

**KEMI-TORNION AMMATTIKORKEAKOULU
TEKNIikka**

Koskinen Stefanus

**Vesivoimakoneen liittymisjohdon oiko- ja
maasulkusuojauksen suunnittelu Pirttikosken 20 kV:n
kojeistoon**

Sähkötekniikan koulutusohjelman opinnäytetyö
Sähkövoimatekniikka
Kemi 2010

ALKUSANAT

Kiitokset Kemijoki Oy:n tekniselle päällikölle Heikki Kusminille ja suunnitteluinsinööri Sami Soudunsaarelle opinnäytetyön aiheesta ja kaikesta avusta. Kiitokset ansaitsee myös opinnäytetyöni ohjaaja Antero Martimo.

TIIVISTELMÄ

Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, Tekniikan yksikkö	
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Opinnäytetyön tekijä	Stefanus Koskinen
Opinnäytetyön nimi	Vesivoimakoneen liittymisjohdon oiko- ja maasulkusuojauksen suunnittelu Pirttikosken 20 kV:n kojeistoon
Työn laji	Opinnäytetyö
päiväys	30.11.2010
sivumäärä	61 + 50 liitesivua
Opinnäytetyön ohjaaja	Tuntiopettaja Antero Martimo
Yritys	Kemijoki Oy
Yrityksen yhteyshenkilö/valvoja	Tekninen päällikkö Heikki Kusmin

Opinnäytetyön tavoitteena on ollut Kemijoki Oy:n Pirttikosken vesivoimalaitoksen ja Keski-Lapin Voima Oy:n Juotaksen vesivoimalaitoksen välisen sähköverkon, Pirttikosken vesivoimalaitoksen puoleisen johtolähdön oiko- ja maasulkusuojauksen suunnittelu.

Työssä on arvioitu johtolähdön suojaukseen vaikuttavat oiko- ja maasulkuvirrat. Tuloksena on ehdotus, jossa jo ennestään käytössä olleesta johtolähdöstä korvataan vanhat suojareleet nykyaikaisilla suojareleillä. Oikosulkusuojauksen suhteen on päädytty 2-portaiseen suojaukseen, jossa ensimmäinen porrás toimii käänteisaikaisena. Maasulkusuojauksen suhteen on päädytty suunnattuun maasulkusuojaukseen. Työssä on esitetty ehdotus oiko- ja maasulkureleiden asetteluarvoista.

Mittamuuntajat muodostavat tärkeän osan oiko- ja maasulkusuojausta. Työssä on todettu, että nykyiset oiko- ja maasulkusuojauksessa käytetyt virta- ja jännitemuuntajat eivät täytä tarkkuusvaatimuksia, sillä muuntajia käytetään osana kaupallisen sähkönsiirron mittausta. Työssä on esitetty ehdotus korvaavien mittamuuntajien arvoista.

Opinnäytetyön tavoitteisiin kuului myös tarkastelu Pirttikosken 13,8 kV:n järjestelmässä sijaitsevien, oikosulkuvirtaa rajoittavien kuristimien poistosta aiheutuvien oikosulkuvirtojen kasvun vaikutus johtolähdön komponentteihin. Työssä on todettu kuristimien mahdollisesta poistosta aiheutuvien oikosulkuvirtojen kasvu maltilliseksi. Oikosulkuarvojen kasvu ei vaaranna johtolähdön komponenttien termisiä ja dynaamisia kestävyksiä.

Asiasanat: oikosulku, maasulku, suojarele.

ABSTRACT

Kemi-Tornio University of Applied Sciences, Technology	
Degree Programme	Electrical Engineering
Author	Stefanus Koskinen
Title of Thesis	Design of a 20 kV Feeders Short-Circuit and Earth Fault Protection in Pirttikoski Hydroelectric Power Station.
Type of Study	Bachelor's Thesis
Date	30 November 2010
Pages	61 + 50 appendices
Instructor	Antero Martimo, BSc, eng
Company	Kemijoki Oy
Contact Person/Supervisor from Company	Heikki Kusmin, technical manager

The aim of this thesis was to design short-circuit and earth fault protection of a feeder in the Pirttikoski hydroelectric power stations 20 kV-system. The feeder is part of the grid between the power stations of Pirttikoski and Juotas. Another aim of this thesis was to estimate the effects of a possible removal of the short-circuit current restricting ballast, located at the Pirttikoski hydroelectric stations 13,8 kV-system, would have on the feeders components.

An evaluation of short-circuit and earth fault currents that have an effect on the protection of the feeder have been made. As a result of the evaluation it is recommended that the old, long in service been feeder will be updated whit modern protection relays. In the case of short-circuit protection, a 2-step protection, the first being inverse timed, is recommended. The earth fault protection is recommended to be directional. This thesis also includes recommendations of protection relay settings.

Instrument transformers play a vital role in the field of short-circuit an earth fault protection. The instrument transformers now in service do not fulfill modern demands of exactness in measurement of commercial electrical transmissions. A proposal of replacing instrument transformers and their properties has been made.

On the base of this work, a removal of the ballast will increase short-circuit currents only moderately. The increased short-circuit current values do not hazard the feeders components thermal nor dynamic limit values.

Keywords: short-circuit, earth fault, protection relay.

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT	I
TIIVISTELMÄ.....	II
ABSTRACT.....	III
SISÄLLYSLUETTELO	IV
KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET.....	VI
1. JOHDANTO	1
1.1. Kemijoki Oy.....	1
1.2. Työn tavoitteet ja rajaus	2
2. PIRTTIKOSKEN VESIVOIMALAITOS	3
2.1. Yleistä	3
2.2. Tekniset tiedot.....	4
2.3. Pääkaavio	4
3. OIKOSULKU.....	6
3.1. 3-vaiheinen oikosulku	7
3.2. 2-vaiheinen oikosulku	9
3.3. Oikosulkupiirin komponenttien mallintaminen	11
3.3.1. Syöttävä verkko.....	11
3.3.2. Generaattori.....	11
3.3.3. Muuntaja ja kuristin	12
3.4. Muita oikosulkusuureita.....	14
3.4.1. Oikosulkuteho	14
3.4.2. Sysäysoikosulkuvirta.....	14
3.4.3. Terminen oikosulkuvirta	15
3.4.4. Katkaisuvirta	16
4. MAASULKU	18
4.1. Maasulkusuojaus	22
4.2. Maasulkureleistyksen toteuttaminen	24
5. SUOJARELE	26
5.1. Suojarelelajit	26
5.1.1. Sähkömekaaniset releet.....	26
5.1.2. Tasasuuntaajareleet	27
5.1.3. Staattiset releet	27
5.1.4. Numeeriset releet	28
5.2. Keskeiset suojareletyypit.....	29
5.2.1. Virtarele.....	29
5.2.2. Ylijänniterele.....	30
5.2.3. Suunta- ja tehorele.....	30
6. MITTAMUUNTAJAT.....	31
6.1. Jännitemuuntaja	31
6.2. Virtamuuntaja.....	32
6.3. Virtamuuntajan suojauskohteet.....	36
7. OIKOSULKUSUOJAUS	39
7.1. Aikaselektiivinen suojaus.....	39
7.2. Aika- ja virtaselektiivinen suojaus.....	42

8.	JOHTOLÄHDÖN MAA- JA OIKOSULKUSUOJAUS	44
8.1.	Oikosulkuun liittyvät laskutulokset.....	44
8.2.	Oikosulkusuojauksen toteutus.....	48
8.3.	Maasulkusuojaukseen liittyvät laskutulokset.....	49
8.3.1.	Maasulkuvirta.....	49
8.3.2.	Nollavirta.....	50
8.3.3.	Nollajännite	50
8.3.4.	Kosketusjännite	51
8.4.	Maasulkusuojauksen toteutus.....	51
8.5.	Komponenttien tarkastelu	52
8.5.1.	Virtamuuntajat.....	52
8.5.2.	Kaapelivirtamuuntaja	54
8.5.3.	Jännitemuuntajat	55
8.5.4.	Katkaisija.....	56
8.5.5.	Kaapeli	56
9.	TEHTÄVÄT MUUTOKSET.....	57
10.	YHTEENVETO	59
11.	LÄHDELUETTELO	60
12.	LIITELUETTELO.....	61

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

T	oikosulun tasavirtakomponentin aikavakio
c	jännitekerroin
κ	sysäyskerroin
m	tasavirtatekijä
n	vaihtovirtatekijä
μ	katkaisukerroin
t_{\min}	katkaisuviive
ω	kulmataajuus
k	maadoitustavasta riippuvainen kerroin
β	käänteisaikatoimintakäyrän vakio
α	käänteisaikatoimintakäyrän vakio

1. JOHDANTO

1.1. Kemijoki Oy

Kemijoki Oy on vuonna 1954 perustettu yritys, joka harjoittaa vesivoiman tuotantoa pääosin Pohjois-Suomessa. Yritys omistaa 20 vesivoimalaitosta Suomessa ja on näin ollen Suomen merkittävin vesivoiman tuottaja. Vesivoimalaitoksista 16 sijaitsee Kemijoen valuma-alueella. Yhtiön ensimmäinen vesivoimalaitos valmistui vuonna 1958 Petäjaskoskelle, joka on vieläkin yhtiön suurin vesivoimalaitos. Tästä eteenpäin rakentaminen on jatkunut melkein tauotta ja viimeinen voimalaitos valmistui vuonna 2001 Kelukoskelle. Kemijoki Oy:n vesivoimalaitosten kokonaisteho ylittää 1000 MW. Vuositasolla Kemijoki Oy:n laitokset tuottavat keskimäärin n. 4,4 TWh sähköenergiaa. Yhtiö kattaa tuotannollaan kolmanneksen Suomen säätötehon tarpeesta. /7/

Yhtiön tytäryhtiöt harjoittavat sähköverkkotoimintaa sekä vesivoimateknologiaan liittyviä palveluita ja tuotteiden myyntiä. Vuonna 2008 yhtiön palveluksessa oli 280 henkilöä. Saman vuoden liikevaihto oli 49,9 miljoonaa euroa. Kemijoki Oy:n suurin omistaja on Suomen valtion, joka omistaa hieman yli 50 % yrityksestä. /7/



Kuva 1. Kemijoki Oy:n vesivoimalaitokset Kemijoen valuma-alueella /7/

1.2. Työn tavoitteet ja rajaus

Pirttikosken ja Juotaksen vesivoimalaitosten välillä on rakenteilla 20 kV:n verkkoyhteys, jolla saadaan siirrettyä Juotaksen vesivoimalaitoksen tuottama sähköenergia Pirttikosken 20 kV:n järjestelmään.

Keski-Lapin Voima Oy:n omistaman Juotaksen vesivoimalaitoksen tuottama sähköenergia siirrettiin alun perin Kemijärven alueelle. Verkon pituuden takia kohtuuttoman suuri osa verkon tehosta on hävinnyt siirtohäviöiden myötä. Näin ollen Juotaksen vesivoimalaitoksen ja Kemijärven välinen verkko on osittain purettu.

Juotaksen vesivoimalaitoksen tuottaman sähköenergia saadaan Pirttikosken yhteyden myötä siirrettyä kantaverkkoon. Sähkö muunnetaan Pirttikosken vesivoimalaitoksella ensiksi 13,8 kV:n tasolle ja sen jälkeen kantaverkon 400 kV:n tasolle.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella Pirttikosken puoleisen johtolähdön maasekä oikosulkusuojaus. Jo ennestään käytössä olevasta johtolähdöstä tarkistetaan mittamuuntajien, katkaisijan ja sen jälkeisen kaapelin soveltuvuudet, muuttuneet olosuhteet huomioon ottaen.

Työssä on myös tarkoitus tarkistaa Pirttikosken 13,8 kV:n järjestelmän kuristimien poiston vaikutusta johtolähdön oikosulkuvirta-arvoihin, sillä päämuuntajien vaihdon myötä oikosulkuvirtoja rajoittavien kuristimien tarpeellisuus on kyseenalainen.

