PM pääsyöttö	x		0,2615	4,5038	4,5114
PM varasyöttö	x		0,0741	1,7289	1.7305
800 kVA		x	0,0019	0,0096	0,0098
1250 kVA		x	0,0010	0,0064	0,0065

## 10.3 Kaapelit

OYS:n keskijänniteverkossa on käytetty kolmenlaista kaapeleita, joiden sähköiset ominaisuudet löytyvät taulukosta 9.

**Taulukko 9. Kaapelien resistanssit + 40°C:ssa ja reaktanssit /km**

Kaapeli	Vaiheresistanssi R <sub>v</sub> Ω/ km lämpötilassa + 40 °C	Vaihereaktanssi X <sub>v</sub> Ω / km
APYAKMM 3x120	0,283	0,115
APAYKMM 3x185	0,189	0,107
AHXAMK 3x185	0,183	0,119

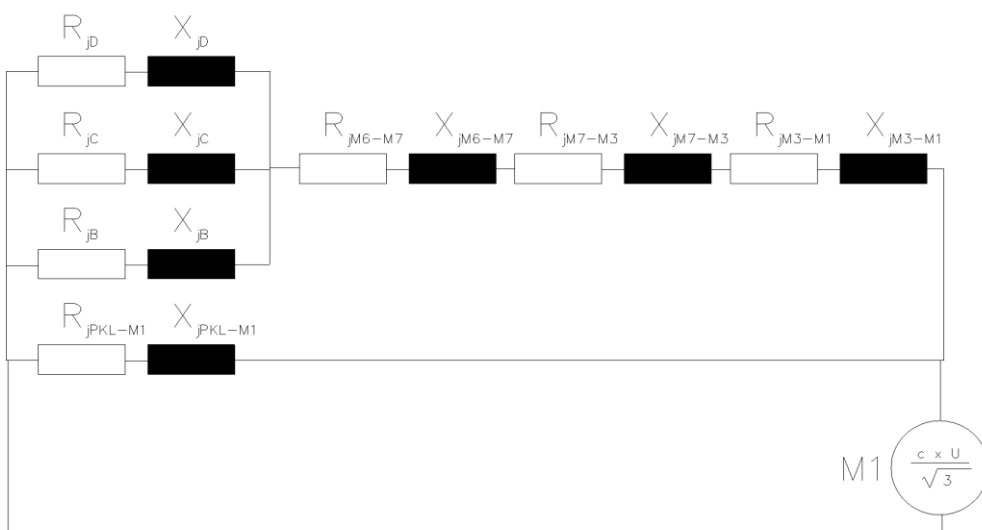


Kaapelien oikosulkulaskuissa tarvittavat resistanssit voidaan laskea kaavalla 5, kun vaiheresistanssi +40 asteessa tiedetään. Kaapelien reaktanssit voidaan laskea kaavalla 6. Esimerkkilasku on esitetty liitteessä 4 ja tulokset liitteessä 5. Taulukossa 10 on esitetty PKL-M6 haarojen A, B, C ja D kokonaisimpedanssit.

**Taulukko 10. Silmukkaverkon PKL-M6 haarojen kokonaisimpedanssit + 40°C:ssa**

Haara	Pituus (m)	$R_j (\Omega)$	$X_j (\Omega)$	$Z_j (\Omega)$
A	625	0,177	0,072	0,191
B	1120	0,317	0,129	0,342
C	613	0,173	0,070	0,187
D	889	0,163	0,106	0,194

Yleiskaaviota (liite 1) katsottaessa esimerkiksi silmukkaverkon kojeistoon M1 tulee kaapeli kahdesta suunnasta, jos syöttösuunta on PKL:lta päin. Kuviossa 30 on piirretty johtojen impedanssit PKL - M1. Lasketaan PKL - M1 impedanssit. Toistetaan sama operaatio kaikkien silmukkaverkon kojeistojen kohdalla ja tulokset viedään taulukkoon 11. Laskutoimitukset on esitetty liitteessä 6. Impedansseissa ei ole otettu huomioon syöttöjä, koska PKL:lle tulee syöttö kahdesta eri suunnasta. Syötön impedanssi lisätään oikosulkulaskennan yhteydessä.



**Kuvio 30. Periaatekuva impedansseista kojeiston PKL - M1**

**Taulukko 11. Silmukkaverkon PKL-kojeisto oikosulkulaskennassa tarvittavia resistansseja, reaktansseja ja impedansseja. Syöttösuunta PKL**

Kojeisto	$R_j (\Omega)$	$X_j (\Omega)$	$Z_j (\Omega)$
M1	0,022	0,009	0,024
M3	0,057	0,024	0,062
M7	0,061	0,026	0,066
M2	0,051	0,021	0,055
M9	0,069	0,038	0,078
M10	0,091	0,038	0,099
M4	0,057	0,024	0,062
M5	0,060	0,026	0,065
M17	0,044	0,027	0,051
M15	0,053	0,032	0,062
M14	0,055	0,029	0,063
M6	0,048	0,022	0,053

Syöttösuunta on M6-kojeistosta päin, ja silmukkaverkko on purettu (kuvio 29). Laskeaan säteittäisten haarojen M6-kojeistojen impedanssit ja viedään ne taulukkoon 12. Impedansseissa ei ole otettu huomioon syöttöjohtoa. Syötön impedanssi lisätään oikosulkulaskennan yhteydessä. Laskenta tehdään, kuten edellisessä kohdassa.

**Taulukko 12. Silmukkaverkko purettuna. Kojestojen oikosulkulaskennassa tarvittavia resistansseja, reaktansseja ja impedansseja. Syöttösuunta M6**

Kojeisto	$R_j (\Omega)$	$X_j (\Omega)$	$Z_j (\Omega)$
M1	0,152	0,062	0,164
M3	0,084	0,034	0,091
M7	0,050	0,020	0,054
M2	0,254	0,103	0,274
M9	0,151	0,061	0,163
M10	0,105	0,043	0,114
M4	0,080	0,033	0,086
M5	0,054	0,022	0,058
M17	0,104	0,068	0,124
M15	0,081	0,052	0,096
M14	0,024	0,015	0,028

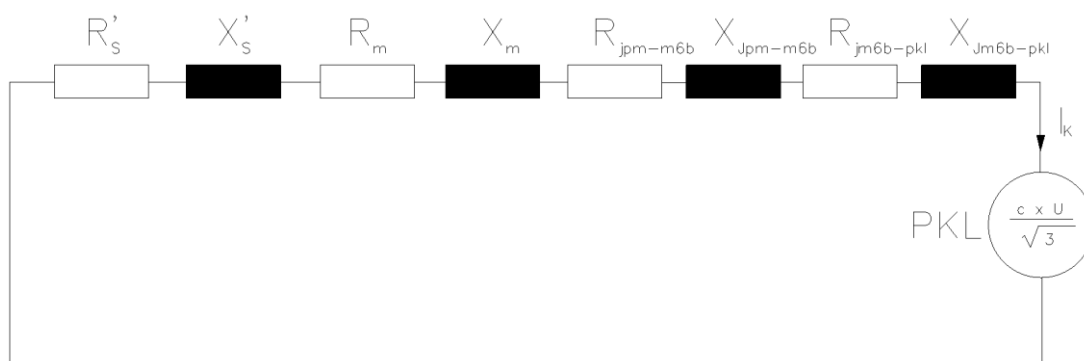
## 11 VIKAVIRRAT

### 11.1 Oikosulkuvirrat

Alkuoikosulkuvirrat  $I_k''$  lasketaan Thevenin teoreeman mukaisesti. Oikosulkupaikkaan sijoitetaan jännitelähde sekä muodostetaan resistansseista ja reaktansseista sijaiskytkentä syöttösuuntaan nähden.

#### 11.1.1 Pääsyöttösuunta pääkytkinlaitoksen kautta

Tehdään sijaiskytkentä pääsyöttösuunnasta PKL:lle (kuvio 31).



**Kuvio 31. PKL:lle Thevenin sijaiskytkentä**

Resistanssit ja reaktanssit voi laskea erikseen normaaleja sarjan kytkentäkaavoja käyttäen. Resistanssien ja reaktanssien arvot on taulukoista 6, 8 ja liitteestä 5.

$$R_{kmax} = R'_{smax} + R_m + R_{jpm-m6b} + R_{jm6b-pkl}$$

$$R_{kmax} = 0,0201\Omega + 0,2615\Omega + 0,476\Omega + 0,093\Omega = 0,8506\Omega$$

$$X_{kmax} = X'_{smax} + X_m + X_{jpm-m6b} + X_{jm6b-pkl}$$

$$X_{kmax} = 0,2012\Omega + 4,5038\Omega + 0,309\Omega + 0,061\Omega = 5,0750\Omega$$

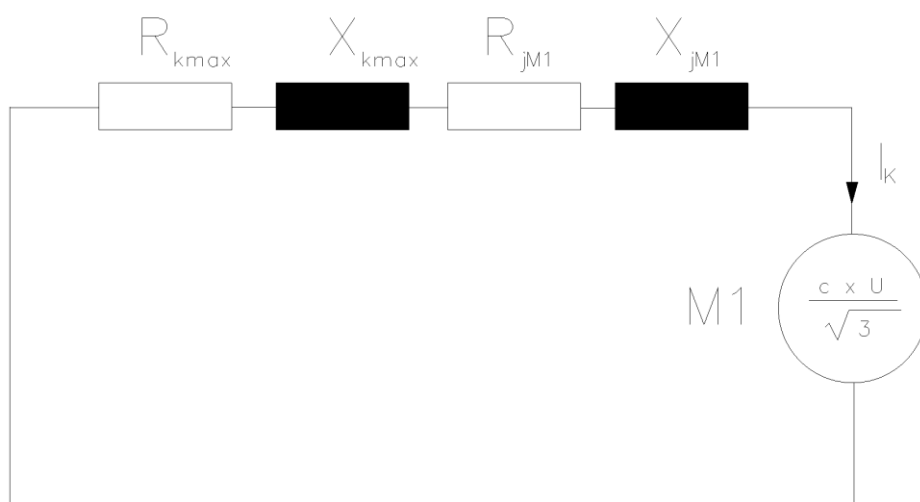
Kokonaisimpedanssi voidaan laskea kaavalla 15.

$$Z_{kmax} = \sqrt{(0,8506\Omega)^2 + (5,0750\Omega)^2} = 5,1458\Omega$$

Lasketaan maksimioikosulkuvirta PKL:lle pääsyöttösuunnasta kaavalla 9.

$$I''_{kmax} = \frac{1,1 \times 21 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times 5,1458 \Omega} = 2,59 \text{ kA}$$

Lasketaan M1-kojeistoon oikosulkuvirrat. Käytetään hyväksi edellistä laskua ja saadaan sijaiskytkentä (kuvio 32).



**Kuvio 32. Thevenin mukainen sijaiskytkentä kojeistoon M1**

Taulukossa 11 on silmukkaverkon resistanssit ja reaktanssit. Resistanssit ja reaktanssit voi laskea erikseen normaaleja sarjaan kytkentäkaavoja käyttäen. Esimerkkilasku on esitetty liitteessä 8. Kaikkien kojeistojen oikosulkuvirrat lasketaan ja viedään ne taulukoon 13. Aina tehdään oikosulkupaikkaan Thevenin mukainen sijaiskytkentä.