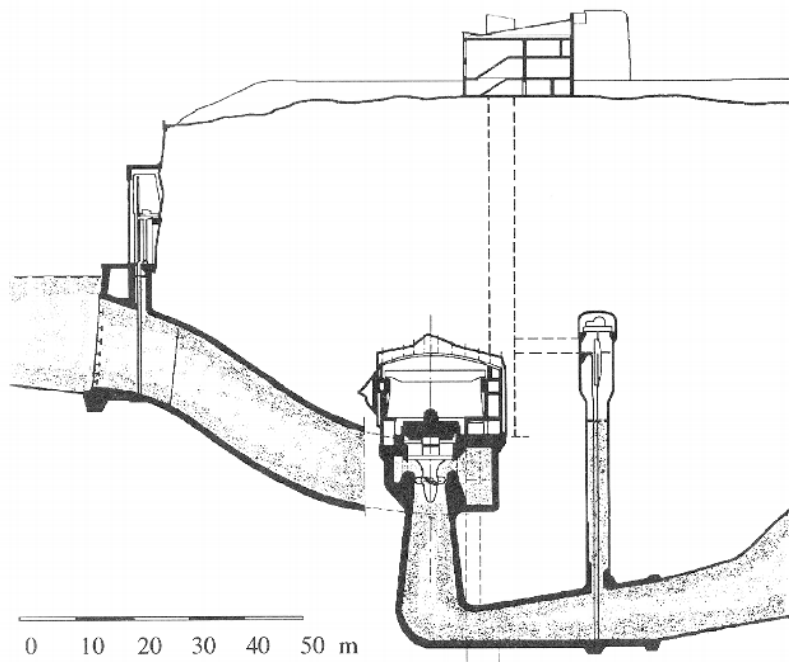
2. PIRTTIKOSKEN VESIVOIMALAITOS

2.1. Yleistä

Pirttikosken vesivoimalaitos on vuonna 1959 valmistunut vesivoimalaitos, joka sijaitsee Rovaniemen kunnassa. Pirttikosken voimalaitos on ns. tunnelivoimalaitos, jossa koneasema on sijoitettu louhittuun tunneliin, 60 metrin syvyyteen. Vesivoimalaitoksen erityispiirteisiin kuuluu sen päättunneli, joka on pituudeltaan n. 2,5 km. /7/

Laitoksella on meneillä vuonna 2009 aloitettu tehonnosto, jonka tarkoituksena on lisätä laitoksen maksimitehoa ja vuosienenergiaa. Tehonlisäys toteutetaan muuttamalla molempien Kaplan-tyyppisten turbiinien siipien muotoilua, minkä seurauksena niiden läpi voidaan ajaa suurempi virtaama.

Tehonnostossa uusitaan molempien generaattorien staattorit ja roottorin navat sekä molemmat päämuuntajat. Tehonnosto lisää laitoksen tehoa 30 MWA, mikä tarkoittaa n. 30 MWh:n tuotantolisäystä vuositasolla. Näin ollen laitos nousee Suomen kolmanneksi suurimmaksi vesivoimalaitokseksi. /7/



Kuva 2. Pirttikosken vesivoimalaitos /3/

2.2. Tekniset tiedot

Generaattorit

Teho/yksikkö	85 MVA
Jännite	13,8 kV

Turbiinit

Teho	75 MW
------	-------

Päämuuntajat

Teho	85 MVA
Jännitteet	410 kV / 13,8 KV

Muut

Putouskorkeus	26 m
Rakennusvirtaama	700 m/s
Huipputeho	150 MVA
Vuosienergia	581 GWh /7/

2.3. Pääkaavio

Kuvassa 3 on esitetty osa Pirttikosken vesivoimalaitoksen pääkaaviosta, tosin pelkistetyssä muodossa. Molempien tahtigeneraattorien tuottama sähkö on potentiaaliltaan 13,8 kV:n tasoista. Sähkö muunnetaan päämuuntajien kautta 400 kV:n tasolle ja syötetään eteenpäin kantaverkkoon.

20 kV:n järjestelmään on yhdistetty neljä johtolähtöä. Yhteydet kulkevat Juotaksen, Seitakorvan ja Vanttauskosken vesivoimalaitoksille sekä Pirttikosken laitoksen läheisyydessä sijaitsevalle korjaamolle. Kaikkien paitsi korjaamon johtolähdön päässä on sähkötuotantoa. Normaalissa tilanteessa pelkästään yksi 13,8 kV:n ja 20 kV:n järjestelmät yhdistävistä tehovälimuuntajista on käytössä.

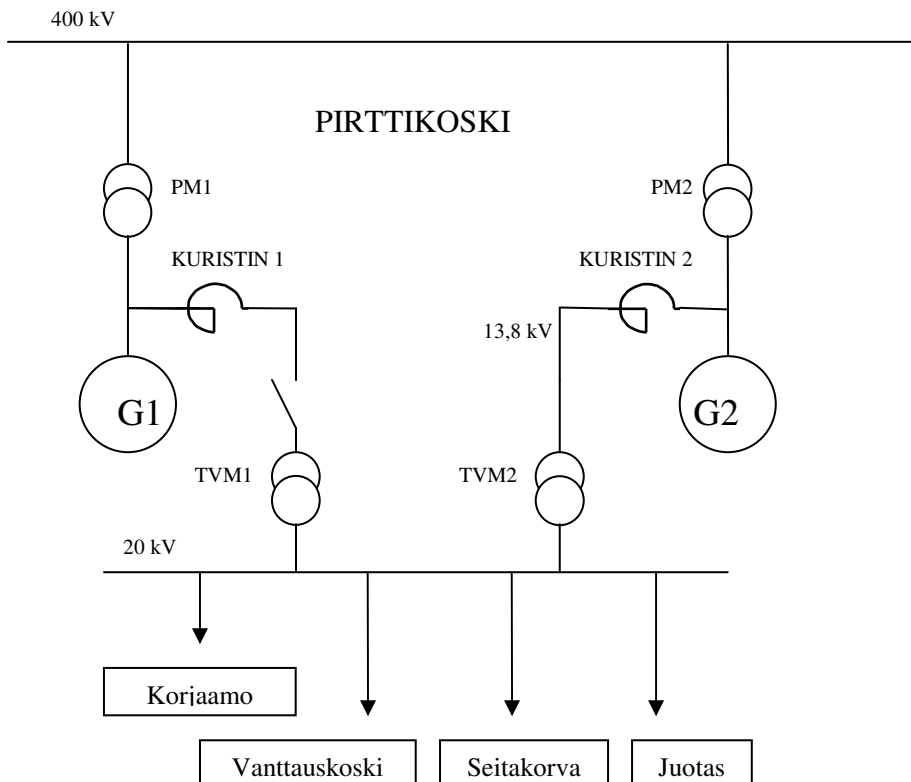
Pääkaavio esitetään kokonaisuudessaan liitteessä 5. Pääkaaviossa Juotaksen lähtö on merkitty numerolla 6.7.0, Seitakorva 6.9.0, Vanttauskoski 6.8.0 ja korjaamo 6.4.0.

Johtolähdöt sijaitsevat Pirttikosken 20 kV:n kytkinlaitoksessa, joka kostuu useammasta kennosta. Kennosto on yhteydessä 20 kV:n kiskostoon. Yksi kenno kostuu ulos vedettävästä katkaisijavaunusta sekä ylivirta- ja maasulkusuojuuksesta. Virtamuuntajat on

asennettu katkaisijavaunuun. Jännitemuuntajat on asennettu yhteen kytkinlaitoksen kennoista. Maasulkuvirran mittausta on toteutettu kaapelivirtamuuntajilla. Ylivirta- ja maasulkusuojaus on toteutettu sähkömekaanisilla releillä.

Pirttikosken ja Juotaksen välinen yhteys koostuu Pirttikoskelta päin katsottuna kennostosta lähtevästä kaapelista, joka on pituudeltaan n. 250 m. Jälkimmäinen osuus on avojohtoverkkoa, pituudeltaan n. 10 km.

Kuristimien tarkoituksena on rajoittaa taustaverkon ja Pirttikosken vesivoimalaitoksen generaattorien tuottamaa oikosulkuvirtaa tilanteessa, jossa Pirttikosken vesivoimalaitoksen 20 kV:n järjestelmässä sattuisi oikosulku.



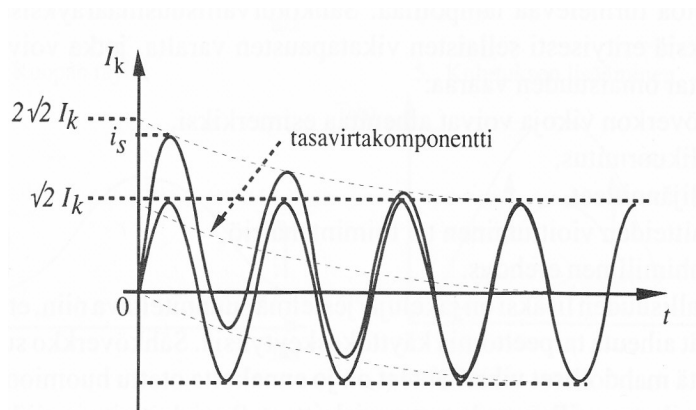
Kuva 3. Osa Pirttikosken vesivoimalaitoksen pääkaaviosta

3. OIKOSULKU

Sähköverkon suojausta suunniteltaessa ja suojausarvojen asetteluarvojen määrittäessä on selvítettävä verkossa esiintyvät oikosulkuvirrat sekä oikosulun vaikutuksille alttiiden verkon komponenttien oikosulkukestoisuudet. Oikosulkuvirran suuruus on pääosin riippuvainen vikatapauksessa sekä verkon kytkentätilanteesta vian tapahtumahetkellä. Teollisuusverkkojen vikatapauksiin lasketaan kolmivaiheinen oikosulku, kaksivaiheinen oikosulku sekä teollisuusverkkojen maasta erotetun sähköjärjestelmän johdosta kaksivaiheinen maasulku ja yksivaiheinen maasulku. Näistä 3-vaiheinen oikosulku on sähköverkkoa eniten rasittava, saavuttaen jopa 30–40 -kertaisia nimellisvirta-arvoja. /3/, /6/

Oikosulkuvirta koostuu sinimuotoisesta, ajan funktiona vaihtelevasta vaihtovirtakomponentista ja tasavirtakomponentista. Oikosulun syntymähetki määrittää oikosulun symmetrisyyden sekä tasavirtakomponentin suuruuden. Oikosulun sattuessa hetkellä, jolloin jännitteen vaihekulma nollakohdasta laskettu sekä oikosulkupiirin vaihekulman välinen ero on 0° tai 180° , katsotaan oikosulun olevan symmetrinen ja tasavirtakomponenttia ei esiinny. Toisin oikosulkuvirta voi olla symmetrinen ainoastaan yhdessä vaiheessa kerrallaan, sillä vaihejännitteet eroavat toisistaan 120° . Oikosulkuvirran katsotaankin olevan sattumanvaraista välimuotoa. /6/

Oikosulkuvirran katsotaan olevan mahdollisimman epäsymmetrinen, kun oikosulkuhetkellä jännitteen vaihekulma nollakohdasta laskettuna ja oikosulkupiirin vaihekulman välinen ero on $\pm 90^\circ$. Kuvassa 4 on esitetty symmetrinen ja epäsymmetrinen oikosulkuvirta. Suurin oikosulkuvirran hetkellisarvo esiintyy yhden puolijakson kuluttua oikosulun syntyhetkestä. Ilmiötä kutsutaan sysäysoikosulkuvirraksi i_s . Oikosulun alkuehkellä on suuri vaikutus sysäysoikosulkuvirran suuruuteen. /6/



Kuva 4. Symmetrinen ja epäsymmetrinen oikosulkuvirta kaukana generaattorista /3/

Oikosulun tasavirtakomponentti vaimenee eksponentiaalisesti aikavakiolla T ja sen suuruus on riippuvainen oikosulkupiirin reaktanssin ja resistanssin suhteesta. Tasavirtakomponentin katsotaan olevan haitallinen vaihtovirtapiirissä, jossa se saattaa esimerkiksi vaikuttaa mittamuuntajien tarkkuuteen /3/. Oikosulun vaihtovirtakomponentti

vaimenee myös ajan funktiona, kun oikosulku tapahtuu generaattorin läheisyydessä. Vaihtovirtakomponentin vaimeneminen johtuu tahtigeneraattorin sisäisen impedanssin kasvamisesta oikosulun aikana. /6/

Oikosulkulaskuissa käytetään mm. Thevinin menetelmää, jossa oikosulkupiiristä mallinnetaan yksivaiheinen sijaiskytkentä korvaamalla verkon komponentit ja lähteet niitä vastaavilla impedansseilla sekä sijoittamalla piiriin jännitelähde. Jännitelähde kuvaa oikosulkuhetkellä vallitsevaa jännitetasoa oikosulkukohdassa. /8/

3.1. 3-vaiheinen oikosulku

Kolmivaihejärjestelmän laskemista ja vaikutusta käsitellään standardeissa IEC-60909. Standardeissa on ilmoitettu oikosulkulaskuissa käytettävän jännitekertoimen c arvot, jota käytetään laskettaessa maksimi- ja minimioikosulkuvirtoja. Jännitekertoimen c arvot ovat esitetty taulukossa 1. /5/