**Taulukko 13. Kojeistojen oikosulkuvirrat, keskijänniteverkko. Pääsyöttösuunta OE - M6B - PKL**

Oikosulkupaikka	Oikosulkuvirta $I_k''$ Maksimi ( kA )	Oikosulkuvirta $I_K''$ Minimi ( kA )	Oikosulkuvirta $I_{k2}''$ Minimi ( kA )
PM toisio	2,83	2,17	1,88
PKL	2,59	2,01	1,74
M1	2,59	2,01	1,74
M3	2,57	2,00	1,74
M7	2,57	2,00	1,73
M2	2,58	2,01	1,74
M9	2,57	2,00	1,73
M10	2,57	2,00	1,73
M4	2,58	2,00	1,74
M5	2,57	2,00	1,73
M17	2,57	2,00	1,74
M15	2,57	2,00	1,73
M14	2,57	2,00	1,73
M6	2,58	2,00	1,74
M6B	2,63	2,04	1,77

### 11.1.2 Varasyöttösuunta pääkytkinlaitoksen kautta

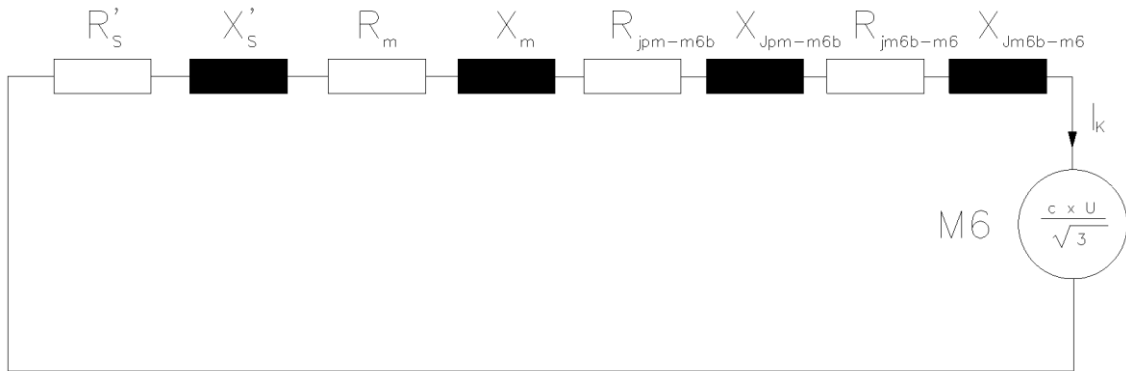
Oikosulkuvirrat lasketaan samoin kuin edellisessä kohdassa, mutta käytetään varasyöttösuunnan arvoja. Tulokset viedään taulukkoon 14.

**Taulukko 14. Kojeistojen oikosulkuvirrat, keskijänniteverkko. Varasyöttösuunta OE - PKL**

Oikosulkupaikka	Oikosulkuvirta $I_k''$ Maksimi ( kA )	Oikosulkuvirta $I_k''$ Minimi ( kA )	Oikosulkuvirta $I_{k2}''$ Minimi ( kA )
PM toisio	6,20	4,51	3,91
PKL	4,59	3,54	3,07
M1	4,57	3,52	3,05
M3	4,52	3,50	3,03
M7	4,52	3,50	3,03
M2	4,53	3,50	3,03
M9	4,50	3,48	3,02
M10	4,48	3,47	3,01
M4	4,52	3,50	3,03
M5	4,52	3,50	3,03
M17	4,53	3,50	3,03
M15	4,52	3,49	3,03
M14	4,52	3,50	3,03
M6	4,53	2,30	3,03

### 11.1.3 Syötön tullessa kojeiston M6 kautta

Pääsyöttöyhteys haarautuu M6B-kojeistossa ja syöttösuunta voidaan vaihtaa kulkemaan M6A:n kautta (kuvio 29). Silmukoitu verkko puretaan avaamalla A-, B- ja C-haarojen katkaisijat, ja verkko toimii tämän jälkeen säteittäisenä. Tehdään Thevenin mukainen sijaiskytkentä kojeistoon M6 (kuvio 33). Resistanssit ja reaktanssit voi laskea erikseen normaaleja sarjaankytkentä kaavoja käyttäen. Resistanssien arvot saadaan taulukoista 6, 8 ja 12. Esimerkkilaskenta on liitteessä 8.



**Kuvio 33. Thevenin mukainen sijaiskytkentä kojeistoon M6. Pääsyöttösuunta M6 kojeiston kautta**

Lasketaan kaikkien kojeistojen oikosulkuvirrat ja viedään tulokset taulukko 15.

**Taulukko 15. Kojeistojen oikosulkuvirrat, keskijänniteverkko. Pääsyöttösuunta OE-M6B-M6**

Oikosulkupaikka	Oikosulkuvirta $I_k''$ Maksimi ( kA )	Oikosulkuvirta $I_k''$ Minimi ( kA )	Oikosulkuvirta $I_{k2}''$ Minimi ( kA )
PKL	2,56	2,00	1,73
M1	2,59	2,01	1,74
M3	2,61	2,02	1,75
M7	2,61	2,03	1,76
M2	2,56	1,99	1,72
M9	2,59	2,01	1,74
M10	2,60	2,02	1,75
M4	2,61	2,02	1,75
M5	2,61	2,03	1,76
M17	2,59	2,01	1,74
M15	2,60	2,02	1,75
M14	2,62	2,03	1,76
M6	2,63	2,04	1,77
M6B	2,63	2,04	1,77

#### 11.1.4 Dynaaminen ja terminen kestoisuus

Lasketaan kojeistojen suurimman oikosulkuvirran mukainen dynaaminen kesto kojeistoille, laskut on esitetty liitteessä 9. Suurin kolmivaiheinen oikosulkuvirta tulee varasyöttöyhteyden kautta PKL:lle. OYS:n keskijännitekojeistojen tulee kestää dynaamista oikosulkuvirtaa 9,56 kA ja termistä oikosulkuvirtaa 4,82 kA.

OYS:n erottimet ja virtamuuntajat kestävät 10 kA 1s:n termisen rasituksen ja 25 kA:n dynaamisen rasituksen. Katkaisijat kestävät 15 kA:n termisen rasituksen, ja katkaisukyky on 250 MVA sekä nimellisvirta 400 A. Muuntajien terminen kesto on pienimmillään 14,4 kA ja kaapeleilla 12,5 kA. Edellä olevin tietojen perusteella OYS:n terminen oikosulukestoisuus keskijänniteverkon osalta on 10 kA 1 s:n ja dynaaminen 25 kA.

Lasketaan pisin laukaisuaika jonka OYS:n keskijännitekojeistot kestävät termisesti kaavalla 20.

$$t = \frac{(10 \text{ kA})^2}{(4,82 \text{ kA})^2} = 4,3 \text{ s.}$$

#### 11.1.5 Oikosulkuvirrat pienjännitemuuntajissa

Releasettelu kannalta tarvitsee tietää kuormitusvirran ja muuntajan kytkentävirtasysäyksen lisäksi pienjännitemuuntajan toision pienimmät kolmivaihe ja kaksivaiheinen alkuoikosulkuvirta ja miten ne näkyvät ensiöpuolella. Laskentaesimerkki liitteessä 10 ja tulokset taulukossa 16.

Oikosulkuvirta riippuu paljon muuntajasta. 1250 kVA muuntajia on M1 ja M17 lopuissa 800 kVA:n muuntajia.



**Taulukko 16. Pienjännitemuuntajan minimi kolmivaihe alkuoikosulkuvirrat toisiossa. Kolmivaiheinen ja kaksivaiheinen alkuoikosulkuvirta näkyy ensiössä taulukon näyttämin arvoin**

Oikosulkupaikka muuntajan toisio	Oikosulkuvirta $I_k''$ Minimi ( kA )	Oikosulkuvirta $I_k''$ näkyy ensiössä (A)	Oikosulkuvirta $I_{k2}''$ näkyy ensiössä (A)
M1	24,6	492	246
M3	18,0	359	180
M7	18,0	359	180
M2	18,0	359	180
M9	17,9	359	179
M10	17,9	359	179
M4	18,0	359	180
M5	18,0	359	180
M17	24,6	491	246
M15	18,0	359	180
M14	18,0	359	180
M6	18,0	359	180

## 11.2 Maasulkuvirrat

OYS:n keskijänniteverkko on maasta erotettu verkko. Silmukkaverkossa maasulkuvirta jakautuu kahteen tai useampaan haaraan. Vikatapauksessa maasulkuvirta synnyttää M6-kojeistolle maasulkujännitteen, ja kun jännite ylittää maasulkujännitereleen asetteluarvon kiskokatkaisija laukaisee M6-kojeistossa haarat A, B ja D auki, verkkoa syötetään tämän jälkeen säteittäisesti. Laskennan helpottamiseksi oletetaan M6-kiskokatkaisijan launneen ja verkkoa syötetään säteittäisesti. Lasketaan galvaanisesti yhteydessä olevan verkon kokonaismaasulkuvirta sekä eri johtolähtöjen maasulkuvirrat. Taulukossa 17 on OYS:n keskijänniteverkossa käytössä olevien kaapelien teknisiä arvoja.

**Taulukko 17. OYS:n keskijänniteverkossa käytössä olevien kaapelien teknisiä tietoja**

Kaapeli	Maakapasitanssi C ( nF / km)	Maasulkuvirta I <sub>f</sub> (A / km)
APYAKMM 3x120	350	3,5
APYAKMM 3x120	410	4,0
AHXAMK 3x185	260	2,8

Lasketaan haaran A maakapasitanssi kaavalla 26, kun haara on lauennut irti kojeistosta M6-kiskokatkaisijan toimesta ja sähköverkkoa syötetään säteittäisesti PKL: kautta.

$$C_A = 625 \times 10^{-3} \text{ km} \times 350 \text{ nF} = 218,75 \text{ nF}.$$

Lasketaan kaikkien PKL:lta lähtevien haarojen maakapasitanssit ja viedään ne taulukkoon 18.

**Taulukko 18. Maakapasitanssit C haaroittain OYS keskijänniteverkko**

Pää syöttö	Vara syöttö	A nF	B nF	C nF	D nF	M11 nF	M12 nF	M16 nF	LTK1 nF
811,2	1329	226,1	392,0	221,9	235,4	11,1	17,5	50,2	94,4

Lasketaan paljonko maasulkuvirtaa haara A tuottaa kaavalla 25, kun kiskokatkaisija M6:ssa on auki.

$$I_{fA} = (88+240+120+177+60) \times 10^{-3} \text{ km} \times 3,5 \text{ A/km} = 2,4 \text{ A}$$

Lasketaan kaikkien haarojen tuottama maasulkuvirta kaavalla 25, kun M6 kiskokatkaisija on auki ja viedään tulokset taulukkoon 19.

**Taulukko 19. Haarojen tuottama maasulkuvirta, kun kiskokatkaisija on laukaissut ne irti M6 kojeistosta**

A	B	C	D	M10	M11	M16	LTK1
A	A	A	A	A	A	A	A
2,4	4,1	2,4	2,6	0,2	0,2	0,6	1,1

### 11.2.1 Pääsyöttösuunta

Pääsyöttösuunnasta syötettäessä galvaanisessa yhteydessä ovat Oulunsuun sähköasemalta lähtevä kaapeli joka haarautuu M6B-kojeistossa PKL:lle ja M6-kojeistolle sekä PKL:sta lähtevät kaapelit. Lasketaan  $U_0$  jännite vikaresistanssin ollessa 0, 1000, 2000 ja 3000  $\Omega$  ja viedään tulokset taulukkoon 20. Esimerkkilasku on esitetty liitteessä 11.

**Taulukko 20.  $U_0$ -jännite vikaresistansseilla 0, 500, 1000, 2000 ja 3000  $\Omega$  pääsyöttösuunnasta syötettäessä**

Vikaresistanssi ( $\Omega$ )	0	500	1000	2000	3000
$U_0$ (kV)	11,55	8,29	5,29	2,88	1,95

Normaalitilanteessa LTK1 haara ei tuota maasulkuvirtaa verkkoon, koska on PKL:n katkaisijan toimesta irti verkosta. Lasketaan normaalitilanteessa viallisen haaran releen näkemä maasulkuvirta kun maasulkuresistanssi on 0, 500, 1000, 2000 ja 3000  $\Omega$ . Esimerkkilasku on esitetty liitteessä 11. Verkon tuottama kokonaismaasulkuvirta  $I_f$  on tässä tilanteessa 21,39 A, ja maasulkuvirrat eri tilanteissa on esitetty taulukossa 21.