Taulukko 1. Jännitekerroin /5/

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

Oikosulkukohdan kolmivaiheinen oikosulkuvirta I_{k3} lasketaan seuraavasti:

$$I_{k3} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (1)$$

missä

c on jännitekerroin

U_n on pääjännite ennen vikaa

R_k on oikosulkupiirin resistanssi

X_k on oikosulkupiirin reaktanssi. /5/

Oikosulun tapahtuessa tahtigeneraattorin läheisyydessä on otettava huomioon tahtikoneen alku-, muutos- ja jatkuvan tilan reaktanssit. Generaattorin läheisyydessä tapahtuva kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta lasketaan kaavalla 2. /5/

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + (X_k + X''_d)^2}} \quad (2)$$

missä

I''_{k3} on oikosulkuvirran alkuarvo

c on jännitekerroin

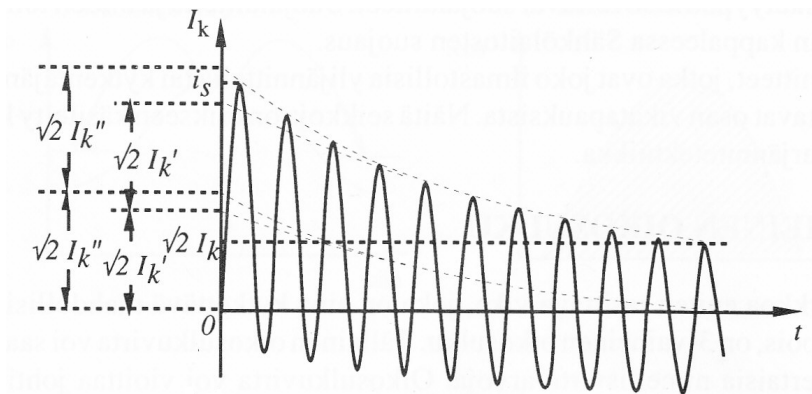
U_N on pääjännite

R_k on oikosulkupiirin resistanssi

X_k on oikosulkupiirin reaktanssi

X''_d on generaattorin alkureaktanssi

Kuvassa 5 esitetään tahtikoneen läheisyydessä tapahtuvaa oikosulkuvirran muutosta ajan funktiona.



Kuva 5. Epäsymmetrinen oikosulkuvirta tahtikoneen läheisyydessä /3/

Alkuoikosulkuvirran katsotaan vaimentuvan nopeasti ja mitä kauempana tahtikoneesta oikosulku tapahtuu, sitä pienemmät ovat sen reaktanssien vaikutukset oikosulkuvirtaan. Muutostilan oikosulun I'_k ratkomiseen käytetään tahtikoneen pitkittäistä muutosreaktanssia X'_d . /5/

$$I'_{k3} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + (X_k + X'_d)^2}} \quad (3)$$

missä

I'_{k3} on oikosulkuvirran muutostilan arvo

c on jännitekerroin

U_N on pääjännite

R_k on oikosulkupiirin resistanssi

X_k on oikosulkupiirin reaktanssi

X'_d on generaattorin muutostilan reaktanssi

Tahtikoneen läheisyydessä tapahtuvan oikosulun jatkuvan tilan oikosulkuvirran I_k laskuissa käytetään tahtikoneen pitkittäisreaktanssia X_d . /5/

$$I_{k3} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + (X_k + X_d)^2}} \quad (4)$$

missä

I_{k3} on oikosulkuvirran jatkuvan tilan arvo

c on jännitekerroin

U_N on pääjännite

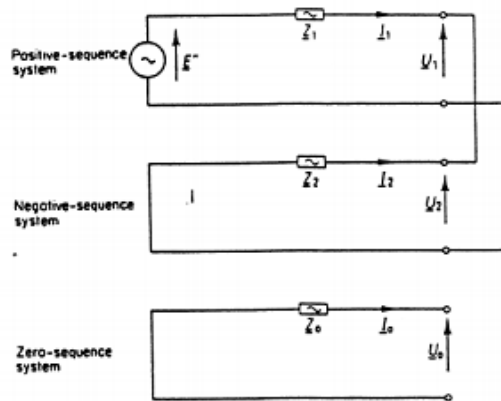
R_k on oikosulkupiirin resistanssi

X_k on oikosulkupiirin reaktanssi

X_d on generaattorin jatkuvan tilan reaktanssi

3.2. 2-vaiheinen oikosulku

Kaksivaiheinen oikosulku on järjestelmän kannalta epäsymmetrinen. Kaksivaiheisen oikosulun aikana verkon jännitteet ja virrat eivät ole symmetrisiä. Tällöin laskuissa ei voida käyttää kolmivaiheisen oikosulun yksivaiheista sijaiskytkentää, vaan jokaista vaihetta on tarkasteltava erikseen. Epäsymmetristen tilojen käsittelyssä verkon eri osille muodostetaan myötä-, vasta- ja nollaimpedanssit. Myötä- ja vastaimpedanssit ovat muuntajilla, kuristimilla ja johdoilla yhtä suuret. Sen sijaan generaattoreilla myötä- ja vastaimpedanssit eroavat toisistaan. Tahtigeneraattorin vastaimpedanssi on oikosulun alkuhetkillä myötäimpedanssin suuruinen, jolloin oikosulkupiirin myötä- ja vastaimpedanssit ovat yhtä suuruiset. Tahtikoneen myötäreaktanssi kasvaa kuitenkin oikosulun aikana saavuttaen tahtireaktanssin arvon. Kaksivaiheisessa oikosulussa myötä-, vasta- ja nollaimpedanssit kytkeytyvät kuvan 6 mukaisesti. /4/, /6/



Kuva 6. 2-vaiheisen oikosulun komponenttiverkojen kytkeytyminen /6/

Kaksivaiheisessa oikosulussa tahtigeneraattorin läheisyydessä oikosulkuvirtaan vaikuttaa oikosulkupiirin myötä- ja vastaimpedanssit. Oikosulkuvirta lasketaan kaavalla 5. /5/

$$I_{k2} = \frac{c \cdot U_N}{Z_1 + Z_2} \quad (5)$$

missä

I_{k2} on kaksivaiheinen oikosulkuvirta

c on jännitekerroin

U_N on pääjännite

Z_1 on myötäkomponenttiverkon impedanssi

Z_2 on vastakomponenttiverkon impedanssi

Seuraava pätee tilanteessa, jossa oikosulku sattuu kaukana generaattoreista ja pyörivistä koneista. Kaksivaiheinen oikosulkuvirta voidaan esittää kolmivaiheisen oikosulkuvirran avulla seuraavasti. /5/

$$I_{k2} = \frac{c \cdot U_N}{2 \cdot Z_{k3}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{k3} \quad (6)$$

missä

I_{k2} on kaksivaiheinen oikosulku

c on jännitekerroin

U_N on pääjännite

Z_{k3} on vastaavan kolmivaiheisen oikosulkupiirin impedanssi

3.3. Oikosulkupiirin komponenttien mallintaminen

3.3.1. Syöttävä verkko

Syöttävästä verkosta tunnetaan yleensä joko oikosulkuvirta I_k tai oikosulkuteho S_k . Syöttävän verkon impedanssi lasketaan kaavalla 7. /5/

$$Z_k = \frac{c \cdot U_N^2}{S_k} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot I_k} \quad (7)$$

missä

Z_k on syöttävän verkon oikosulkuimpedanssi

c on jännitekerroin

U_N on nimellisjännite

S_k on verkon oikosulkuteho

I_k on verkon oikosulkuvirta

Kun syöttävä verkko on nimellisjännitteeltään yli 35 kV, sen oikosulkuimpedanssin katsotaan olevan puhtaasti reaktiivinen. Alle 35 kV:n verkoissa voidaan syöttävän verkon oikosulkuimpedanssi jakaa resistanssiin ja reaktanssiin kaavalla 8. /5/

$$R_k = 0,1 \cdot X_k \quad X_k = 0,995 \cdot Z_k \quad (8)$$

missä

R_k on syöttävän verkon resistanssi

X_k on syöttävän verkon reaktanssi

Z_k on syöttävän verkon impedanssi

3.3.2. Generaattori

Generaattorin alku-, muutos- ja jatkuvan tilan reaktanssit lasketaan kaavalla 9. /1/

$$X_d = x_d \cdot \frac{U_N^2}{S_N} \quad (9)$$

missä

X_d on generaattorin alku-, muutos- tai jatkuvan tilan reaktanssi
 x_d on generaattorin suhteellinen alku-, muutos tai jatkuvan tilan reaktanssi
 U_N on generaattorin nimellisjännite
 S_N on generaattorin nimellisteho

Sysäysoikosulun laskuissa täytyy ottaa huomioon myös generaattorien resistanssit. Seuraavia resistanssiarvoja voidaan käyttää standardin IEC 909 mukaan:

$$R_G = 0,05 X_d \text{ jos } U_N > 1 \text{ kV ja } S_N > 100 \text{ MVA}$$

$$R_G = 0,07 X_d \text{ jos } U_N > 1 \text{ kV ja } S_N < 100 \text{ MVA}$$

$$R_G = 0,15 X_d \text{ kun } S_N > 100 \text{ MVA}$$

missä

R_G on generaattorin resistanssi
 X_d on generaattorin alku-, muutos tai jatkuvan tilan reaktanssi
 U_N on generaattorin nimellisjännite
 S_N on generaattorin nimellisteho. /5/

3.3.3. Muuntaja ja kuristin

Kuristimien ja muuntajien oikosulkuvastukset voidaan laskea niiden kilpiarvoista. Yleensä suhteellista oikosulkureaktanssia ja -resistanssia ei ilmoiteta kilpiarvoissa, joten ne ratkaistaan kilpiarvoissa ilmoitetuista nimellistehosta S_k , nimelliskuormitushäviöistä P_k ja suhteellisesta oikosulkuimpedanssista u_k . Oikosulkuimpedanssi Z_k saadaan selville suhteellisesta oikosulkuimpedanssista seuraavalla kaavalla 10. /5/

$$Z_k = u_k \cdot \frac{U_N^2}{S_N} \quad (10)$$

missä

Z_k on oikosulkuimpedanssi
 u_k on suhteellinen oikosulkuimpedanssi
 U_N on nimellisjännite
 S_N on nimellisteho

Nimelliskuormituksen avulla ratkaistaan suhteellinen oikosulkuresistanssi u_r kaavalla 11 ja itse oikosulkuresistanssi R_k kaavalla 12. /5/

$$u_r = \frac{P_k}{S_N} \quad (11)$$

$$R_k = u_r \cdot \frac{U_N^2}{S_N} \quad (12)$$

missä

u_r on suhteellinen oikosulkuresistanssi

R_k on oikosulkuresistanssi

P_k on nimelliskuormitushäviöt

U_N on nimellisjännite

S_N on nimellisteho

Oikosulkuimpedanssin Z_k ja oikosulkuresistanssin R_k avulla ratkaistaan oikosulkureaktanssi X_k kaavalla 13. /5/

$$X_k = \sqrt{R_k^2 - Z_k^2} \quad (13)$$

missä

X_k on oikosulkureaktanssi

R_k on oikosulkuresistanssi

Z_k on oikosulkuimpedanssi

Tapauksissa, jossa on tarpeen tarkastella muuntajan eri jänniteportaiden taustaverkkojen vaikutusta toiseen jänniteportaaseen, tulee taustaverkkojen impedanssiarvot redusoida muuntajan muuntosuhteen mukaan. Itse muuntajan impedanssiarvot selvitetään tarkasteltavan jännitetason nimellisarvoista. Vastusarvoja ei voi laskea suoraan impedansseina, vaan impedanssiarvot tulee jakaa resistansseihin ja reaktansseihin. Kaava 14 koskee tapausta, jossa muuntajan korkeamman jänniteportaan taustaverkon vastusarvot redusoidaan vastamaan pienemmän jänniteportaan arvoja. /5/

$$Z = \left(\frac{U_{N_2}}{U_{N_1}} \right)^2 \cdot (R + jX) \quad (14)$$

missä

Z on redusoitu impedanssiarvo

U_{N_2} on alemman jänniteportaan nimellisjännite

U_{NI} on ylemmän jänniteportaan nimellisjännite
 R on ylemmän jännitetason taustaverkon resistanssi
 jX on ylemmän jännitetason taustaverkon reaktanssi