**Taulukko 21. Viallisen haaran releen näkemä maasulkuvirta  $I_r$  kun kiskokatkaisija on lauennut M6:ssa ja maasulkuresistanssin ollessa 0, 500, 1000, 2000 tai 3000  $\Omega$ . Syöttö pääsyöttö yhteyden kautta**

Maaresistanssi $\Omega$	A	B	C	D	M11	M12	M16	LTK1
	A	A	A	A	A	A	A	A
3000	3,35	3,03	3,36	3,33	3,77	3,75	3,69	3,62
2000	4,93	4,46	4,94	4,91	5,54	5,52	5,43	5,33
1000	8,99	8,13	9,01	8,94	10,10	10,07	9,90	9,79
500	13,89	12,56	13,92	13,81	15,60	15,55	15,29	15,35
0	18,93	17,12	18,97	18,83	21,27	21,20	20,84	21,39

### 11.2.2 Varasyöttösuunta

Sähköä syötettäessä varasyöttösuunnasta OYS:n keskijänniteverkkoon galvaanisessa yhteydessä ovat Yläsiirtolasta lähtevä OE:n syöttökaapeli ja PKL:sta lähtevät kaapelit. Lasketaan kuten pääyhteys.  $U_0$  jännitteet taulukko 22 ja haarojen virrat taulukkoon 23. Pääsyöttö on tällöin irti PKL ja M6:lta. Verkon tuottama kokonaismaasulkuvirta  $I_f$  on tässä tilanteessa 27,02 A

**Taulukko 22.  $U_0$ -jännite vikaresistansseilla 0, 500, 1000, 2000 ja 3000 $\Omega$  varasyöttösuunnasta syötettäessä**

Vikaresistanssi ( $\Omega$ )	0	500	1000	2000	3000
$U_0$ (kV)	11,55	7,34	4,40	2,33	1,57

**Taulukko 23. Viallisen haaran releen näkemä maasulkuvirta  $I_r$ , kun kiskokatkaisija on lauennut M6:ssa ja maasulkuresistanssin ollessa 0, 500, 1000, 2000 tai 3000 $\Omega$ . Syöttö varasyöttöyhteyden kautta**

Maaresis- tanssi $\Omega$	A A	B A	C A	D A	M11 A	M12 A	M16 A	LTK1 A
3000	3,46	3,21	3,47	3,45	3,79	3,78	3,73	3,67
2000	5,13	4,75	5,14	5,11	5,62	5,61	5,53	5,45
1000	9,65	8,94	9,67	9,61	10,57	10,54	10,40	10,29
500	15,96	14,78	15,99	15,89	17,48	17,43	17,20	17,18
0	24,56	22,76	24,61	24,46	26,90	26,83	26,48	27,02

### 11.2.3 Pääsyöttösuunta M6-kojeiston kautta.

Pääsyöttösuunta M6-kojeiston kautta syötettäessä galvaanisessa yhteydessä ovat Oulun suun sähköasemalta lähtevä kaapeli joka haarautuu M6B kojeistossa PKL:lle ja M6-kojeistolle sekä M6:sta lähtevät kaapelit. Lasketaan maasulkuvirrat, kun syöttö tulee M6-kojeiston kautta ja silmukkaverkko on purettu avaamalla PKL:lta haarat A, B ja C. Viedään tulokset taulukkoon 24. Verkon tuottama kokonaismaasulkuvirta  $I_r$  on tässä tilanteessa 21,39 A

**Taulukko 24. Viallisen haaran releen näkemä maasulkuvirta  $I_r$  maasulkuresistanssin arvoilla 0, 500, 1000, 2000 tai 3000  $\Omega$ . Syöttö M6 kojeiston kautta pääsyöttöyhteyttä pitkin**

Maaresis- tanssi $\Omega$	A A	B A	C A	D A	M10 A	M11 A	M16 A	LTK1 A
3000	3,35	3,03	3,36	3,18	3,77	3,75	3,69	3,62
2000	4,93	4,46	4,94	4,68	5,54	5,52	5,43	5,33
1000	8,99	8,13	9,01	8,54	10,10	10,07	9,90	9,79
500	13,89	12,56	13,92	13,18	15,60	15,55	15,29	15,35
0	18,93	17,12	18,97	17,97	21,27	21,20	20,84	21,39

#### 11.2.4 Sallitut kosketusjännitteet

Keskijänniteverkon suurin sallittu UTP katsotaan taulukko 3:sta ja on 0,9 sekunnilla 110 V.  $U_m$  voidaan laskea kaavalla 28.

$$U_{\text{maad}} = 2 \times 110\text{V} = 220\text{V}$$

Verkon suurin sallittu maadoitusresistanssi voidaan laskea kaavalla 27.

$$R_{\text{maad}} = \frac{220\text{V}}{30\text{A}} = 7,3 \Omega$$

## 12 KAAPELIEN KUORMITETTAVUUS

Keskijänniteverkossa käytettyjen kaapelien kuormitusvirta ja suurin sallittu 1 sekunnin oikosulkuvirta on taulukossa 25. Taulukon kuormitusvirta on +25-asteisessa ilmassa.

**Taulukko 25. Kaapelien suurin sallittu kuormitusvirta ja suurin sallittu oikosulkuvirta +25°C:ssa**

Kaapeli	Suurin sallittu kuormitusvirta Ilmassa/maassa A	Suurin sallittu 1 s oikosulkuvirta kA
APYAKMM 3x120	210/225	12,5
APYAKMM 3x185	270/290	19,2
AHXAMK-W 3x185	425/330	17,5

Kaapelin kuormitettavuus määräytyy kaapelin suurimman sallitun lämpötilan mukaan. Kaapelin kuormitettavuuteen vaikuttavia seikkoja ovat johdinmateriaali, eristemateriaali, ympäristön lämpötila, asennustapa sekä muiden virtapiirien läheisyys. Kaapelien kuormitettavuus pitää laskea huonoimman mahdollisen tilanteen mukaan korjauskerroimia käyttäen. Korjauskerroimet löytyvät SFS 6001 -kirjasta.

Korjauskerroin kaapelikanavissa ja alaslasketuissa katoissa lämpötilan +30 °C mukaan APYAMK-kaapelille 0,94 ja AHXAMK-kaapelille 0,96. Kaapelikanavissa lähekkäin kulkevien kahden kaapelin korjauskerroin on 0,9. Lasketaan APYAKMM-kaapelin 3x120 kuormitettavuus ja viedään tulokset taulukkoon 26.

$$I = 210 \text{ A} \times 0,95 \times 0,9 = 180 \text{ A}$$

**Taulukko 26. Kaapelien suurin laskettu kuormitusvirta.**

Kaapeli	Kuormitettavuus ( A )
APYAKMM 3x120	180
APYAKMM 3x185	231
AHXAMK-W 3x185	367 / 300

OYS:n ottama teho P vaihtelee 5-7,1 MW:n välillä, ja on kesällä suurimmillaan. Verkon kuormituksen  $\cos\varphi$  on noin 0,97 eikä vaihtelee eri kuormitustilanteissa, koska loistehon säätö toimii. Lasketaan tämänhetkinen maksimivirta päämuuntajalta.

$$I_{\text{kok}} = \frac{P}{\sqrt{3} \times U \times \cos\varphi} = \frac{7,1 \text{ MW}}{\sqrt{3} \times 21 \text{ kV} \times 0,97} = 201,2 \text{ A}$$

Haarojen virrat mitattiin Scada-järjestelmästä ja on esitetty taulukossa 27. Muiden PKL:lta lähtevien muuntajalähtöjen virrat olivat samalla hetkellä yhteensä 18A. Yhteenlaskettu OYS:n ottama kokonaisvirta oli silloin 174 A eli huippuarvo on noin 15,5 % korkeammalla. Kaikkiin haaroihin lisätään 15,5 % ja siten saadaan laskennallisesti huippukulutuksen aikaiset virrat silmukkaverkossa.

Kuormituksen kasvaessa 0,5 % vuodessa 40 vuoden ajan lasketaan tuleva virta haaroissa. Kuormituksen kasvu voidaan laskea seuraavasti kaavalla 7:

$$I_{k40vA} = 57 \text{ A} \left(1 + \frac{0,5\%}{100\%}\right)^{40} = 70 \text{ A}$$

**Taulukko 27. Silmukkaverkon haarojen virrat nyt ja 40 vuoden päästä, jos kulutus kasvaa 0,5 %:tia vuodessa**

Tilanne	A (A)	B (A)	C (A)	D (A)
Mitatut virrat Scada järjestelmästä 12.2.14	50	36	34	36
Nykytilanne huippukulutuksen aikana	57	42	39	42
Kuormitus noussut 0,5 % vuodessa 40vuotta	70	51	48	51

Tulevaisuudessa joudutaan ehkä rakentamaan uusi muuntamo OYS:n eteläpäättyyn. Syöttöjen ja päämuuntajan kapasiteetin riittävyyden arvioimiseksi tarvitaan tieto huippuvirrasta. Lasketaan kokonaisvirta muuntamon rakentamisen jälkeen huippukulutuksen aikana.

$$I_{\text{kokm}} = I_{\text{kok}} + I_{\text{uusi}} \quad 201,2 \text{ A} + 10 \text{ A} = 211,2 \text{ A}$$



Lasketaan 40 vuoden päähän kokonaisvirta kaavalla 7:

$$I_{k40v} = 211,2A \left(1 + \frac{0,5\%}{100\%}\right)^{40} = 258 \text{ A}$$

Taulukosta 27 voidaan päätellä silmukkaverkon kapasiteetin riittävän kaapelivaurioiden tai huoltotilanteiden varalle eri kytkentätilanteissa. Silmukkaverkon kuormitettavuus on hyvä, jos kaikki haarat ovat kiinni. Yhdestä haarasta (A, B tai C) kuormitettaessa virta voi nousta jo nykyään lähelle kaapelin maksimiarvoa. Varayhteyden M8 - PKL johdon maksimikuormitus virta on 231 A ja sen uusiminen tulee ajankohtaiseksi lähitulevaisuudessa. Muut syöttöjohdot kestävät 300 A, mikä riittänee pitkälle tulevaisuuteen.

## 13 RELESUOJAUS

### 13.1 Oikosulkusuojaus

#### 13.1.1 Jakelumuuntajan oikosulkusuojaus

OYS:n pienjännitepuolen keskuksen suojauksessa on käytetty 400 A:n ABB:n gG kahvasulakkeita. Sulakkeita ennen pienjännitepuolella on katkaisija, jonka ylivirtasuojauksen asetteluarvo on 1500A 4 s:n ja 7 kA 0,1 s:n vakioaika molemmissa. Ensiöpuolella asetteluarvot näkyvät 30A:n ja 140A:n suuruisina. Pienjännitepuolen ja keskijännitepuolen katkaisija toimisivat hyvin peräkkäin, jos ylivirtasuojauksen asetteluarvo on suurempi kuin 30A mutta pienempi kuin 140A, ja momentti on suurempi kuin 140A ja aika pitempi kuin 0,1 s:n. Sulakkeen toimintakäyrä poikkeaa kuitenkin näistä. Sulakkeen toiminta virta/aika selviää taulukosta 28.

**Taulukko 28. 400A gG kahvasulakkeiden virta-aika arvoja**

Sulake Tyyppi/koko	400V toiminta- virta/0,3s ( kA)	400V toiminta- virta/0,4s (kA)	Vastaava 20kV toimintavirta/0,3s (A)	Vastaava 20kV toimintavirta/0,4s (A)
IEC-gG 400	n. 3,3-6,0 kA	n.3,0-5,5	n. 56-120	n. 60-110
ABB-gG 400	n. 3,8-4,7	n. 3,6-4,4	n. 77-93	n. 71-87

Käytettäessä ABB:n gG sulakkeita toleranssi on pienempi kuin IEC standardi vaatii.

Toiminta ajan ollessa 0,3s  $\rightarrow 93A \times 1,2 = 111A$

Tarkistetaan taulukosta 16 pienin kaksivaiheinen minimi joka on 800 kVA:n muuntajilla 179A ja kerrotaan se 0,8, jotta saadaan sopiva toleranssi  $179A \times 0,8 = 143 A$ .

800 kVA:n muuntajan nimellisvirta on 23A ja kytkentävirta 200A, joka puolittuu 0,3 sekunnissa, ollen silloin noin 100A.

Aina on mahdollista että joku laittaa muun valmistajan sulakkeen, joten kannattaneekin pitää 120A pienimpänä asetteluarvona.

Edellä olevien tietojen nojalla voidaan keskijänniteverkon säteittäisen muuntajälähdön oikosulkusuojauksen releelle valita ylivirtasuojauksen asetteluarvoksi 120A ja 0,3 s:n. Rele ohjaa säteittäisen muuntajälähdön keskijännitekatkaisijaa. Muuntajälähdön suojauksen toinen porras valitaan niin että se laukeaa kolmivaiheisessa toisio oikosulussa, mutta ei pienimmässä kaksivaiheisessa oikosulussa. Taulukosta 16 katsotaan minimi kolmivaiheinen oikosulkuvirta joka on  $359A \rightarrow 359 \times 0,8 = 290 A$ . Edellä olevien tietojen nojalla voidaan releasetteluksi valita 290A ja 0,15s:n, koska pienjännitepuolen katkaisijalla on 0,1s:n viive.