3.4. Muita oikosulkusuureita

3.4.1. Oikosulkuteho

Oikosulkutehoa S_k käytetään ilmaisemaan verkon oikosulkuominaisuuksia ja katkaisijoiden katkaisukykyä. Oikosulkuteho lasketaan kaavalla 15. /5/

$$S_k = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_k \quad (15)$$

missä

S_k on verkon oikosulkuteho
 U_N on verkon pääjännite
 I_k on oikosulkuvirran jatkuvan tilan arvo

3.4.2. Sysäysoikosulkuvirta

Sysäysoikosulkuvirta I_s on oikosulun ensimmäisen puolijakson aikana esiintyvä oikosulkuvirran suurin hetkellisarvo. Sysäysoikosulkuvirtaa kutsutaan myös dynaamiseksi oikosulkuvirraksi ja sitä käytetään kojeiston mekaanisen mitoituksen perusteena. Sysäysoikosulkuvirta lasketaan kaavalla 16. /4/, /5/

$$i_s = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (16)$$

missä

i_s on sysäysoikosulkuvirta
 κ on sysäyskerroin
 I_k'' on alkuoikosulkuvirran tehollisarvo

Sysäyskerroin on riippuvainen oikosulkupiirin resistanssin ja reaktanssin suhteesta ja lasketaan kaavalla 17. /5/

$$\kappa = 1.02 + 0,98e^{\frac{-3R}{X}} \quad (17)$$

missä

κ on sysäyskerroin

R on oikosulkupiirin resistanssi

X on oikosulkupiirin reaktanssi

3.4.3. Terminen oikosulkuvirta

Ekvivalenttisella termisellä oikosulkuvirralla I_{1s} ilmoitetaan sähköverkossa käytettävien kojeiden termistä kykyä kestää tiettyä oikosulkuvirtaa 1 sekunnin ajan. Oikosulun kesto on tapauskohtainen ja oikosulkuvirta saattaa myös muuttua oikosulun aikana. Seuraavalla kaavalla lasketaan alkuoikosulkuvirran tehollisarvoa käyttäen, 1 sekuntia vastaava keskimääräinen terminen oikosulkuvirta. /3/, /8/

$$I_{1s} = I''_k \cdot \sqrt{(m+n)t_k} \quad (18)$$

missä

I_{1s} on ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta

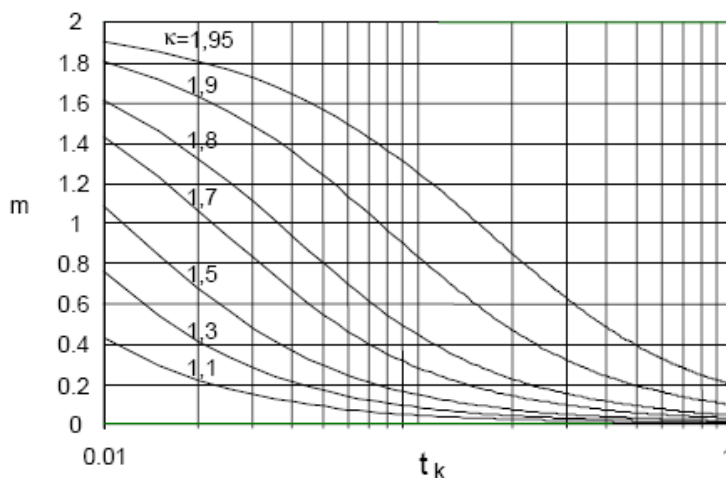
I''_k on oikosulkuvirran alkuarvo

t_k on oikosulun kesto aika sekunneissa

m on oikosulkuvirran tasakomponentin kerroin

n on oikosulkuvirran vaihtokomponentin kerroin

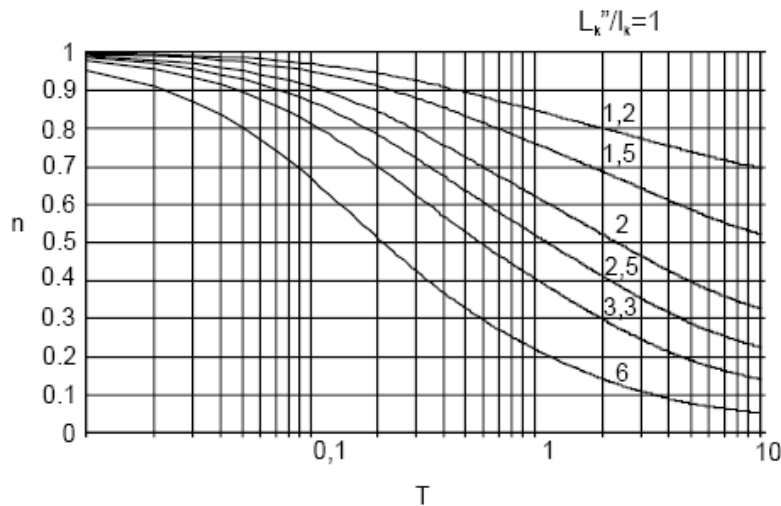
Oikosulkuvirran tasakomponentti selviää kuvasta 7.



Kuva 7. Oikosulkuvirran tasakomponentti /1/

Tasavirtatekijä m on riippuvainen katkaisuajasta ja sysäyskertoimesta. /1/

Oikosulkuvirran vaihtokomponentti selviää kuvasta 8.



Kuva 8. Oikosulkuvirran vaihtokomponentti /1/

Vaihtovirtatekijä n on riippuvainen katkaisuajasta ja I''_k/I_k -suhteesta. /1/

3.4.4. Katkaisuvirta

Katkaisuvirralla I_b tarkoitetaan katkaisijan kautta kulkevan oikosulkuvirran tehollisarvoa, kun katkaisutapahtuma alkaa. Oikosulun vaimeneminen otetaan huomioon kertoimella μ katkaisuviiveen t_{min} aikana. Tahtikoneen katkaisuvirta lasketaan kaavalla 19. /4/, /5/

$$I_b = \mu \cdot I''_k \quad (19)$$

Kerroin μ voidaan ratkaista seuraavilla yhtälöillä:

$$\mu = 0,84 + 0,26e^{-25a} \quad \text{kun } t_{min} = 0,02s \quad (20)$$

$$\mu = 0,71 + 0,51e^{-30a} \quad \text{kun } t_{min} = 0,05s \quad (21)$$

$$\mu = 0,62 + 0,72e^{-32a} \quad \text{kun } t_{min} = 0,1s \quad (22)$$

$$\mu = 0,56 + 0,94e^{-38a} \quad \text{kun } t_{min} = > 0,25s \quad (23)$$

missä

I_b on katkaisuvirta

μ on ajasta riippuva katkaisukeroin

t_{min} on katkaisuviive

I_{KG} on tahtigeneraattorin syöttämä alkuoikosulkuvirta

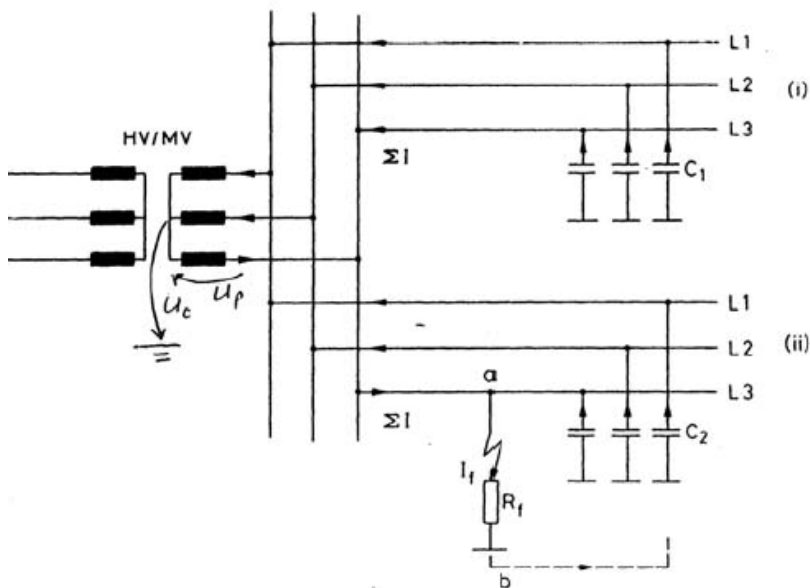
I_{nG} on tahtigeneraattorin nimellisvirta

Jos generaattorin syöttämä alkuoikosulkuvirta on yli kaksi kertaa pienempi kuin sen nimellisvirta, käytetään katkaisukertoimena kerrointa 1. /4/

4. MAASULKU

Suomessa käytössä olevat keskijänniteverkot ovat yleensä maasta erotettuja tai induktanssilla varustettuja maasta erotettuja sähköverkoja. Maasta erotetulla verkolla tarkoitetaan verkkoa, jonka muuntajan tähtipistettä ei ole maadoitettu. /3/

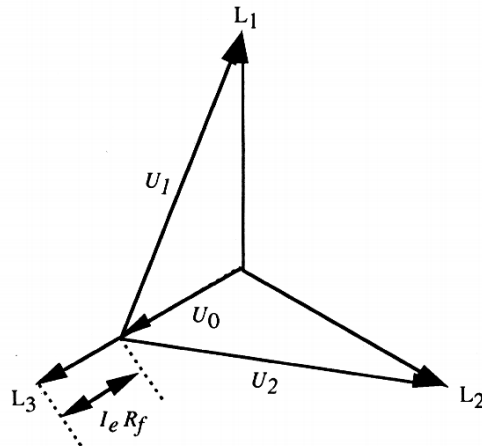
Maasulku eroaa tavallisesta oikosulusta sillä, että sen vikavirta on huomattavasti pienempi kuin oikosulun tapauksessa. Virran suuruus riippuu päämuuntajan perään galvaanisesti yhteen kytketyn verkon laajuudesta. Vikavirta saattaa jopa olla pienempi kuin itse kuormitusvirta. Eroa on myös vikavirran kulkureitillä. Kun maadoitetussa verkossa maahan kosketuksessa oleva johdin tuottaisi oikosulkuvirran, joka kulkisi vaihejohtimesta maan kautta muuntajan keskipisteeseen, niin maasta erotetussa verkossa vikavirran ainoa kulkureitti on verkon maakapasitanssien kautta. Maasulun aikana maasulkuvirta kulkee viallisen vaiheen kautta maahan, jonka kautta se kulkee johtojen maakapasitanssien kautta muuntajaan ja sieltä takaisin vikapaikkaan. Kuvassa 9 esitetään maasta erotetun kolmivaihejärjestelmän yksivaiheinen maasulku. /3/



Kuva 9. Maasta erotetun verkon yksivaiheinen maasulku /3/

Normaalissa tilassa verkon vaihejännitteet maahan nähden ovat symmetrisiä, mistä syystä myös niiden summa on nolla. Sama pätee myös maakapasitanssien kautta kulkevalle virralle. Vikatapauksessa, kun vaihejohdin joutuu kosketukseen maan kanssa vikaresistanssin kautta, viallisen vaiheen jännite laskee maahan nähden ja muiden vaiheiden jännitteet nousevat. Kun vikaresistanssin arvo on nolla, viallisen vaiheen jännite putoa nolliin ja muiden vaiheiden jännitteet nousevat maahan nähden pääjännitteen suuruiseksi. Myös tähtipisteen jännite nousee maasulun aikana maahan nähden.

Vikaresistanssin kautta tapahtuva maasulku nostaa tähtipisteen jännitettä maahan nähden. Ilman vikaresistanssin vaikutusta nollapistejännite maahan nähden on vaihejännitteen suuruinen. Kuvassa 10 on esitetty maasta erotetun järjestelmän jännitteet maahan nähden maasulun aikana. /3/



Kuva 10. Maasta erotetun järjestelmän jännitteet maasulun aikana /3/

Maasulkuvirta on riippuvainen muuntajan perässä olevaan verkon yhteenlasketusta maakapasitanssista. Maasulkuvirta voidaan laskea kaavalla 24. /3/, /8/

$$I_e = \sqrt{3} \cdot \omega \cdot C_0 \cdot U \quad (24)$$

missä

I_e on maasulkuvirta

ω on kulmataajuus ($2\pi f$)

C_0 on yhden vaiheen maakapasitanssi

U on verkon pääjännite

Maasulkuvirran voi myös laskea verkon lajin ja pituuden mukaan. Kaapeleille tuottajat ilmoittavat maasulkuvirran suuruuden pituusyksikköä kohti. Avojohtoille maasulkuvirta voidaan laskea riittävän tarkasti seuraavasta kaavasta 25. /3/

$$I_e = \frac{U / kV \cdot l / km}{300} \quad (25)$$

missä

I_e on maasulkuvirta

U on verkon pääjännite
 l on pituus kilometreissä

Jos maasulkuun vaikuttaa vikaresistanssi, niin maasulkuvirta lasketaan kaavalla 26. /3/

$$I_e = \frac{3 \cdot \omega \cdot C_0}{\sqrt{1 + (3 \cdot \omega \cdot C_0 \cdot R_f)^2}} \cdot U_v \quad (26)$$

missä

I_e on maasulkuvirta
 ω on kulmataajuus ($2\pi f$)
 R_f on maasulun vikaresistanssi
 C_0 on yhden vaiheen maakapasitanssi
 U_v on verkon vaihejännite

Maasulun aikana verkon tähtipisteen ja maan välille syntyy jännite-ero U_0 , jota kutsutaan nollajännitteeksi. Nollajännite lasketaan kaavalla 27. /10/

$$U_0 = \frac{1}{3 \cdot \omega \cdot C_0} \cdot I_e \quad (27)$$

missä

U_0 on nollajännite
 ω on kulmataajuus ($2\pi f$)
 C_0 on yhden vaiheen maakapasitanssi
 I_e on maasulkuvirta

Kun maasulkuun vaikuttaa vikaresistanssi, niin nollajännite lasketaan seuraavasti kaavalla 28. /10/

$$U_0 = \frac{1}{\sqrt{1 + (3 \cdot \omega \cdot C_0 \cdot R_f)^2}} \cdot U_v \quad (28)$$

missä

U_0 on nollajännite
 ω on kulmataajuus ($2\pi f$)
 R_f on maasulun vikaresistanssi
 C_0 on yhden vaiheen maakapasitanssi
 U_v on verkon vaihejännite

Maasulkuvirran I_e kulkiessa maahan se muodostaa maadoitusresistanssista R_f johtuen maasulkupaikassa maasulkujännitteen U_m . Maadoitusjännite aiheuttaa ihmisen tai eläimen kosketeltavissa olevan ns. kosketusjännitteen U_{TP} . Sallitut kosketusjännitteet on määritelty standardeissa SFS 6001. Maadoitusjännite ei saa ylittää yhtälön 29 arvoja. Yhtälön kerroin k on riippuvainen muuntajan tai muuntajien ja verkon maadoitustavoista. /3/, /10/

$$U_m \leq k \cdot U_{TP} \quad (29)$$

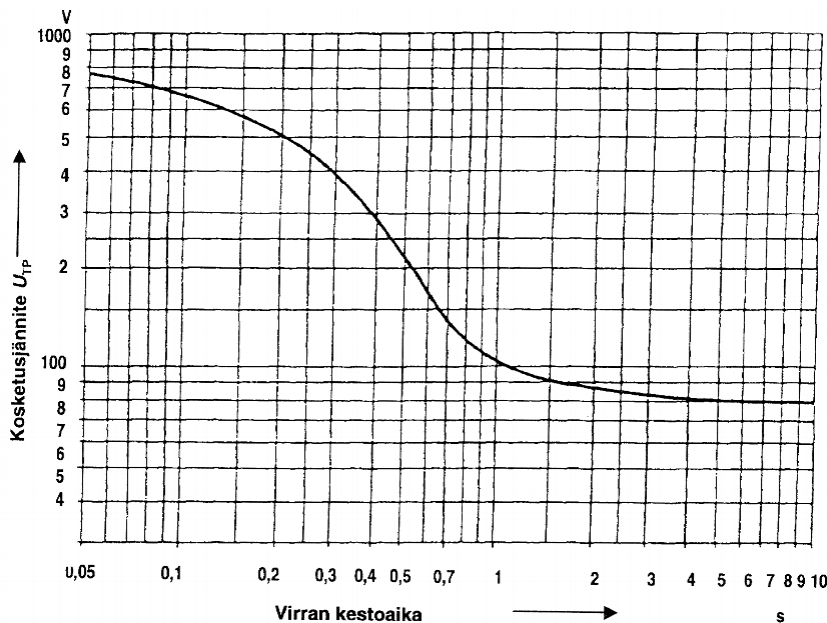
missä

U_m on maadoitusjännite

k on muuntajan tai muuntajien ja verkon maadoitustavoista johtuva kerroin

U_{TP} on kosketusjännite

Yhtälön 29 kosketusjännitteen arvo U_{TP} on riippuvainen maasulun laukaisuajasta. Sallitut kosketusjännitteen arvot maasulun laukaisuajan suhteen esitellään kuvassa 11. /11/



Kuva 11. Sallittu kosketusjännite suhteessa maasulun kestoaikaan /11/

Kuvassa 11 esitettyjen sallittujen kosketusjännitteiden arvot katsotaan toteutuvan, jos asennus on osa laajaa maadoitusjärjestelmää. Laajalla maadoitusjärjestelmällä tarkoitetaan maadoitusjärjestelmää, joka on tehty liittämällä useat paikalliset maadoitusjärjestelmät verkkomaisesti siten, että järjestelmä muodostaa lähes tasapotentialipinnan. Järjestelmän laajuus ja maadoitusverkon tiheys varmistavat sen, ettei alueella esiinny vaarallisia kosketusjännitteitä. Sallittujen arvojen katsotaan myös toteutuva, jos mittaamalla tai laskemalla on määritetty, että maadoitusjännite ei ole suurempi kuin kuvan 11 mukaisen sallitun kosketusjännitteen arvo kaksinkertaisena. /11/

Maasulku tulee kytkeä pois automaattisesti tai käsin, jolloin pitkäaikaista tai jatkuvaa kosketusjännitettä ei esiinny maasulkujen seurauksena. Mikäli maasulkua ei kytkeä pois automaattisesti, on maasulusta tultava hälytys ja maasulku tulee kytkeä pois käsin. Tällöin tulee kuitenkin täyttyä seuraavat ehdot. /11/

Verkon rakenne tulee olla sellainen, että valokaarimaasulun todennäköisyys on pieni. Verkon on oltava joko kaapeliverkko tai ilmajohtoverkossa valokaarimaasulun on sammuttava itsestään. /11/

Maasulusta on tultava hälytys, joka saatetaan käyttöä valvovan henkilön tietoon. Vian selvittämiseen tulee ryhtyä välittömästi. Käyttöä saa maasulun aikana jatkaa korkeintaan 2 tunnin ajan, jos siitä ei aiheudu häiriöitä tai vaaraa. Jos maasulun sijaintikohta löydetään ja varmistetaan, että maasulusta ei aiheudu vaara, käyttöä voidaan pidentää. Jos maasulku sijaitsee jakelumuuntamolla, joka ei ole laajan maadoitusjärjestelmän alueella, ei käyttöä saa jatkaa. /11/

Jatkuvassa maasulussa esiintyvä maadoitusjännite saa olla korkeintaan 150 V. Lisäksi televerkon asettamat vaatimukset tulee ottaa huomioon. /11/

4.1. Maasulkusuojaus

Maasulkusuojaus voidaan maasta erotetuissa verkoissa toteuttaa johtokohtaisten nollavirtareleiden tai nollajännitteeseen ja nollavirtaan kytkettyjen suuntareleiden avulla. /9/

Nollavirtareleillä toteutettu suojaus perustuu verkon maakapasitanssien kautta palavaan maasulkuvirtaan, joka aiheuttaa vaihevirtojen epäsymmetrian. Virtaepäsymmetriaa kuvaava nollavirta I_r saadaan lähdön vaihevirtojen osoitinsummasta. Nollavirran mittauksissa käytetään kolmen vaiheen virtamuuntajien summakytkeä tai kaapelivirtamuuntajaa. Vioittuneen lähdön alkupäässä sijaitsevan nollavirtamuuntajan mittaama nollavirta on pienempi kuin vikapaikan maasulkuvirta. Vioittuneen lähdön vaikutus on vähennettävä alkupään summavirtaa laskettaessa, sillä lähdön vikavirran komponentti kulkee summavirtamuuntajan läpi molempiin suuntiin. Vioittuneen lähdön nollavirta saadaan laskettua kaavalla 29. /8/, /9/

$$I_r = \frac{C - C_j}{C} \cdot I_e \quad (29)$$

missä

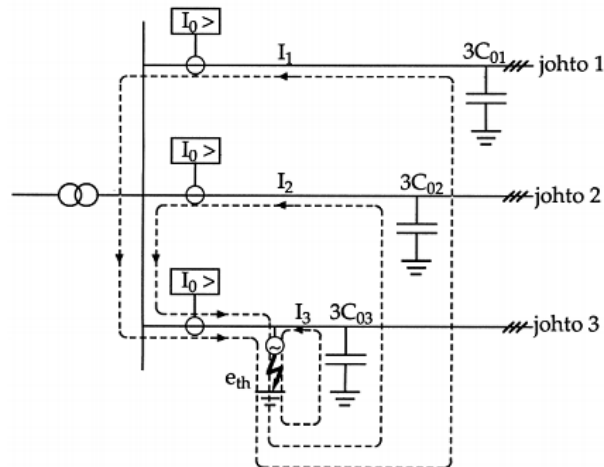
I_r on vioittuneen lähdön nollavirta

C on koko verkon maakapasitanssi

C_j on vioittuneen lähdön maakapasitanssi

I_e on maasulkuvirta

Kuvassa 12 on esitetty vikavirtojen jakautuminen viallisen ja terveiden johtojen kesken.



Kuva 12. Maasulkuvirran jakautuminen /9/

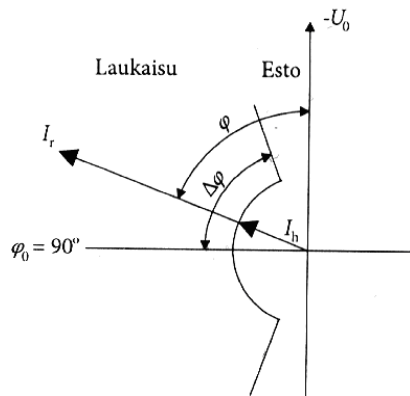
Näin ollen johdon kolme nollavirtarele mittaa virtaa, joka on verrannollinen johtojen 1 ja 2 yhteenlaskettuun pituuteen. Maasulun sattuessa muilla lähdöillä on johdon kolme nollavirtareleen mittaama vikavirta verrannollinen sen oma verkon pituuteen. Jos johtojen 1 ja 2 yhteenlaskettu pituus on suurempi kuin johdon 3 pituus, voidaan selektiivinen maasulkusuojaus toteuttaa nollavirtareleillä. /9/

Nollavirtareleisiin perustuvan suojauksen heikkoutena on nollavirran riippuvuus johtopituuksista ja vikaresistanssin suuruudesta. Selektiivisyyden säilyttäminen saattaa tuottaa vaikeuksia, jos muun verkon pituus muuttuu jostain syystä. Nollavirtareleen asettelussa saattaa tulla vaikeuksia, koska nollavirtarele ei saa toimia muualla verkossa sattuvassa vikaresistanssittomassa maasulussa, mutta sen on toimittava suojaamallaan johdolla sattuvassa 500 Ω :n maasulussa. /9/

Maasulun suuntareleen suojaus perustuu nollavirran ja tähtipistejännitteen eli nollajännitteen mittaamiseen. Tähtipistejännite mitataan yleensä vaihejännitteisiin kytkettyjen jännitemuuntajien toisiokäämien avokolmiokytkennällä. /9/

Maasulkureleen tulee havahtua vain siinä tapauksessa, että maasulku on juuri tämän releen suojaamalla alueella. Maasulun suuntareleen toiminnan ehtona on, että sekä vioittuneen lähdön nollavirta ja tähtipistejännite ylittävät tietyt asetteluarvot. Maasulun sattuessa kuvan 12 mukaisesti lähdössä 3, suuri osa vikavirrasta kulkee lähdön 1 ja 2 kautta takaisin lähtöön 3. Jos lähdössä 3 käytettäisiin maasulun suuntarelettä, niin sen ehtona havahtumiselle pitää olla nollavirran kulku summavirtamuuntajan kautta vikapaikkaan, eikä toisin päin. /9/

Vikavirran suunnan tarkistamiseksi verrataan jänniteosoittimen $-\underline{U}_0$ ja summavirtamuuntajan läpi kulkevan virran \underline{I}_r osoittimien välistä kulmaa. Virran tulee olla noin 90° edellä maan ja tähtipisteen välistä jännitettä $-\underline{U}_0$. Näin ollen maasulun suuntareleen kolmanneksi ja vian sijaintilähdön tunnistavaksi toimintaehdoksi tulee $90^\circ - \Delta\varphi < \varphi < 90^\circ + \Delta\varphi$. Kuvassa 13 on esitetty Maasulun suuntareleen virtakulmadiagrammi. /8/