Lukituksia ei tule, mutta syöttösuunnassa oleviin katkaisijoihin tarvittaessa lukitus, koska syöttösuunnassa aikaisemmin olevat käänteisaika releet toimivat muuten joissakin tapauksissa nopeammin, liitteessä 12 on tarkasteltu tilannetta. Oikosulkuvirran ylittäessä 1800A käänteisaikarele toimii nopeammin kuin vakioaikarele. Tarkistetaan taulukon 15 maksimi vikavirtoja ja taulukko 28 virran jakautuminen avulla ylittääkö syöttösuunnassa olevan releen mittaussvirta mahdollisesti 1800A ja jos ylittää joudutaan järjestämään lukitus.

Jakelumuuntaja oikosulkusuojauksessa voidaan käyttää myös käänteisaikahidastusta. Valitaan normal inverse k 0,05 asettelut, ja saadaan selektiivisyys toimimaan ilman lukituksia. Asetteluarvo valitaan toimimaan pienimmällä kaksivaiheisella oikosulkuarvolla, ja tarkistetaan pienjännitepuolen katkaisijan selektiivisyys käänteisaikakäyrään. 800 kVA:n muuntajalla ensiöpuolella näkyvä maksimi virta voi olla 442A ja 1250:n muuntajalla 663A. Liitteessä 13 on tarkisteltu vakioaika ja käänteisaika vaihtoehtoja 800 kVA:n muuntajan, ja liitteessä 14 1250 kVA:n muuntajan tapauksessa. Punaisella viivalla on esitetty valitut asettelut. 800 kVA:n muuntajan ollessa kyseessä huomataan 60 A:n asetteluarvolla käyrät vielä leikkaavat, mutta 70 A:n asetteluarvo antaa sopivan toleranssin.

### 13.1.2 Kojeistojen oikosulkusuojaus

Lukituksien vähentämiseksi silmukkaverkon kojeistojen molemmilla syöttösuunnilla suunnattuylivirtasuojaus toteutetaan käänteisaikahidastusta käyttäen. Valitaan normal inverse k 0,05 ja lukitusta aina syöttösuunnassa edellä olevaan nähden selektiivisyyden

saavuttamiseksi. 180 A:n asetteluarvolla saavutetaan toivottu porrastus jakelumuuntajan oikosulkusuojaukseen.

Lasketaan laukaisuaika 2 x I kaavalla 8:

$$t = \frac{0,05 \times 0,14}{\left(\frac{180 \times 2}{180}\right)^{0,02} - 1} = 0,5 \text{ s}$$

Lasketaan laukaisuaika myös 10 ja 20 x I ja viedään tulokset taulukkoon 29.

**Taulukko 29. Silmukkaverkon käänneisaikareleen laukaisuaajat normal inverse ominaiskäyrästä k 0,05 ja virran ollessa 2, 10 ja 20 kertaa 180A**

Virta	Laukaisuaika (s)
2 x asetteluarvo	0,5
10 x asetteluarvo	0,15
20 x asetteluarvo	0,11

### 13.1.3 Kaapeliyhteyksien ylivirta- ja oikosulkusuojaus

Silmukkaverkon ylikuormitussuojaus määräytyy APYAMKMM-kaapelin 3 x 120 tai AXAMK-W-kaapelin 3 x 185 suurimman kuormitettavuuden mukaan. Vakioaikahidasutus 0,8 s:n PKL:lta lähteviin haaroihin, koska silloin saadaan sopiva porrastus. D-haaran ylivirtasuojauksen virta-arvoa pienentää M6-kojeistoon tulevan kaapelin 300 A:n asetteluarvo. Ylivirtasuojauksen toinen porras otetaan käyttöön PKL:lla, koska lukitus voi estää suojauksen toiminnan kytkimen vikaantumisen tai muun syyn estäessä laukaisun aiemmissa portaissa. Virta-arvo 2,5 x alemman portaan virta-arvo.

Pitkittäis differentiaalit haarojen A, B ja C virta-arvo määräytyy kaapelissa kulkevan virran mukaan ( taulukko 27). Pitkittäisdifferentiaali laukaisee kaapelin irti 20 ms:ssa kaapelioikosulun sattuessa. Liitteessä 15 on esitetty lasketut arvot silmukkaverkon kojeistojen uusinnan jälkeen oikosulku ja ylikuormitussuojaukselle. Valitaan suojareleissä myös käyttöön kytkennän aikainen asettelujen kaksinkertaistaminen, jos se on mahdollista.

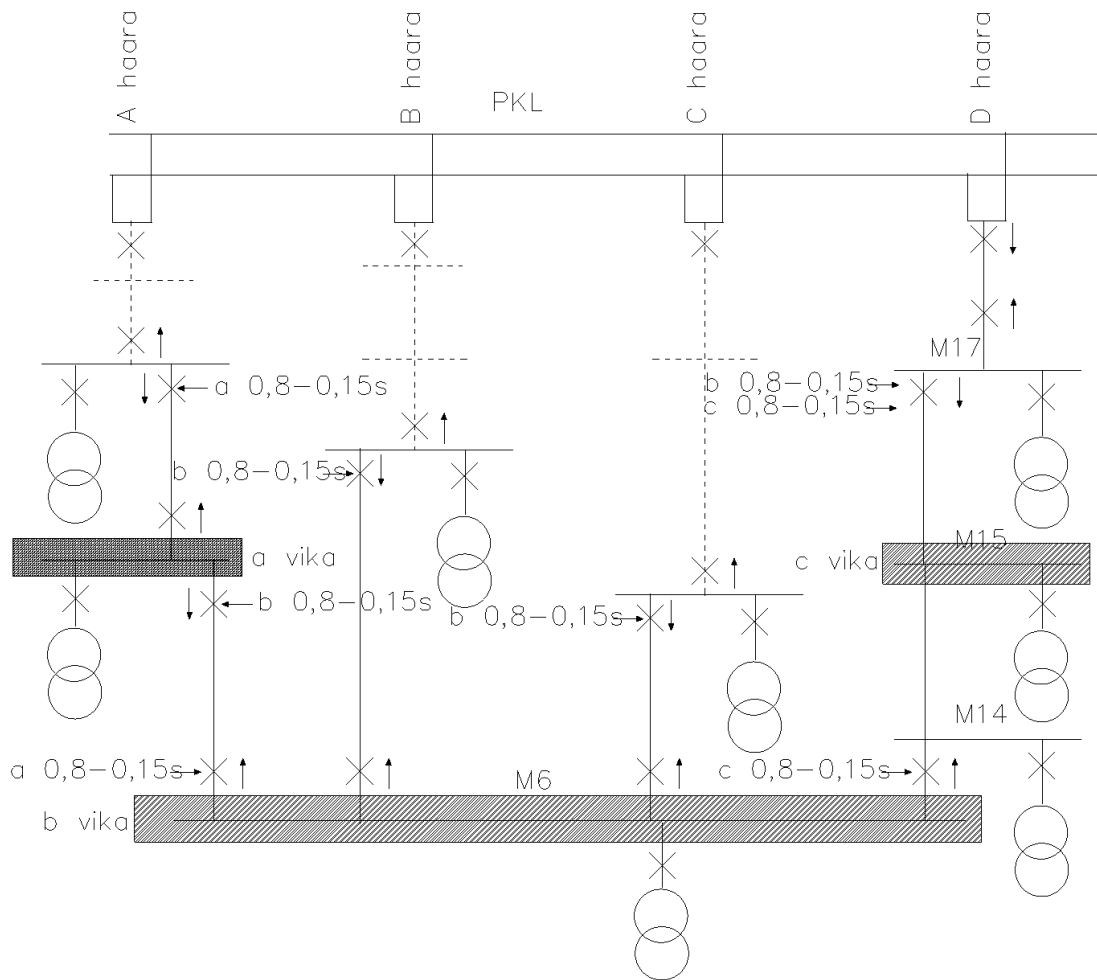
#### 13.1.4 Suojaustoiminnot

Virta jakautuu myötä ja takasuuntaan kojeistolla tapahtuvassa oikosulussa, tilannetta tarkasteltu liitteessä 16. Pahin tilanne on M1:ssä tapahtuva oikosulku, jolloin virta takasuuntaan on vain 10 % pienimmästä kaksivaiheisen oikosulkuvirrasta, ollen noin 174 A. Suojaus toimii tällöin ensin myötäsuuntaan ja PKL:n A haran katkaisija aukeaa 0,82 s:n kuluttua, ja siitä noin 0,2 sekuntia takasuuntaan M3/02 katkaisija. M3:n ylivirtarele lukitsee havahduttuaan M7 ja M6 kojeistossa olevan ylivirtareleen estäen niiden laukaisun. Vikavirta jakautuu sitten M6 kojeistossa kolmeen haaraan B, C ja D, ollen näin pienempi kuin A haarassa, ja vikavirta loppuu M3/02 katkaisijan avautuessa ennen kuin haarojen rele toimii, koska käänteisaika releen toiminta nopeus on riippuvainen vikavirran suuruudesta. Verkkoa säteittäin käytettäessä virta tulee vain yhdestä suunnasta ja laukaisut ovat vähän nopeampia käänteisaikareleillä. Oikosulku M6 kojeistossa jakaa vikavirran neljään haaraan. Haarojen virrat ovat alussa noin  $A = 487 \text{ A}$ ,  $B = 278 \text{ A}$ ,  $C = 505 \text{ A}$  ja  $D = 470 \text{ A}$ . Haara C laukeaa ensimmäisenä irti noin 0,34 s:n kuluttua ja saa jäljellä olevien haarojen vikavirran kasvamaan ja nopeuttaa niiden irti kytkeytymistä. Kuviossa 34 b:lä merkityt katkaisijat aukeavat tässä tapauksessa.

Suunnattu käänteisaikaylivirtarele toimii sitä nopeammin mitä suurempi on mittausvirta asetteluvirtaan nähden ja vikavirran suunnan pitää olla oikea. Silmukkaverkon suunnattujen käänteisaika ylivirtasuojien toiminta selviää kuviosta 34, jossa on kuvattu vikapaikoiksi a, b ja c. Oikosulku esimerkiksi paikassa a laukaisee katkaisimet a vikavirran suuruudesta riippuen noin 0,8-0,15 s:n kuluttua ja muu verkko jäisi jännitteiseksi. Havahtunut rele lukitsee syöttösuunnasta seuraavan releen estäen sen laukeamisen. Vian ollessa esimerkiksi paikassa a havahtuu ylempi A haaran ylivirtarele lukiten edelliset releet estäen niiden laukaisun. Haaran A alempi a katkaisija toimii taas nopeammin kuin B, C tai D haarojen b katkaisijat, koska vikavirta haarautuu B, C ja D haaroihin, ollen näin pienempi kuin A-haarassa. M6-kojeistossa olevat muut ylivirtasuojat eivät havahdu, koska virran suunta on väärä.

Käänteisaikarele toimii vasta 1,3 kertaa asetteluarvo, joten silmukkaverkon käänteisaikareleet toimivat vain oikosulkusuojina. Ylikuormitussuojina toimivat PKL:n vakioaika releet. Tästä syystä myös M6 kojeiston kautta syötettäessä M6/04-, M6/05- ja M6/10-releiden asettelu pitää muuttaa vakioaikahidasteiseksi ylikuormitussuojauksen toteutumiseksi.

Syöttökentässä PKL/12 ja PKL/14 ei ole suojureleitä ja suojaus toimii OE:n syöttävällä asemalla, jos vika on PKL:ssa tai M6B kojeistossa.



**Kuvio 34. Suunnattujen käännteisaika oikosulkusuojujen toiminta oikosulkupaikkaan nähden. Vika paikassa a laukaisee noin 0,8-0,15 s:n kuluttua a:lla merkityt katkaisijat vikavirran suuruudesta riippuen**

Suunnatut ylivirtasuojat ja pääkytkinlaitoksen ylivirtareleet on lukittu niin, etteivät laukaisukäsky mene katkaisijalle liitteessä 17 lukitukset releittäin, jos syöttösuunnassa seuraavan kojeiston vastaava rele on havahtunut. Neliön sisällä osoite mistä lukitus mahdollinen. Silmukkaverkon peräkkäiset ylivirtareleet eivät voi toimia toistensa varasuojina lukitustavasta johtuen, jos katkaisijavika tai muu vika estää laukaisun. Tällöin varasuojana toimii pääkytkinlaitoksen ylivirtasuojien lukitsematon toinen porras 1,0 sekunnin kuluttua, aukaisten kyseisen haaran PKL:n katkaisijan.