Kuva 13. Maasulun suuntareleen virtakulmadiagrammi /8/

Kuvan 13 merkillä $\Delta\varphi$ tarkoitetaan nollajännitteen ja nollavirran välisen kulman toleranssia. Toleranssiin vaikuttavat vuotovastukset ja johtoresistanssit. Maasulun suuntareleen hyviä puolia ovat jännite-, virta- ja kulmakriteerien riippumattomuus toisistaan sekä suuri herkkyys. /8/

Maasulkusuojuuksessa tarvittavat tiedot eri lähtöjen summavirroista mitataan jokaisen lähdön alkupäässä olevalla summavirtamuuntajalla. Avojohtoverkossakin lähdöt on usein toteutettu kaapeleilla. Kaapelilähdöissä käytetäänkin summavirran mittaamiseen kaapelivirtamuuntajia. Se muodostuu kaapelin ympäri asetetusta virtamuuntajasydäimestä, johon on käämitty toisiokäämi. Ensiöpuolen muodostaa itse kaapeli. Toisiokäämin nimellisvirta on yleensä 5 A. Ensiökäämin nimellisvirta valitaan verkon maasulkuvirran mukaan, jolloin muuntosuhde voi esim. olla 20/5 A. Koko verkkoa koskeva nollapistejännite mitataan sähköasemalla olevilla jännitemuuntajilla. Eri vaiheiden kolmioon kytkettyjen muuntajien yksi kulma jätetään auki, josta nollajännite mitataan. Jännitemuuntajien muuntosuhteet on yleensä mitoitettu niin, että avokolmion jännite on 100 V silloin, kun tähtipisteessä on vaihejännitteen suuruinen jännite. /9/

4.2. Maasulkureleistyksen toteuttaminen

Maasta erotettujen verkkojen selektiivinen maasulkusuojaus kannatta toteuttaa sähköasemilla suuntareleiden avulla, koska tällöin verkoston pituuden muutos ei vaikuta suojauksen selektiivisyyteen, kuten nollavirtareleisiin perustuvassa suojauksessa. /9/

Maasulkuvirta ja mittamuuntajien muuntosuhteet määräävät käytettävien releiden herkkyuden. On syytä ottaa huomioon virtamuuntajien muuntosuhteiden tuleva kehitys. Virtamuuntajien muuntosuhteita joudutaan suurentamaan kuormitusvirtojen ja myös oikosulkuvirtojen kasvaessa, koska tällöin releellä saavutettu herkkyys huononee. Kun käytetään kaapelivirtamuuntajaa, ei sen muuntosuhdetta tarvitse kasvattaa eikä herkkyys muutu. Maasta erotetuissa verkoissa maasulkuvirta on yleensä niin suuri, että nollavirran mittaukseen voidaan käyttää suojasydämiä. /9/

Maasulun suuntareleet toimivat pienen viiveen kuluttua nollajännitteen synnyttyä. Viiveen tarkoituksena on maasulun alkutransienttien vaimentuminen ja mahdollisen valokaaren sammuminen. Porrastettujen suojaukset tehdään varaamalla tarpeeksi aikatoleranssia sekä katkaisijoiden alkutransientille sekä katkaisijoiden ja releiden toiminta-aikojen hajonnalle. Käytännössä ei aikaporrastuksessa voida mennä 0,3-0,5 s alapuolelle. /9/

Kaksoismaasulun tapauksessa pienillä vikaresistansseilla virta on niin suuri, että se saa oikosulkusuojan toimimaan. Suurilla vikaresistansseilla virta ei saa oikosulkusuojausta havahtumaan. Vikapaikkojen ollessa eri johdoilla vaiheiden välinen vikavirta näkyy johtojen vikavirrassa ja nollavirtarele havahtuu. Kun vikapaikat ovat samalla johdolla, nollavirtareleet ja suuntareleet toimivat oikein, jos asettelussa on otettu huomioon nollavirtojen pienentyminen yksivaiheiseen maasulkuun verrattuna. /9/

Kaksoismaasulun ilmaisun kannalta nollajännitereleet kannattaa asetella mahdollisimman alas, sillä asetteluarvon noin 15 % alapuolella päästään kaksosmaasulussa samaan ilmaisuherkkyteen kuin yksivaiheisessa maasulussa. /9/

Johdinkatkeaman aiheuttama maasulku on vaikeimmin havaittavissa, kun katkenneen johtimen kuormituksen puoleinen pää putoaa maahan ja syötön puoleinen pää jää maasta eristetyksi. Kuormituksen suuren impedanssin takia nollavirta ja nollajännite ovat pieniä. Nollajänniterele voi havaita tällaisen maasulun vain herkimmilläkin asetteluarvoilla pienissä verkoissa ja kuormitetuilla johdoilla. /9/

5. SUOJARELE

Releet ovat sähköverkon suojauksessa käytettyjä laitteita, jotka tarkkailemalla sähköverkon suureita pystyvät havaitsemaan sähköverkossa tapahtuvat muutokset, kuten ylikuormituksen tai oikosulun. Tilanteessa, jossa releen havaitseva suure ylittää releen asetteluarvon, rele antaa ohjauskäskyn esimerkiksi katkaisijalle, joka irrottaa viallisen verkko-osan verkosta. /9/

Releitä ei yleensä kytketä suoraan sähköverkkoon. Siihen tarkoitukseen käytetään mittamuuntajia, jotka tarkkailevat verkon suureita, kuten johdossa kulkevaa virtaa ja muuntavat suuren sellaiselle tasolle, että rele kykenee sitä käsittelemään. /9/

Nykyaikaisiin releisiin saadaan yhdistettyä esimerkiksi oikosulkusuojaus, maasulkusuojaus ja jälleenkytkentäreleiestys. Rele-yksikkö kykenee välittämään mittaus-, tila- ja asetteluarvoja ja toisaalta myös vastaanottamaan ohjaus- ja asettelutietoja. /9/

Relesuojauksen tulisi täyttää seuraavat ehdot:

- Suojauksen tulee olla selektiivinen ja kattaa aukottomasti koko järjestelmä.
- Suojauksen on oltava riittävän yksinkertainen ja käyttövarma.
- Toiminnan on tapahduttava nopeasti ja herkästi.
- Kohtuullinen hankintakustannuksiltaan. /9/

5.1. Suojarelelajit

5.1.1. Sähkömekaaniset releet

Ensimmäiset suojareleet olivat ns. ensiö- eli primäärireleitä, koska ne kytkettiin suoraan päävirtapiiriin. Virran ylittäessä asetteluarvon rele vapautti mekaanisesti välitangon avulla katkaisijan laukaisujousen. /9/

Ensiöreleitä parempaan tekniseen ja taloudelliseen tulokseen päästiin toisioreleillä, jonka yhteydessä käytetään mittamuuntaja, johon toisiorele kytketään. Toisiorelettä on myös mahdollista koestaa käytön aikana. Toisiorele ottaa kaiken energiansa mittamuuntajasta. Tämä aiheuttaa mittamuuntajalle suuren taakan, joka haittaa muuntajan toistokykyä varsinkin silloin, kun vikavirta sisältää tasakomponentin. /9/

Mekaaniset releet mittaavat mitattavan suuren tehollisarvoa. Ne ovat rakenteensa ansiosta niin hitaita, että ne eivät kykene havaitsemaan vaihtosuureiden hetkellisarvoja. Vikavirran tasakomponentti saattaa saada sähkömekaanisen releen havahtumaan ennen aikoja haitaten

näin selektiivisen suojauksen toteuttamista. Yksisuurereleiden toteuttaminen mekaanisesti on mahdollista, samoin suuntareleiden, mutta tarkkuutta vaativat vinokuormitus- ja ylikuormitusreleistä ei voida toteuttaa pelkästään mekaanisilla releillä. /9/

Vinokuormitusreleessä virran tai jännitteen vastakomponentti joudutaan pelkistämään monimutkaisten erikoiskytkentöjen avulla, jonka jälkeen arvot viedään joko virta- tai jännitereleelle. Mekaaninen ylikuormitusrele on toteutettu releen sisälle rakennettavalla metallisella mallilla, jonka tarkoitus on kuvata suojattavaa kohdetta. Metallia lämmitetään suojattavan kohteen kuormituksen verrannollisella virralla. Metallia tarkkaamalla saadaan selville kohteen lämpeneminen. Kun suojattavilla kohteilla on erilaiset lämpöaikavakiot, niin releiden valikoima kasvaa suurin lukuihin. /9/

Mekaanisten releiden tarkkuus on usein riittämätön, kun suojaukselta vaaditaan tarkkuutta. On kuitenkin olemassa erikoisherkkiä releitä, jotka ovat tarkoitettu maasulkusuojaukseen. Herkkyys näkyy myös termisenä herkkyytinä, eli ne eivät saa olla jatkuvasti toimineena, minkä takia niiden luotettavuus kärsii. /9/

Mekaaniset releet sisältävät paljon liikkuvia osia, jotka vaativat säännöllistä huoltoa. Hyvin huollettuna mekaanisten releiden on kuitenkin todettu toimivan luotettavasti ja niitä on vielä runsaasti käytössä. /9/

5.1.2. Tasasuuntaajareleet

Tasasuuntaajareleen katsotaan olevan eräänlainen mekaanisen ja staattisen releen väliporras. Releen mittaavan osan muodostaa herkkä kiertokäämikela. Kela on tasavirtakela, joten mitattava vaihtovirta-arvo tasasuunnataan tasasuuntaussillalla. Tasasuuntaussillan eteen on asennettu välimuuntaja suojaamaan herkkää kiertokäämikelaa. Välimuuntajan on tarkoitus kyllästyä tietyllä virta-arvolla ja näin suojata releen kiertokäämikelaa. Releen laukoessa kelan kosketin ohjaa varsinaista lähtörelettä. /9/

Tasasuuntaajarele on nopea suojausominaisuuksiltaan. Toiminta-aika on noin 20 ms. Sitä käytetään mm differentiaali-, vinokuormitus- ja distanssireleissä. /9/

5.1.3. Staattiset releet

Staattiset releet ottavat energiansa erillisestä apusähköliitännästä, joten sen mittauspiirin kuormitus on vähäinen. Pienen kuormituksen ansiosta staattisen releen yhteydessä voidaan käyttää apurelettä ja näin saada käyttöön suuri määrä koskettimia sekä laukaisua että hälytyksiä varten. Erillinen välirele laukaisua varten ei näin ollen ole tarpeellinen, minkä ansiosta laukaisu nopeutuu, koska vältytään välireleen hidastavasta vaikutuksesta. /9/

Staattinen rele liitetään sovitusuuntajan kautta mittamuuntajan toisioon. Sovitusuuntajan tehtävänä on muuttaa mittausarvot releen elektroniikalle sopivaksi. Muuntaja suojaa relettä ylivirtojen ja jännitteiden vaikutukselta, jonka ansiosta releen

terminen kestoisuus on monta kertaa suurempi kuin virtamuuntajan toision nimellisvirta. /9/

Staattiset releet ovat tarkempia kuin mekaaniset releet, sekä niiden asettelualueet ovat laajoja. Suurimman asetteluarvon suhde pienimpään arvoon voi olla kymmenkertainen ilman että tarkkuus heikkenee. /9/

Elektroniikan ansiosta staattinen rele on mekaanista relettä n. kolme kertaa pienempi. Elektroniikkansa ansiosta voidaan myös eri toimintoja koota samaan releeseen. Esimerkkinä rele saattaa sisältää: oikosulkusuojauksen, ylikuormitussuojauksen, vinokuormitussuojan, maasulkusuojauksen ja jälleenkytkentälogiikan. Staattiset releet tulivat markkinoille 1960-luvulla. /9/

5.1.4. Numeeriset releet

Numeeriset releet ovat nykyaikaisia mikroprosessoritekniikkaan ja digitaaliseen signaalinkäsittelyyn pohjautuvia suojareleitä. Ensimmäisen sukupolven numeerisilla releillä oli tyypillistä, että suojauskohteen eri suojaustoiminnot oli integroidu samaan releeseen, mutta releen välittämät tiedot jäivät pelkkään kosketintietoon. /9/

Toisen sukupolven releen välittävät myös muuta tietoa kuin pelkästään kosketintietoja. Rele kykenee välittämään mittaus-, tila- ja asetteluarvoja ja lisäksi vastaanottamaan ohjaus- ja asettelutietoja. Se toimii siis suojauksen ohella myös tiedonkeruuyksikkönä muille järjestelmille. Ensimmäisen sukupolven numeeriset releet tulivat markkinoille 1980-luvun alussa. /9/