### 13.2 Maasulkusuojaus

Valitaan M6 kojeiston laukaisuarvoksi 2,0 kV taulukoiden 20 ja 22 perustella. Laske-  
taan M6 kojeiston maasulkujännite releasettelu tällä jännitteellä.

$$U_{02} = \frac{2,0 \text{ kV} \times 100\text{V}}{20 \text{ kV}} = 10\text{V}$$

M6 kojeiston maasulkujänniterele toimii tällä asetteluarvolla syöttösuunnasta riippuen 2000-3000  $\Omega$  vikaresistanssiin asti. Maasulkusuojauksen tulee toimia vähintään 500  $\Omega$  vikaresistanssilla ja selektiivisyyden pysymiseksi virta-asettelun tulisi olla 20 % suu-  
rempi kuin haaran tuottama maasulkuvirta.

Haara B tuottaa suurimman maasulkuvirran 4,1 A.

$$I_{\text{hmin}} = 4,1\text{A} \left(1 + \frac{20\%}{100\%}\right) = 4,92 \text{ A}$$

Tarkistetaan taulukoista 21 - 23 mikä on resistanssi millä laukaisu tapahtuu. Resistanssi on noin 2000  $\Omega$ . Syöttösuuntia on useampia ja tästä syystä releen näkemä maasulkuvir-  
ta vaihtelee. 5,7 A asetteluarvolla M6 kojeiston maasulkujänniterele toimii kaikissa ti-  
lanteissa ensin ja päästään haluttuun toimintajärjestykseen. Liitteessä 15 on esitetty las-  
ketut arvot maasulkusuojaukselle.

Maasulkusuojaus on toteutettu 0,3 s:n porrastuksella. Ensimmäinen porras säteittäiset  
muuntajalähdöt, toinen porras avaa kiskokatkaisijan 0,6 s:n kuluttua ja viallinen haara  
laukeaa auki tästä 0,3 s:n päästä. Vian ollessa pääkytkinlaitoksessa, M6B:ssä tai näiden  
syöttökaapeleissa, laukaisee OE:n katkaisija Oulunsuussa koko verkon jännitteettömäk-  
si.

Syötön tullessa M6 kojeiston kautta ja silmukointi on purettu. Jakeluverkon alueella  
oleva maasulku ei avaa säteittäisten haarojen syöttökatkaisijoita, koska sen estää  
M6/06:sta otettu lukitus. Maasulku laukaisee viallisen haaran katkaisijan kojeistossa  
M6, jättäen muun verkon jännitteelliseksi. Maasulun ollessa M6:ssa laukaisun suorittaa  
M6/06 suojarele 1,2 s:n kuluttua, jolloin OYS:n verkko jää jännitteettömäksi. Vian ol-

lessa M6B:ssa tai syöttökaapelissa, laukaise OE:n katkaisija koko OYS:n verkon jännitteettömäksi 1,5 s:n kuluttua.

### 13.3 Yli ja alijännitesuojaus

Pääsyöttöyhteyden Oulunsuun sähköasemalla on kaksiportainen laukaiseva ylijännitesuojaus  $U > 21,95 \text{ kV}$  90 s:n ja  $U \gg 23,86 \text{ kV}$  3 s:n ja myös alijännitesuojaus Oulunsuun sähköasemalla on laukaiseva  $U < 18,14 \text{ kV}$  5 s:n. Muualla laukaisevaa suojausta ei katsota tarpeelliseksi, koska kaapelit kulkevat maassa tai sisätiloissa ja kojeistot ovat sisätiloissa.

PKL:lla on ylijännitesuoja molemmilla kiskoilla  $U > 23 \text{ kV}$  5 s:n ja M6 kojeistossa  $U > 21,6 \text{ kV}$  60 s:n sekä  $U \gg 23,6 \text{ kV}$  1 s:n hälytys Scada-järjestelmään jännitteen noustessa yli asetteluarvon. PKL:lla on myös alijännitesuoja  $U < 17 \text{ kV}$  5 s:n molemmilla kiskoilla ja M6 kojeistossa  $U < 19,4 \text{ kV}$  3 s:n sekä  $U \ll 18,4 \text{ kV}$  1 s:n hälytys Scada-järjestelmään jännitteen laskiessa alle asetteluarvon. Liitteessä 15 yli- ja alijännitesuojauksen lasketut arvot.

### 13.4 Muuntajan suojaus

Muuntajien osalta ylikuormitussuojauksesta huolehtivat pienjännitekeskuksen syöttökenttien katkaisijoiden termiset ylivirtasuojat ja öljylämpömittari. Öljylämpömittarin laukaisukoskettimen asetteluarvo  $+55^\circ\text{C}$  suojaa muuntajaa pitkäaikaiselta ylikuormitukselta. Öljylämpömittarin hälytyskoskettimelta otetaan hälytys micro Scada järjestelmään.

### 13.5 Selektiivisyys

Keskijänniteverkon suojauksen selektiivisyys on toteutettu aikaporrastuksella, suuntareleillä ja laukaisun lukituksilla. Pääkytkinlaitoksen kautta syötettäessä silmukkaverkon alue voidaan jakaa neljään portaaseen. Säteittäiset muuntajalähdöt ensimmäinen porttas,



toinen porras silmukkaverkon syöttölähdöillä, kolmas porras pääkytkinlaitoksen syöttöillä ja neljäs OE:n Oulunsuun sähköaseman lähdössä.

Syötön tullessa M6 kojeiston kautta ja verkko on kytketty säteittäiseksi. Säteittäiset muuntajalähdöt ensimmäinen porras, toinen porras silmukkaverkon syöttölähdöillä, kolmas porras M6 tulo ja neljäs OE:n lähdössä. Selektiivisyyttä on tutkittu redusoimalla 20 kV puolelle releiden asetteluarvot liite 18.

## 14 POHDINTA

OYS:n keskijänniteverkko on suojattu oikosuluilta ja maasuluilta. Ylikuormitussuojauksen osalta on tarpeellista suorittaa jatkotarkastelua muutamien erityistilanteiden osalta. Haarojen A, B, C nykyinen 200A:n ylivirtasuojauksen asetteluarvon lasku 180A:iin PKL:lla suojaisi kaapelin ylikuormitukselta. Virran ylittäessä 180 A Scada-järjestelmä voidaan ohjelmoida antamaan hälytyksen.

Nykytilanteessa 20 kV muuntajalähdön suojareleen ylivirta-asetteluarvo 80 A ja 0,4 s:n selektiivisyys ei toteudu 400 A:n varokkeen ja 20 kV:n suojareleen välillä, kun vikavirta 20 kV:n puolelle redusoituna on 80 - 100 A. Ylivirtasuojauksen asetteluarvolla 105 A ja 0,4 s:n selektiivisyys toteutuisi kohtuullisesti.

Kojeistojen teknisen vanhenemisen ja käyttövarmuuden pitämiseksi hyvänä kojeistot kannattaa uusia. Vanhoista purettavista kojeistoista saa samalla varaosia, koska kojeistojen vaihto uusiin tehdään vuoronperään useamman vuoden aikana. Muuntajien uusiminen on ajankohtaista iän tuoman kuormitettavuuden laskun takia. Kojeistojen tämänhetkinen kuormitus kannattaisi selvittää pitkäaikaisella seurannalla, jotta selviää muuntajien nimellistehojen mahdollinen muutostarve eri kojeistoissa. Samalla kertaa voisi selvittää, onko tarvetta 400 V:n varasyöttöyhteyksiin. Muuntamoiden ilmanvaihto kannattaa uusia muuntajien vaihdon yhteydessä.

Silmukkaverkon kuormitettavuus on hyvä, jos kaikki haarat ovat kiinni. Yhdestä haarasta (A, B tai C) kuormitettaessa virta voi nousta jo nykyään lähelle kaapelin maksimiarvoa. Varayhteyden M8 - PKL-johdon maksimikuormitusvirta on 231 A ja sen uusiminen tulee ajankohtaiseksi lähitulevaisuudessa. Muut syöttöjohdot kestävät 300 A, mikä riittänee pitkälle tulevaisuuteen.

Uuden kojeiston tai kojeistojen rakentamiseksi voisi harkita vielä yhden haaran lisäämistä silmukkaverkkoon. Tämä mahdollistaisi jopa kahden muun kojeiston lisäämisen tulevaisuudessa, suojaus sama kuin A-haarassa. Tämä lisäisi myös verkon luotettavuutta entisestään.

Kojeistot M1 ja M9 on jo uusittu ja kojeiston 2 uusiminen on suunnitteilla, joten se kannattaa tehdä seuraavaksi. Kojeisto 3 aiheuttaa magneettisia häiriöitä ja on siitä syystä

uusittava ensimmäisten joukossa. Kojeistot 7 ja 10 saavat koko haaran uudistamisen valmiiksi. Täten kojeistot kannattaa uusida seuraavassa järjestyksessä 2, 3, 7, 10, 4 ja 5.

Nykyinen keskijänniteverkko on suunniteltu toimimaan sähköverkon huolto- ja korjaustöiden ajan sähkön saannin häiriintymättä. Sähköjakelun käyttövarmuutta on parannettu järjestämällä sähkönsyöttö useampaa siirtoreittiä pitkin. PKL:n poistaminen on vaikeaa, jos halutaan pitää verkon varmennettavuus nykyisellä tasolla.

Silmukoidussa käytössä kaapelin vaihekatko ei tule esille käyttöhäiriönä vaan kojeistossa on tästä huolimatta jännite, koska jännite voi tulla toisesta suunnasta. Vaihekatkoja tulisi seurata virtamittauksella kaikista silmukkaverkon kytkentäpisteistä silloin tällöin, esimerkiksi pihtiampeerimittarilla virtamuuntajien toisiopiiristä.

Keski- ja pienjänniteverkon kojeistojen lämpökuvaus olisi hyvä suorittaa vuoden välein huippukulutuksen aikaan. Jatkotarkastelua vaativia kohtia ovat ylikuormitussuojauksen jatkotarkastelu muutamien erityistilanteiden osalta sekä muuntajien nimellistehon tarve eri kojeistoissa.

Opinnäytetyö oli mielenkiintoinen ja melko haasteellinen. OYS:n verkosta oli saatavilla hyvät kuvat ja verkon suojausfilosofia siitä, miten suojauksien pitäisi toimia. Eniten ongelmia tuotti maasulkusuojauksen tarkastelu. Työ lisäsi tekijän osaamista ja toi esille puutteita tiedoissa ja taidoissa.

## LÄHTEET

- ABB, www-sivut 2013. Hakupäivä 20.12.2013. <[www.abb.fi](http://www.abb.fi)>
- Aura, Lauri & Tonteri, Antti 1996. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet.1. Porvoo: WSOY.
- Aura, Lauri & Tonteri, Antti 1993.Sähkölaitostekniikka, 1. Porvoo: WSOY.  
<[http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt\\_opus/9muuntajat\\_ja\\_sahkolaitteet.pdf](http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/9muuntajat_ja_sahkolaitteet.pdf)>
- Elovaara, Jarmo & Haarla, Liisa 2011, Sähköverkot 2. 1. Helsinki: Otatieto.
- Elovaara, Jarmo & Laiho, Yrjö 1998, Sähkölaitostekniikan perusteet. 2. Hämeenlinna: Ota-kustantamo.
- Etto, Jaakko 1998. Kunnossapitokoulu 2. Kunnossapito-lehti 48/1998.
- Huotari, Kari & Partanen, Jarmo 1998. Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen. Opetusmoniste. Lappeenrannan tekninen korkeakoulu.
- Lakervi, Erkki & Partanen, Jarmo 2008. Sähkönjakelutekniikka.1. Helsinki: Otatieto.
- Lappeenrannan teknillisen yliopiston www-sivut 2014. Hakupäivä 3.1.2014.  
<<https://noppa.lut.fi/noppa/app>>
- Leena, Korpinen, www-sivut 2013. Kytkinlaitteet, katkaisijat. Hakupäivä 20.12.2013.
- Manninen, Turo 1995. Oulun kaupungin historia.1. Jyväskylä: Gummerus
- Martimo, Antero 2011. Sähkönjakelutekniikan kurssimateriaalia.
- Mörsky, Jorma 1993, Relesuojaustekniikka .2. Hämeenlinna: Otatieto.
- Prysmian Group www-sivut 2013. Hakupäivä 27.12.2013.  
<<http://fi.prysmiangroup.com/en/index.html>>
- Suomen standardisoimisliitto 2012. SFS-käsikirja 6002 Säädökset, sähköturvallisuus, erityisasennukset ja liittyvät standardit. 1. Helsinki: SFS
- Sähköenergialiitto ry, 1997. Verkostosuositus TA 1:97, Verkonhaltijan toimesta tehtävät sekä omat käyttötarkastukset. Sener.

## LIITTEET

- Liite 1. OYS:n keskijänniteverkko yleiskaavio
- Liite 2. Oulunsuun pääsyöttösuunnan impedanssien laskenta
- Liite 3. Muuntajan impedanssien esimerkkilasku
- Liite 4. Kaapelin impedanssien esimerkkilasku
- Liite 5. Keskijänniteverkon kaapelien pituudet ja impedanssit
- Liite 6. Impedanssin esimerkkilaskelma PKL- M1
- Liite 7. Oikosulkuvirran laskenta PKL:lle pääsyöttösuunnasta
- Liite 8. Oikosulkuvirran laskenta M6 kojeistolle
- Liite 9. Keskijänniteverkon dynaaminen ja terminen kesto
- Liite 10. Pienjännitemuuntajan toisiopuolen oikosulkulaskenta esimerkki
- Liite 11. Maasulkusuojauksen esimerkkilaskut
- Liite 12. Vakioaika ja käänneisaika releen laukaisuaikojen tarkastelu
- Liite 13. Kun pienjännitepuolta syöttää 800 kVA muuntaja releasettelu vertailuja
- Liite 14. Kun pienjännitepuolta syöttää 1250 kVA muuntaja releasettelu vertailuja
- Liite 15. OYS keskijänniteverkon releasettelut kojeistojen uusinnan jälkeen
- Liite 16. Kojestolle tulevan oikosulkuvirran jakautuminen
- Liite 17. Ylivirtalaukaisun lukitukset
- Liite 18. Keskijänniteverkon selektiivisyys tarkastelua



Oulunsuun pääsyöttösuunnan maksimi kokonaisimpedanssi lasketaan kaavalla 9.

$$Z_s = \frac{1,1 \times 110 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times 12,6 \text{ kA}} = 5,5487 \Omega$$

Pääsyöttösuunnan reaktanssi saadaan laskettua kaavalla 10.

$$X_s = 0,995 \times 5,487 \Omega = 5,5211 \Omega$$

Pääsyöttösuunnan reaktanssi redusoidaan 20 kV puolelle kaavalla 13.

$$X'_s = \left( \frac{21 \text{ kV}}{110 \text{ kV}} \right)^2 \times 5,5211 \Omega = 0,2012 \Omega$$

Pääsyöttösuunnan resistanssi saadaan laskettua kaavalla 11

$$R_s = 0,1 \times 5,5211 \Omega = 0,5521 \Omega$$

Pääsyöttösuunnan reaktanssi redusoidaan 20 kV puolelle kaavalla 12.

$$R'_s = \left( \frac{21 \text{ kV}}{110 \text{ kV}} \right)^2 \times 0,5521 \Omega = 0,0201 \Omega$$

Minimi oikosulkuvirtaa vastaavat impedanssit saadaan samoilla kaavoilla mutta kerroin c taulukosta 1 minimioikosulkuvirta 1,0 ja OE:n minimioikosulkuvirta.

Oulunsuun pääsyöttösuunnan minimi kokonaisimpedanssi lasketaan kaavalla 9.

$$Z_s = \frac{1,0 \times 110 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times 2,152 \text{ kA}} = 29,5114 \Omega$$

Pääsyöttösuunnan reaktanssi saadaan laskettua kaavalla 10.

$$X_s = 0,995 \times 29,5114\Omega = 29,3638\Omega$$

Pääsyöttösuunnan reaktanssi redusoidaan 20 kV puolelle kaavalla 13.

$$X'_s = \left( \frac{21 \text{ kV}}{110 \text{ kV}} \right)^2 \times 29,3638\Omega = 1,0702\Omega$$

Pääsyöttösuunnan resistanssi saadaan laskettua kaavalla 11

$$R_s = 0,1 \times 29,3638\Omega = 2,9364\Omega$$

Pääsyöttösuunnan reaktanssi redusoidaan 20 kV puolelle kaavalla 12.

$$R'_s = \left( \frac{21 \text{ kV}}{110 \text{ kV}} \right)^2 \times 2,9364\Omega = 0,1070\Omega$$



Päämuuntajan kokonaisimpedanssi lasketaan kaavalla 2.

$$Z_m = \frac{10,23\%}{100\%} \times \frac{(21 \text{ kV})^2}{10 \text{ MVA}} = 4,5114\Omega$$

Muuntajan resistanssi lasketaan kaavalla 3.

$$R_m = 59,3 \text{ kW} \times \frac{(21 \text{ kV})^2}{(10 \text{ MVA})^2} = 0,2615\Omega$$

Muuntajan reaktanssi saadaan laskettua kaavalla 14.

$$X_m = \sqrt{(4,511\Omega)^2 - (0,2615\Omega)^2} = 4,504\Omega$$

PKL-M1 kaapelien resistanssi lasketaan seuraavasti kaavalla 5.

$$R_j = 88 \times 10^{-3} \text{ km} \times 0,283 \Omega / \text{ km} = 0,025 \Omega$$

Lasketaan PKL- M1 reaktanssi kaavalla 6.

$$X_j = 88 \times 10^{-3} \text{ km} \times 0,115 \Omega / \text{ km} = 0,010 \Omega$$

Kaapelin kokonaisimpedanssi saadaan laskettua kaavalla 15.

$$Z_j = \sqrt{(0,025 \Omega)^2 + (0,010 \Omega)^2} = 0,0269 \Omega$$

Lasketaan kaikkien kaapelien impedanssit ja viedään ne liite 5:sen taulukkoon.

Syöttösuunnan ollessa PKL:lta päin lasketaan silmukkaverkon haarojen A, B, C ja D resistanssit, reaktanssit ja impedanssit PKL- M6. Viedään ne taulukkoon 10 odottamaan tulevaa käyttöä. Resistanssit ja reaktanssit voi laskea erikseen normaaleja sarjaan kytkentä kaavoja käyttäen.

$$R_{jA} = R_{jpk1-m1} + R_{jm1-m3} + R_{jm3-m7}$$

$$R_{jA} = 0,025 \Omega + 0,068 \Omega + 0,034 \Omega + 0,050 \Omega = 0,177 \Omega$$

$$X_{jA} = X_{jpk1-m1} + X_{jm1-m3} + X_{jm3-m7}$$

$$X_{jA} = 0,010 \Omega + 0,028 \Omega + 0,014 \Omega + 0,020 \Omega = 0,072 \Omega$$

*Kokonaisimpedanssi voidaan laskea kaavalla 15.*

$$Z_{jm1} = \sqrt{(0,177 \Omega)^2 + (0,072 \Omega)^2} = 0,191 \Omega$$



R ja X voidaan laskea yhteen kulmamuodossa. Esimerkiksi PKL-M1 johto.

$$Z_{\text{pkl-m1}} = R_{\text{pkl-m1}} + X_{\text{pkl-m1}} = 0,025\Omega + 0,010\angle -90^\circ = 0,027\Omega\angle -21,80^\circ$$

Lasketaan kuvion 30 ylempi haara ensin käyttäen hyödyksi taulukoiden 9 ja 10 tietoja.

$$Z_{\text{jBCD}} = \left( \frac{1}{R_{\text{jB}} + X_{\text{jB}}} + \frac{1}{R_{\text{jC}} + X_{\text{jC}}} + \frac{1}{R_{\text{jD}} + X_{\text{jD}}} \right)^{-1} + Z_{\text{jm6-m7}} + Z_{\text{jm7-m3}} + Z_{\text{jm3-m1}}$$

$$Z_{\text{jBCD}} = \left( \frac{1}{0,34\Omega\angle -22,10^\circ} + \frac{1}{0,187\Omega\angle -22,0^\circ} + \frac{1}{0,194\Omega\angle -33,0^\circ} \right)^{-1} + 0,074\Omega\angle -23,5^\circ + 0,037\Omega\angle -22,4^\circ + 0,050\Omega\angle -21,8^\circ = 0,24\Omega\angle -23,5^\circ$$

Seuraavaksi lasketaan ylempi ja alempi haara yhteen ja saadaan kokonaisimpedanssi PKL-M1.

$$Z_{\text{jM1}} = \left( \frac{1}{Z_{\text{jBCD}}} + \frac{1}{Z_{\text{jPKL-m1}}} \right)^{-1}$$

$$Z_{\text{jM1}} = \left( \frac{1}{0,074\angle -23,5\Omega} + \frac{1}{0,027\angle -21,8\Omega} \right)^{-1} = 0,024\Omega\angle -22^\circ$$

R ja X saadaan laskettua trigonometrialla avulla

$$X = \sin(\alpha) \times Z = \sin(22^\circ) \times 0,024\Omega = 0,009\Omega$$

$$R = \cos(\alpha) \times Z = \cos(22^\circ) \times 0,024\Omega = 0,022\Omega$$

Oikosulkuvirran laskenta PKL:lle pääsyöttösuunnasta.

Resistanssit ja reaktanssit voi laskea erikseen normaaleja sarjaan kytkentä kaavoja käyttäen.

$$R_{kM1max} = R_{kmax} + R_{jM1}$$

$$R_{kM1max} = 0,8506\Omega + 0,022\Omega = 0,8726\Omega$$

$$X_{kM1max} = X_{kmax} + X_{jM1}$$

$$X_{kmax} = 5,0750\Omega + 0,009\Omega = 5,0840\Omega$$

Kokonaisimpedanssi voidaan laskea kaavalla 15.

$$Z_{kM1max} = \sqrt{(0,8726\Omega)^2 + (5,0840\Omega)^2} = 5,1583\Omega$$

Lasketaan maksimi oikosulkuvirta M1:lle pääsyöttösuunnasta kaavalla 9.

$$I_{kmax}'' = \frac{1,1 \times 21 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times 5,1583 \Omega} = 2,59 \text{ kA}$$

Minimi arvot lasketaan samoin mutta c on 1,0 ja syötön redusoidut minimi arvot.

$$R_{kmin} = R'_{smin} + R_m + R_{jpm-m6b} + R_{jm6b-pkl}$$

$$R_{kmin} = 0,1070\Omega + 0,2615\Omega + 0,476\Omega + 0,0930\Omega = 0,9375\Omega$$

$$X_{kmin} = X'_{smin} + X_m + X_{jpm-m6b} + X_{jm6b-pkl}$$

$$X_{kmin} = 1,070\Omega + 4,5038\Omega + 0,309\Omega + 0,061\Omega = 5,9438\Omega$$

Kokonaisimpedanssi voidaan laskea kaavalla 15.

$$Z_{kmin} = \sqrt{(0,9375\Omega)^2 + (5,9438\Omega)^2} = 6,0173\Omega$$

Lasketaan minimi oikosulkuvirta M1:lle pääsyöttösuunnasta kaavalla 9.

$$I''_{kmin} = \frac{1,0 \times 21 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times 6,0173 \Omega} = 2,01 \text{ kA}$$

Lasketaan kaksi vaiheinen pienin oikosulkuvirta kojeistolle M1 kaavalla 16.

$$I''_{k2min} = \frac{\sqrt{3}}{2} 2,01 \text{ kA} = 1,74 \text{ kA}$$

Resistanssit ja reaktanssit voi laskea erikseen normaaleja sarjaan kytkentä kaavoja käyttäen. Resistanssien arvot taulukoista 6, 8 ja 10.

$$R_{kmax} = R'_{smax} + R_m + R_{jpm-m6b} + R_{jm6b-m6}$$

$$R_{kmax} = 0,0201\Omega + 0,2615\Omega + 0,476\Omega + 0,002\Omega = 0,7596\Omega$$

$$X_{kmax} = X'_{smax} + X_m + X_{jpm-m6b} + X_{jm6b-m6}$$

$$X_{kmax} = 0,2012\Omega + 4,5038\Omega + 0,309\Omega + 0,001\Omega = 5,0150\Omega$$

Kokonaisimpedanssi voidaan laskea kaavalla 15.