Numeerinen rele kykenee mittamaan sekä positiivisen että negatiivisen virran puolijakson suuruuden ja laskemaan siitä keskiarvon. Virheellisen toiminnan estämiseksi toimintaa on varmistettu siten, että vähintään kahden jakson tulee ylittää asetteluarvon ennen kuin rele havahtuu. Esimerkiksi muuntajan kytkentäsäätövirta on monikertainen verrattuna sen nimellisvirtaan. Vanhemmilla releillä olisi ollut hankalaa erotta kytkentäsäätövirta oikosulkuvirrasta. /9/

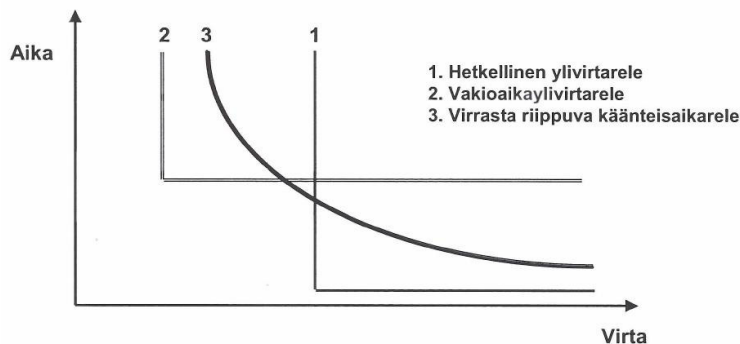
Numeerinen rele kykenee itse-testaukseen. Sen avulla rele valvoo omaa toimintakuntoa ja että se epäkuntoisena ei aiheuta virhetoimintaa. Erillinen valvontapiiri tarkkailee prosessorin toimintaa vastaanottamalla pulsseja prosessorilta. Jos pulsseja ei vastaanoteta, niin valvonta estää releen ulostulojen toiminnan ja yrittää uudelleenkäynnistyksen avulla elvyttää prosessoria. /9/

5.2. Keskeiset suojarelytyypit

5.2.1. Virtarele

Hetkelliset ylivirtareleet ja vakioaikaylivirtareleet ovat yleisiä oikosulkusuojaukseen tarkoitettuja suojarelyitä. Hetkellisen ylivirtareleen toiminta perustuu havahtumiseen ilman lisäviivettä, mikäli sen tunnistama virta ylittää asettelu-arvon. Vakioaikaylivirtarele taas toimii määrätyn viiveen jälkeen, kun sen asettelu-arvo ylittyy. Näiden reletyyppien käytössä tulee ottaa huomioon suojattavan kohteen kuormituksen lyhytaikaiset nykäykset niiden asettelu-arvoja suunnitellessa. Asetteluarvot tulee asettaa kuormituksen nimellisvirran yläpuolelle, mahdollisesti 1,5-2-kertaisesti verrattuna kuormituksen virta-arvoon. Vakioaikarele voidaan asettaa toimimaan myös hetkellisesti kuten hetkellinen ylivirtarele, jos se on tarpeellista. /9/

Käänteisaikaylivirtarele toimii sitä nopeammin, mitä enemmän virta ylittää sen asettelu-arvon. Relettä käytetään kohteissa, joissa oikosulun virta-arvot ovat erilaisia ja vakioita. Releellä saadaan lyhennettyä vikavirtojen vaikutusaikoja muihin releisiin nähden. Kuvassa 14 nähdään yllä mainittujen releiden toimintakäyriä. /9/



Kuva 14. Ylivirtareleiden toimintakäyrät /9/

Ylivirtareleiden oikea asettelu vaatii niiden suojattavan kohteen pienimmän ja suurimman oikosulkuvirran tuntemisen. Releiden asettelussa käytetään muutosoikosulkutilan oikosulkuarvoja. /9/

Numeeristen releiden ominaisuudet suosivat käänteisaikaylivirtareleen käyttöä. Releet luokitellaan muutamaaan tyyppiin aika-virtariippuvuuden jyrkkyyden suhteen. Numeeristen ylivirtareleiden avulla voidaan saada tietoa vikapaikan etäisyydestä releeseen, releen ensin toimittua. Myös releiden välisestä selektiivisyydestä saadaan tietoa, kun verrataan, miten kauan alemman portaan rele on ollut havahtuneena. /9/

5.2.2. Ylijänniterele

Ylijännitereleen toiminta perustuu havahtumiseen, mikäli jännite ylittää sen asettelu-arvon. Niitä käytetään laajasti maasulkusuojauksissa, jossa nollajännitettä mittaamalla pystytään havaitsemaan maasulku. Maasulkusuojauksessa ylijänniterelettä käytetään usein aikahidastettuna. Toinen suojauskohde on tahtigeneraattori, jota rele valvoo vaarallisten ylijännitteiden kannalta. Ylijänniterele antaa kytkentävirikkeen yleensä usealle kohteelle. Siksi niissä on useita koskettimia tai käytetään apureleitä. Moottoreiden suojauksen yhteydessä releellä mitataan vastajännitettä, jonka avulla paljastetaan mahdollinen vaihekatkos tai väärä vaihejärjestys. /9/

5.2.3. Suunta- ja tehorele

Suunta- ja tehoreleet mittaavat suojattavan kohteen jännitteen ja virran hetkellisarvoja. Näin rele pystyy havaitsemaan virran ja jännitteen väliset vaihekulman suuruudet. Rele havahtuu, kun releen mittaama virta ylittää asetteluarvon sekä jännitteen ja virran välinen kulma on määritetyllä alueella. Suunnattuja ylivirtareleitä käytetään ylivirta- ja oikosulkusuojana silmukoiduissa verkoissa. /9/

Maasulun suojarele mittaa kohteen nollajännitteen ja nollavirran hetkellisarvoja. Rele havahtuu kuin virta- ja jännitearvot sekä niiden välinen kulma ylittää asettelu-arvot. /9/

Takatehorele mittaa suojattavan kohteen verkosta ottaman pätötehon hetkellisarvoa. Rele havahtuu, kun releen mittaaman pätötehon arvo ylittää asettelu-arvon. Relettä käytetään generaattorin ja sitä pyörittävän koneen suojan tapauksissa, jossa itse generaattori toimii moottorina. Kun tahtigeneraattoria käytetään pelkästään loistehon kompensointiin, on takatehorele otettava pois käytöstä kompensoinnin ajaksi, koska generaattori ottaa pätötehoa verkosta toimiessaan tahtimoottorina. /9/

6. MITTAMUUNTAJAT

6.1. Jännitemuuntaja

Jännitemuuntajan tehtävänä on muuntaa suuri ensiöjännite arvoksi, jota voidaan käyttää hyväksi mittauksissa ja suojuuksissa. Jännitemuuntajassa on yleensä yksi rautasydän, joka palvelee sekä mittaus- että suojaritarkoitusta. Toisioion mahdollista avokolmiokäämitystä käytetään maasulkusuojuuksen sovelluksissa. Kolmivaiheinen jännitemuuntaja koostuu aina kolmesta yksivaiheisesta muuntajasta. /9/

Jännitemuuntajan toisiopiirin yksi piste on maadoitettava, samoin kosketeltavissa olevat osat. Jännitemuuntajan toisiota ei saa oikosulkea. Toisioion vaiheet on myös varustettava ylivirta- ja oikosulkusuojuuksilla, jonka toimimisesta tulee tulla hälytys. Jännitemuuntajien ensiöjännitteet ilmoitetaan muodossa $110/\sqrt{3}$ kV. Toisiojännitteet ilmoitetaan samassa muodossa. Suomessa käytetyt toisiopuolen nimellisjännitteet ovat $100/\sqrt{3}$ V ja $200/\sqrt{3}$ V, kun jännitemuuntaja on kytketty vaiheen ja maan väliin. Avokolmioon kytkettävien käämien nimellisjännitteet ovat $100/3$ V ja $200/3$ V. /9/

Muuntajan nimellistaakat vaihtelevat 10 – 500 VA:n välillä. Taakaksi lasketaan jännitemuuntajan toisioion kytkettyjen mittalaitteiden ja releiden taakkojen summa nimellistoisiojännitteellä. Nimellistaakka ei kannata valita liian suureksi, sillä muuntaja on tarkimmillaan sen taakan ollessa nimellistaakan alapuolella. Mitä pienempi on nimellistaakan ja taakan ero, sitä heikompi on muuntajan tarkkuus. Jos taakka on liian pieni verrattuna nimellistaakkaan, niin muuntaja näyttää suuremman jännitteen oikeaan arvoon verrattuna. Toisioliittimiin voi tapauksessa liittää vastuksen ylimääräiseksi taakaksi. /9/

Mittaus asettaa suojuusta suurempia vaatimuksia jännitemuuntajan tarkkuudelle. Taulukossa 2 on esitetty mittaukseen tarkoitettujen muuntajien tarkkuusluokat. /9/

Taulukko 2. Mittamuuntajien tarkkuusluokat /9/

Tarkkuusluokka	Jännitevirhe %	Kulmavirhe minuuttia
0,1	0,1	5
0,2	0,2	10
0,5	0,5	20
1	1	40
3	3	-

Mittausmuuntaja ei saa ylittää tarkkuusluokkansa jännite- ja kulmavirhettä nimellistaajuudella ensiöjännitteen vaihdella 80–120 % nimellisjännitteestä ja taakan vaihdella 25–100 % nimellistaakasta. Taulukossa 3 on esitetty suojuamuuntajien tarkkuusluokat. /9/

Taulukko 3. Suojamuuntajien tarkkuusluokat /9/

Tarkkuusluokka	Jännitevirhe %	Kulmavirhe minuuttia
3P	3	120
6P	6	240

Suomessa yleinen mittaustarkkuusluokka on 0,2 ja suojatarkkuusluokka 3P. /9/

Muuntajan nimellisjännitekerroin kertoo, kuinka kauan muuntaja sietää ylijännitettä. Maasulun aikana vaiheen jännite saattaa nousta korkeisiin arvoihin. Nimellisjännitekertoimella otetaan siis huomioon jännitteen nousu maasulkutilanteissa. Taulukossa 4 on esitetty nimellisjännitekertoimet, ylijännitteen kestoajat ja nimellisjännitekertoimen soveltamistapaukset. /9/

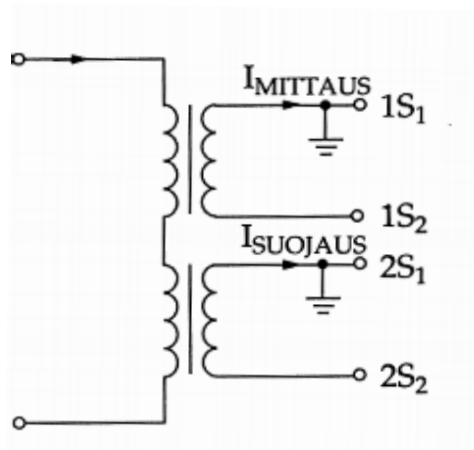
Taulukko 4. Nimellisjännitekerroin /9/

Nimellisjännitekerroin k_N	Kesto aika	Tapaus
1,2	∞	kaikki käyttötilanteet
1,5	30 s	$k_e \leq 1,4$, maasulkulaukaisu
1,9	30 s	$k_e \leq 1,8$, maasulkulaukaisu
1,9	8 h	$k_e \leq 1,8$, ei maasulkulaukaisua

6.2. Virtamuuntaja

Mittamuuntajat ovat muuntajia, jotka muuntavat mitattavan suureen arvon sellaiselle tasolle, että sitä voidaan käyttää hyväksi suojareleissä ja mittareissa. Mittamuuntaja erottaa mittauspiirin pääpiiristä ja mahdollista mittalaitteiden sijoittamisen etäälle mittapaikasta. /9/

Virtamuuntajan ensiö kytketään mitattava johdon kanssa sarjaan. Virtamuuntajalla voi olla useita sydämiä riippuen siitä jos muuntajaa käytetään sekä mittaus- että suojaustarkoituksiin. Tällöin molemmilla sydämillä on omat toisiokääminsä. Mittaukseen tarkoitettua sydäntä kutsutaan mittaussydämeksi ja suojaukseen tarkoitettua sydäntä sanotaan suojaussydämeksi. /9/