$$Z_{kmax} = \sqrt{(0,7596\Omega)^2 + (5,0150\Omega)^2} = 5,0722\Omega$$

Lasketaan maksimi oikosulkuvirta M6:lle pääsyöttösuunnasta kaavalla 9.

$$I_k'' = \frac{1,1 \times 21 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times 5,0722\Omega} = 2,63 \text{ kA}$$

Lasketaan k arvo kaavalla 17. R ja X on laskettu 10.1.2 kohdassa

$$k = 1,022 + 0,969 \times e^{\frac{-3,03 \times 1,052 \Omega}{2,709 \Omega}} = 1,32$$

Lasketaan  $I_p$  kaavalla 17.

$$i_p = 1,32 \times \sqrt{2} \times 4,59 \text{ kA} = 8,6 \text{ kA}$$

Otetaan huomioon Thevenin  $\pm 5\%$ :n laskentatarkkuus.

$$i_p = 8,6 \text{ kA} \times \left(1 + \frac{5\%}{100\%}\right) = 9,65 \text{ kA}$$

Terminen kestoisuus lasketaan kaavalla 19.

$$I_{th} = 4,59 \text{ kA} \times \sqrt{(0 + 1) \text{ s}} = 4,59 \text{ kA}$$

Otetaan huomioon Thevenin  $\pm 5\%$ :n laskentatarkkuus.

$$I_{th} = 4,59 \text{ kA} \times \left(1 + \frac{5\%}{100\%}\right) = 4,82 \text{ kA}$$



## Pienjännitemuuntajan toisiopuolen oikosulkulaskenta esimerkki Liite 10

Redusoidaan 20 kV jänniteportaan  $R_{kmin}$  ja  $X_{kmin}$  ( 12.1.1) 400V puolelle vaikka M1 kohdasta kaavalla 13 ja 14.

$$R'_{k400} = \left( \frac{0,4 \text{ kV}}{20 \text{ kV}} \right)^2 \times 0,9375\Omega = 0,000375\Omega = 0,375\text{m}\Omega$$

$$X'_{k400} = \left( \frac{0,4 \text{ kV}}{20 \text{ kV}} \right)^2 \times 5,9438\Omega = 0,00238\Omega = 2,378\text{m}\Omega$$

Tehdään Thevenin teoreeman mukainen sijaiskytkentä muuntajan toisiopuolelle ja lasketaan kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta  $I''_{k400}$  kaavalla 9.

$$I''_{k400min} = \frac{0,95 \times 0,4 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times \sqrt{(0,375\text{m}\Omega + 0,996\text{m}\Omega)^2 + (2,378\text{m}\Omega + 6,439\text{m}\Omega)^2}} = 24,6 \text{ kA}$$

Lasketaan minkäläisen virtana se näkyy muuntajan ensiöpuolella kaavalla 1.

$$I''_{k400min} = 24,6 \text{ kA} \times \frac{0,4 \text{ kV}}{20 \text{ kV}} = 492 \text{ A}$$

Lasketaan muuntajan pienin toisiopuolen kaksivaiheinen alkuoikosulkuvirta  $I''_{k2400min}$  kaavalla 16.

$$I''_{k2400min} = \frac{\sqrt{3}}{2} 24,6 \text{ kA} = 21,3 \text{ kA}$$

Lasketaan minkäläisen virtana se näkyy muuntajan ensiöpuolella kaavalla 1 ottaen huomioon Dyn kytkentäisen muuntajan virtapoikkeaman kertoimella  $1/\sqrt{3}$ .

$$I''_{k2400min} = 21,3 \text{ kA} \times \frac{0,4 \text{ kV}}{20 \text{ kV}} \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 246 \text{ A}$$

Lasketaan kaikkien muuntajien alkuoikosulkuvirrat ja ensiön vastaava virrat ja viedään ne taulukkoon 16.

.  $C_{\text{kok}}$  lasketaan yhteen.

$$C_{\text{kok}} = (811,2 + 226,1 + 392,0 + 221,9 + 235,4 + 11,1 + 17,5 + 50,2 + 94,4) \text{ nF} = 2060 \text{ nF}$$

Lasketaan  $U_0$  vikaresistanssin ollessa  $500 \Omega$  kaavalla 26.

$$U_0 = \frac{\frac{20 \text{ kV}}{\sqrt{3}}}{\sqrt{1 + (3\omega \times 2060 \text{ nF} \times 500 \Omega)^2}} = 8,29 \text{ kV}$$

Lasketaan  $U_0$  jännite vikaresistanssin ollessa 0, 1000, 2000 ja  $3000 \Omega$  ja viedään tulokset taulukko 20.

$$C_k = 2060 \text{ nF} - 94,4 \text{ nF} = 1965,6 \text{ nF}$$

Lasketaan kokonaismaasulkuvirta  $500 \Omega$  resistanssin kautta kaavalla 25.

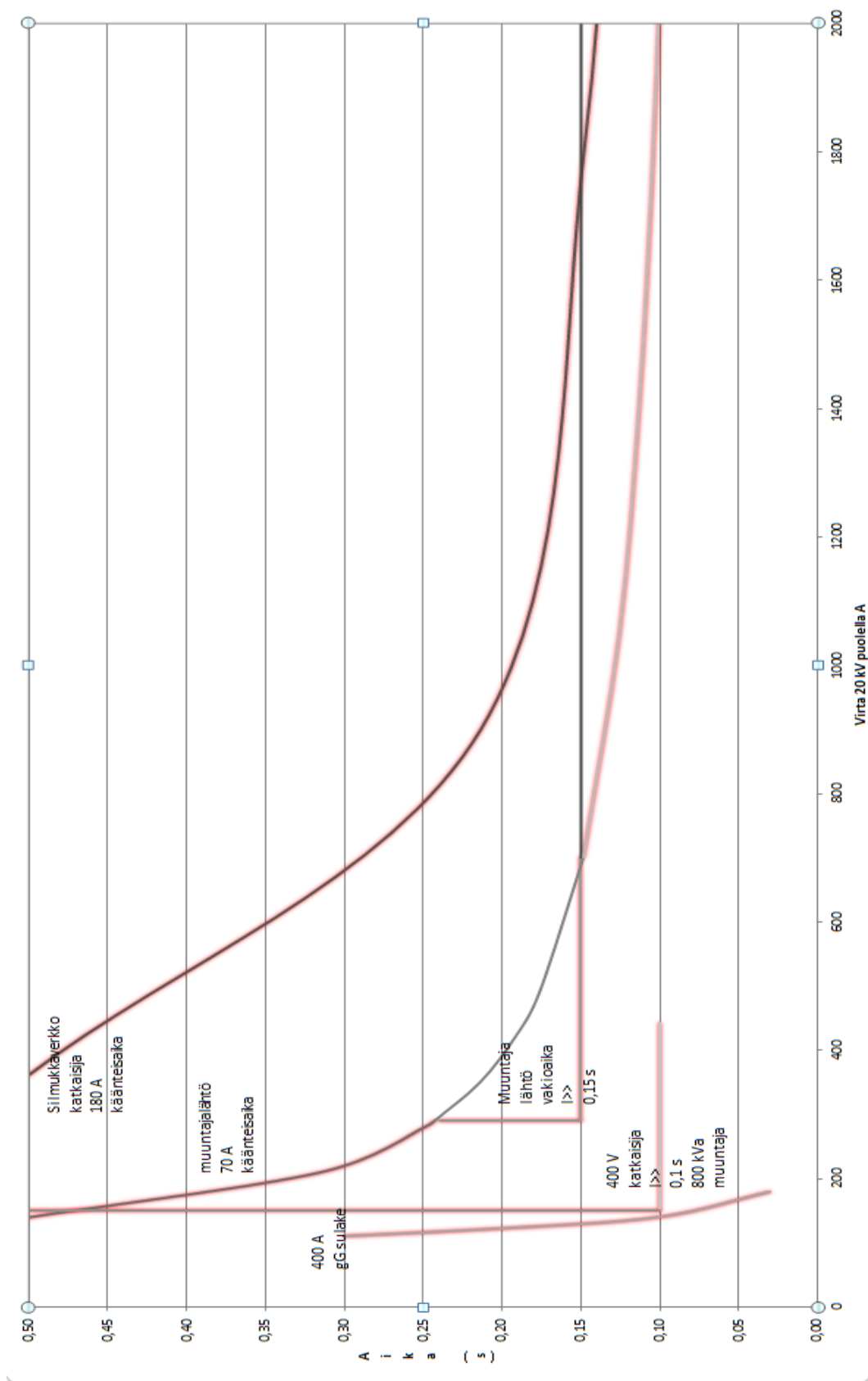
$$I_f = \frac{3\omega \times 1965,6 \text{ nF}}{\sqrt{1 + (3\omega \times 1965,6 \text{ nF} \times 500 \Omega)^2}} \times \frac{20 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 15,7 \text{ A}$$

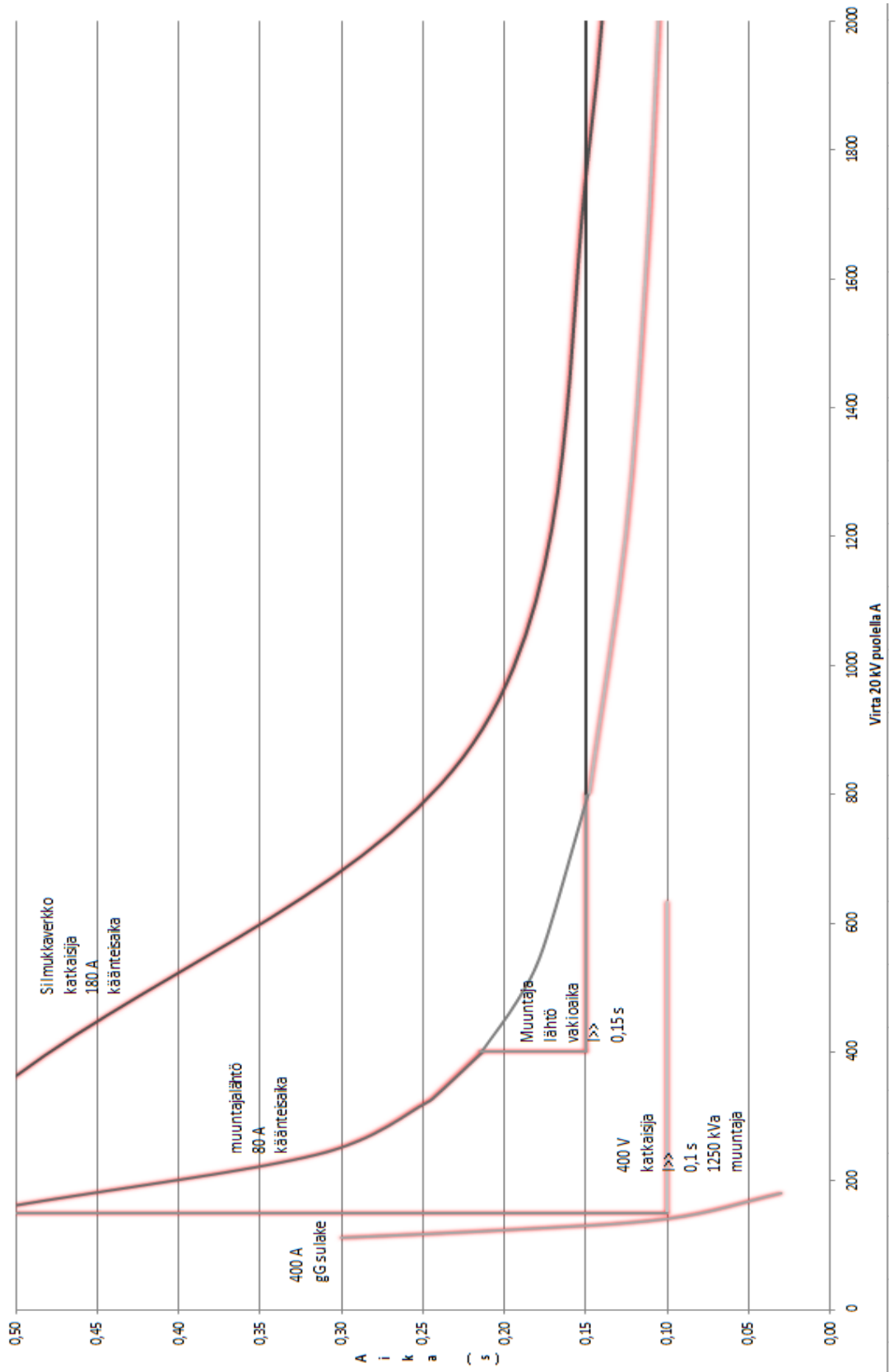
Lasketaan kunkin haaran releen tuntema maasulkuvirta  $500 \Omega$  vikaresistanssilla. Lasketaan haaran A maasulkuvirta kaavalla 25.

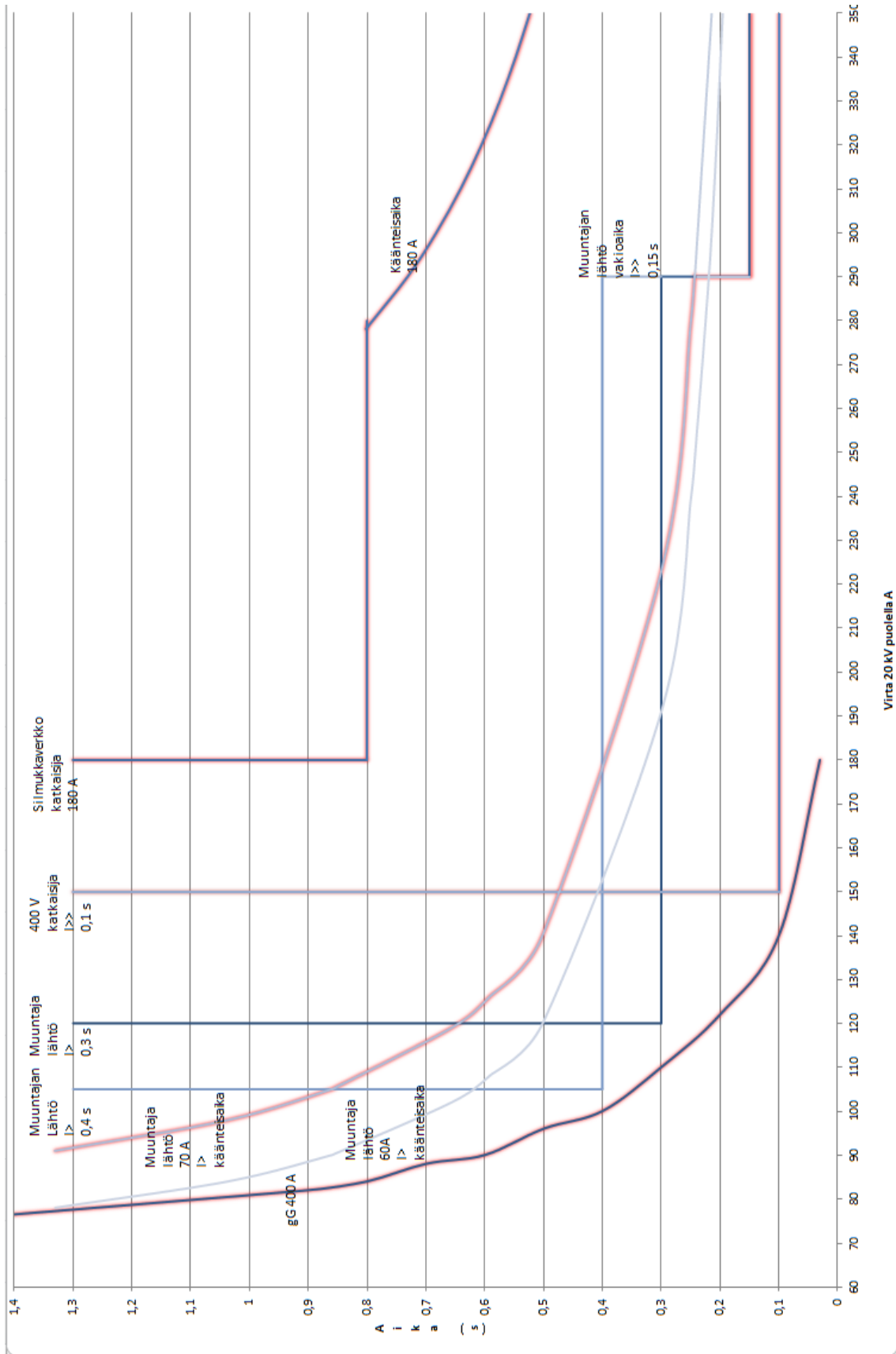
$$I_r = \frac{1965,6 \text{ nF} - 226,1 \text{ nF}}{1965,6 \text{ nF}} \times 15,7 \text{ A} = 13,89 \text{ A}$$

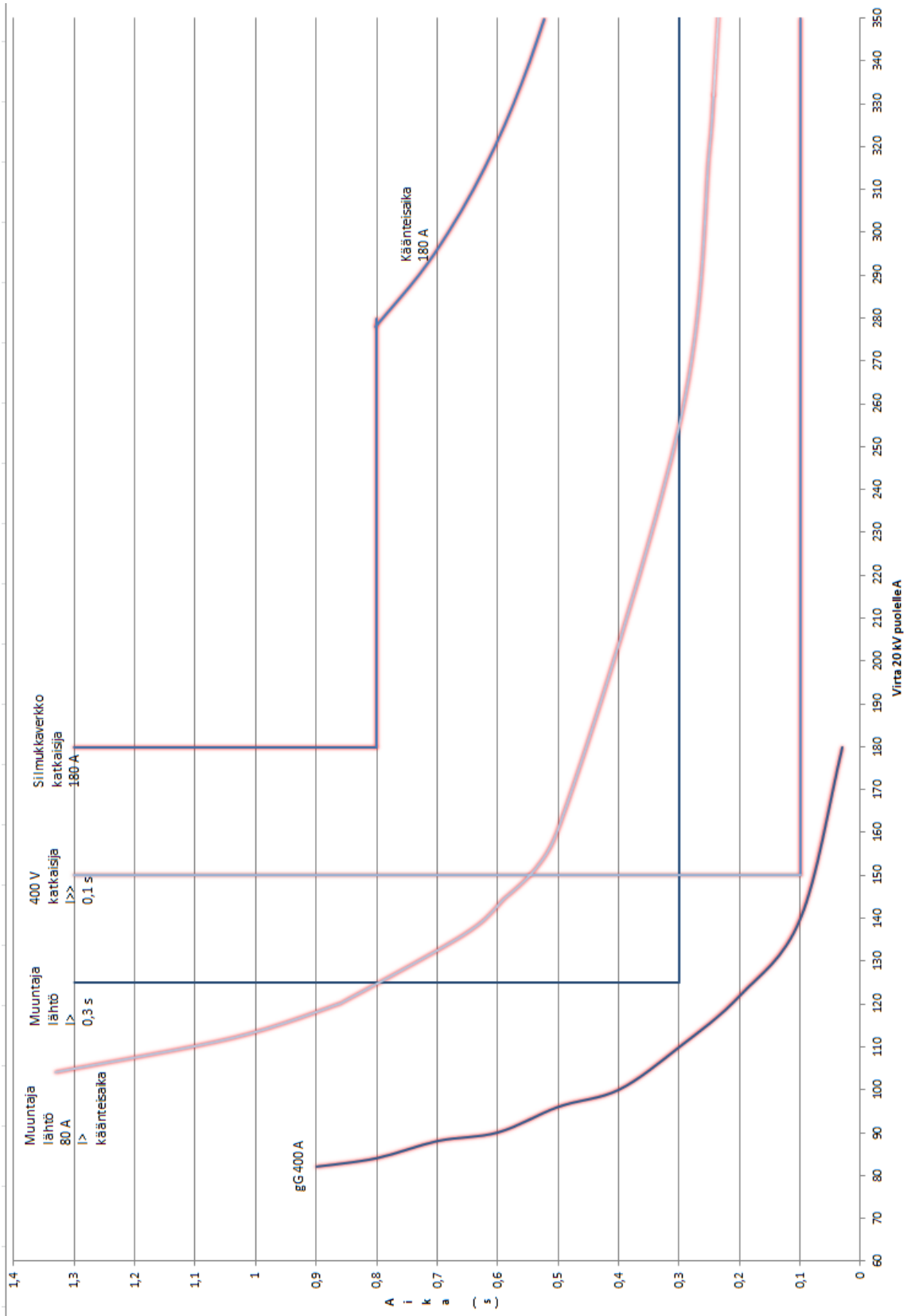
Lasketaan myös maasulkuvirrat maaresistanssin ollessa 0, 1000, 2000 ja  $3000 \Omega$  ja viedään tulokset taulukko 21.

$$0 \Omega \text{ maaresistanssilla} \quad I_f = 21,39 \text{ A}$$

















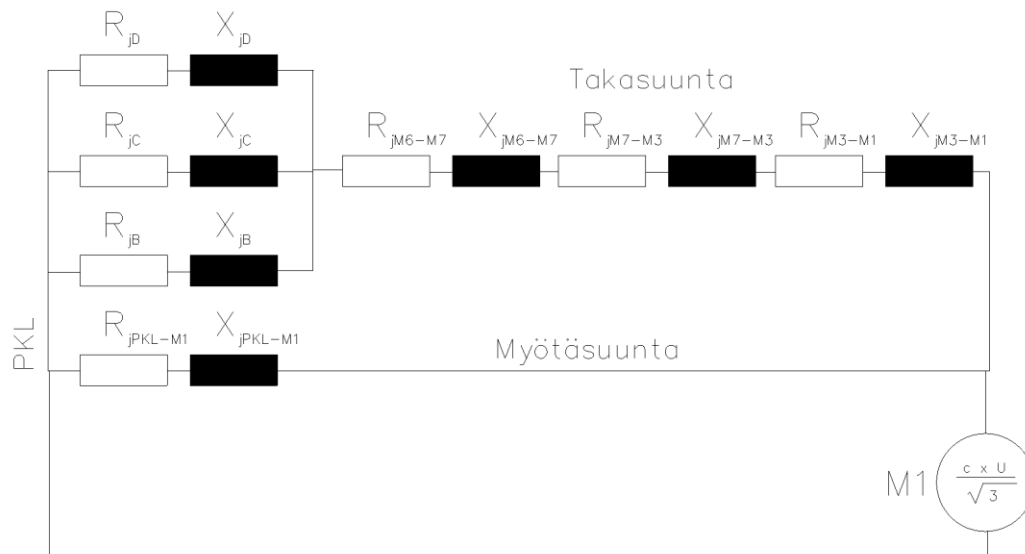








Kojeistoille tuleva oikosulkuvirta jakautuu silmukkaverkossa kahteen tai useampaan suuntaan silmukkaverkon osalla. Tässä opinnäytetyössä kutsutaan myötäsunnaksi syötösunnasta haarautumatonta kaapelireittiä ja takasuunnaksi haarautuvaa kaapelireittiä kuvio 35 selventää asiaa. Lasketaan miten kojeistolle M1 oikosulkuvirta jakautuu ohmin lakia hyväksikäyttäen. Käytetään aiemmin laskettuja arvoja hyväksi.



**Kuvio 35. Kojeistolle tuleva oikosulkuvirta jakautuu kahteen tai useampaan haaraan. Kutsutaan tässä opinnäytetyössä haarautumatonta kaapelireittiä myötäsunnaksi ja haarautuvaa kaapelireittiä takasuunnaksi.**

$$I_{\text{myötäsuenta}} = \frac{Z_{jBCD}}{Z_{jBCD} + Z_{PjpkL-m1}} \times 100\% = \frac{0,237\Omega}{0,237\Omega + 0,0269\Omega} \times 100\% = 90\%$$

$$I_{\text{takasuunta}} = \frac{Z_{jpkL-m1}}{Z_{jBCD} + Z_{PjpkL-m1}} \times 100\% = \frac{0,0269\Omega}{0,237\Omega + 0,0269\Omega} \times 100\% = 10\%$$

Lasketaan kaikkien kojeistojen virran jakautuminen ja viedään tulokset taulukkoon 30.

**Taulukko 30. Kojeiston ottaman vikavirran jakautuminen myötä ja takasuuntaan.**

Kojeisto	Myötäsuunta Kokonaisvirrasta % osuus	Takasuunta Kokonaisvirrasta % osuus
M1	90	10
M3	62	38
M7	48	52
M2	84	16
M9	46	54
M10	44	56
M4	61	39
M5	51	49
M17	74	26
M15	63	37
M14	38	62

M6 kojeistolle tuleva virta jakautuu haara A 28 %, B 16%, C 29% ja D 27%.