Kuva 15. Virtamuuntaja, jossa erilliset mittaus- ja suojausydämet /9/

Sekä mittaus- että suojamuuntajille on määritelty tarkkuusluokat. Tarkkuusluokka ilmoitetaan numeroarvona. Sillä ilmoitetaan muuntajan suurin virtavirhe. Varsinkin mittauksissa käytettävän virtamuuntajan mittausluokka tulee olla hyvä, sillä sitä saatetaan käyttää esim. energian mittaukseen. Mittausmuuntajille on standardoitu taulukon 5 mukaiset tarkkuusluokat. Muuntajat, joiden tarkkuusarvo on alle 0,5 tai parempi, on tarkoitettu energian laskutusmittauksiin. Yli 0,5 tarkkuusluokan muuntajia käytetään virran mittaukseen. /9/

Taulukko 5. Mittausvirtamuuntajan tarkkuusluokat /9/

Tarkkuusluokka	Virtavirhe (%) virralla I/I_N						Kulmavirhe (°) virralla I/I_N				
	0,01	0,05	0,20	0,50	1,00	1,20	0,01	0,05	0,20	1,00	1,20
0,1		0,4	0,2		0,1	0,1	15	8	5	5	
0,2		0,75	0,35		0,2	0,2	30	15	10	10	
0,2S	0,75	0,35	0,2		0,2	0,2	30	15	10	10	10
0,5		1,5	0,75		0,5	0,5	90	45	30	30	
0,5S	1,5	0,75	0,5		0,5	0,5	90	45	30	30	30
1,0		3,0	1,5		1,0	1,0	180	90	60	60	
3,0				3,0		3,0					
5,0				5,0		5,0					

Tarkkuusluokalla ilmoitetaan muuntajan virhevirta prosentteina, kun muuntajan läpi kulkee sen nimellisvirran tai 1,2-kertaisen nimellisvirran suuruinen virta. Muuntajan nimellisvirta-arvoa pienemmillä virroilla muuntajan mittauksen tarkkuus huononee selvästi. Virtamuuntajan nimellisvirta tulee siis valita harkiten. /9/

Sähköverkon vikatilanteessa mittarivirtamuuntajan toision virrat voivat kasvaa niin suuriksi, että siihen liitetty mittari saattaa vaurioitua. Mittarivirtamuuntajan mittarivarmuuskertoimella selvitetään, kuinka monikertaisen nimellisvirran muuntaja kykenee mittaamaan, ilman että toisiovirta kasvaa vaarallisen suureksi. Toisiovirran kasvaminen vaarallisiin lukemiin estää mittausmuuntajan sydämen kyllästyminen.

Mittarivarmuuskertoimen kertaisen nimellisvirran ensiövirtaa mitattaessa tulee toison virtavirhe olla korkeintaan 10 %, kun toisiota kuormitetaan sen nimellistaakalla. Tämä tarkoittaa sitä, että muuntajan sydän on kyllästynyt ja toisiovirta ei kasva merkittävästi, vaikka ensiövirta kasvaisi. /9/

Tilanteessa, jossa toisoon yhdistetty taakka poikkeaa muuntajan nimellisarvosta, voidaan taakkaa vastaava mittarivarmuuserroin laskea kaavasta 30. /9/

$$n = n_N \cdot \frac{S_i \cdot S_N}{S_i \cdot S_2} \quad (30)$$

missä

n on todellinen mittari- ja tarkkuusrajakerroin

S_i on muuntajan toision sisätaakka

S_N on muuntajan toision nimellinen taakka

S_2 on muuntajaan toisioon kytketty todellinen taakka

n_N mittarivarmuus- tai tarkkuusrajakerroin

Kaavassa 30 käytetyt tehoarvot voidaan laskea kaavalla 31. Esimerkkinä muuntajan toision sisätaakan laskemisesta:

$$S_i = Z_{\delta 2} \cdot I_{2N}^2 \quad (31)$$

missä

$Z_{\delta 2}$ on muuntajan toision sisäinen impedanssi

I_{2N} on muuntajan toision nimellisvirta. /2/

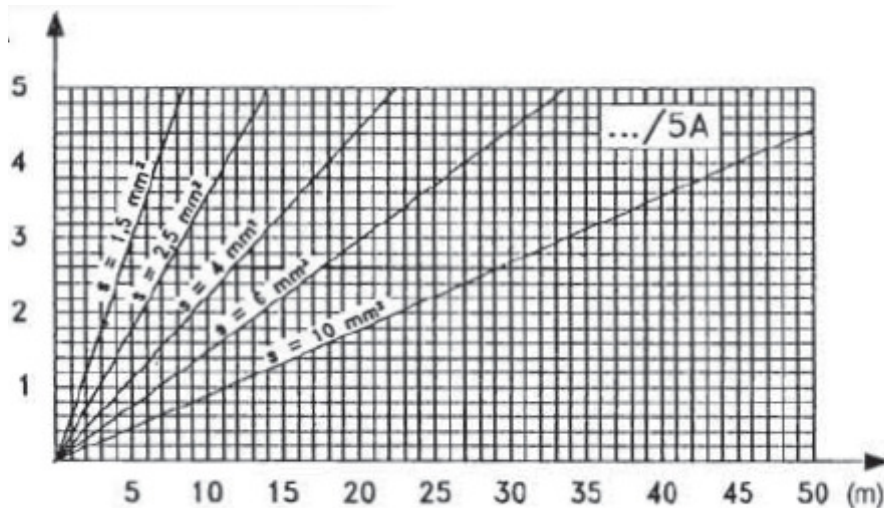
Sisätaakka ei selviä muuntajan kilpiarvoista, vaan se tulee selvittää valmistajalta. Mittarivarmuuserrointa ei ole standardoitu, mutta tyypillinen arvo on 5. Kerroin ilmoitetaan tarkkuusluokan yhteydessä, esimerkiksi 15 VA Class 0,5 FS 5. Merkinnässä 15 VA on toison nimellistaakka ja Class 0,5 tarkoittaa mittausvirtamuuntajan standardoitua tarkkuusluokkaa. Merkintä FS 5 (instrument security factor) viittaa muuntajan mittarivarmuuskertoimeen arvoon. /9/

Muuntajan ensiön nimellisvirrat ja niiden kymmenpotenssikerrannaiset ja osat ovat standardoitu. Arvot ovat seuraavat: 10;12,5;15;20;25;30;40;50;60 ja 70 A. Virtamuuntajan nimellistoisiovirrat ovat 1 A, 2 A ja 5 A. /9/

Muuntajien tarkkuuteen vaikuttaa myös sen toisioon kytketty taakka. Taakalla tarkoitetaan muuntajan toisioliittimien väliin kytketyn impedanssin tehon kulutusta nimellisvirralla. Toisiopiirin impedanssit muodostuvat johtimien ja mittarin tai releen impedansseista. Muuntajat pysyvät normaalisti tarkkuusluokassaan, kun taakan vaihtelualaue on 25–100 % nimellistaakasta. Toision nimellistaakalle on standardoitu arvot 2,5;5;15;30;45;60 VA. /9/

Kun muuntajan tosiavirraksi on valittu 5 A, täytyy nimellistaakka-arvon valinnassa ottaa huomioon toisioon kytkettyjen johtojen kuluttama teho, sillä johtojen kuluttama teho kasvaa verrannollisena virran neliöön. /9/

Kuvassa 16 on esitetty muuntajan toisioon kytkettyjen johtojen muuntajan toisioon muodostama taakka, suhteessa johtimien pituuteen ja poikkipintaan. Kuvan arvot pätevät muuntajan toisiosuon nimellisvirran ollessa 5 A. /13/



Kuva 16. Johtojen muodostama taakka /13/

Myös suojaamuuntajille on standardoitu tarkkuusluokat, jotka selviävät taulukosta 6. /9/

Taulukko 6. Suojausvirtamuuntajan tarkkuusluokat /9/

Tarkkuusluokka	Virta- virhe %	Kulmavirhe minuuttia	Yhdistetty virhe %
5P	1	60	5
10P	3	-	10

Virta- ja kulmavirhe on määritelty suojaamuuntajan nimellisviralle. Arvot pätevät puhtaalle vaihtovirralla. Yhdistetyllä virheellä ilmaistaan tarkkuusrajakerroimen ja nimellisvirran tulosta prosenttiluku, jonka sisällä suojaamuuntajan on tarkkuusluokassaan pysyttävä. /9/

Tarkkuusrajakerroimella ilmoitetaan, kuinka moninkertaisella ensiövirran arvolla yhdistetty virhe on enintään 5 % tarkkuusluokassa 5P ja 10 % tarkkuusluokassa 10P. Jos siis suojaamuuntajan tarkkuusrajakerroin on 10 ja muuntajan nimellisvirta 100 A, tulee muuntajan virhe olla korkeintaan 5 % (tarkkuusluokka 5P), kun muuntajalla mitataan 1000 A:n virta-arvoja. Tarkkuusrajakerroin on kuitenkin määritelty puhtaalle vaihtovirralla. Kun mitattavassa virrassa esiintyy tasakomponenttia, saattaa muuntajan virhe tulla tarkkuusluokkaansa suuremmaksi. Jos tällöin halutaan säilyttää sama tarkkuusmittauksessa, joudutaan valitsemaan suurempi tarkkuusrajakerroin.

Tarkkuusrajakertoimille on standardoitu arvot, jotka pätevät nimellisellä taakalla: 50,75,100,150,200,300,400,500. Suojausvaatimukset edellyttävät tarkkuusrajakertoimeksi n. 50. Jos muuntajan nimellistaakka poikkeaa nimellisestä arvostaan, niin tarkkuusrajakerroin voidaan selvittää yhtälöstä 30. /9/

Suojausmuuntajan tarkkuusluokan valinta on riippuvainen releistä ja niiden mittaustavasta. Valmistajat saattavat vaatia tarkkuusluokan 5P suojausvirtamuuntajaa, jotta releen yhteensopivuuden kanssa ei tulisi ongelmia. Kun käytetään suljettuja sydämiä, tarkkuusluokka 5P on sopiva. Suljettujen sydämien käyttö on yleistä keskijänniteverkoissa. Suojausvirtamuuntajan tarkkuusrajakerroin selviää sen kilpiarvoista. Esimerkiksi 10P50 tarkoittaa, että tarkkuusrajakertoimen arvolla 50 yhdistetty virhe on korkeintaan 10 %. /9/

6.3. Virtamuuntajan suojauskohteet

Ylivirtamittauksissa, joissa ylivirtareleen toiminta perustuu virran suuruuteen, on riittävää, kun virtamuuntaja kykenee toistamaan releen asetteluarvoa vastaavan virran. Käänteisaikaylivirtareleen tapauksessa muuntajan tulee pystyä toistamaan suuriakin virta-arvoja oikein. Virran tehollisarvoa mittaavat releet vaativat muuntajalta, että se pystyy toistamaan kokonaisia virta-aaltoja, kun hetkellisarvoa mittaaville releille riittää neljännesaallon oikea muuntuminen. Näissä tapauksissa virtamuuntajan tarkkuusluokaksi riittää 10P. /9/

Virtamuuntajan kyllästyminen voi aiheuttaa virhetoiminnan, kun suojauksena käytetään suuntarelettä, jonka toiminta perustuu virran nollakohtien, eli vaihekulman mittaamiseen. Yleensä ensimmäinen nollakohta toistuu oikein, mutta kun oikosulkuvirran tasavirtakomponentin aikavakio on suurempi kuin generaattorin reaktanssin aikavakio, on mahdollista, että virta ei mene muutaman jakson aikana ollenkaan nolnaan. Suurien generaattorien läheisyydessä tapahtuvan oikosulun tasavirtakomponentin aikavakio voi olla yli 100 ms, kun se muualla verkossa on 50 ms luokkaa. /9/

Distanssirele-suojauksissa suojattavat johdot on jaettu vyöhykkeisiin, joista ensimmäinen vyöhyke muodosta 85 % suojattavan johdon pituudesta. Johdon alkupään oikosulkuvirrat ovat suuria. Sen myötä voidaan sallia suuria virheitä virran mittauksessa. Toisin on suojauksen toisien vyöhykkeiden tapauksessa. Vyöhykkeet sijaitsevat kaukana lähdestä ja impedanssien takia oikosulkuvirta laskee huomattavasti. Tällöin käytetään tarkkaa virtamuuntajaa, jotta impedanssien muutokset havaitaan tarkasti. /9/

Erovirtarelettä käytetään paikoissa, joissa esiintyy suuria tasavirtakomponentteja oikosulun aikana. Erovirtarele mittaa kolmen muuntajan avulla johdon virtaeroja. Näiden muuntajien pitää kyllästyä saman lailla tai seurauksena voi olla virhelaukaisu. /9/

Maasta erotetussa verkossa maasulkuvirrat ovat pienet ja kompensointikuristimella varustetulla maasta erotetussa verkossa maasulkuvirrat ovat vieläkin pienemmät. Maasulkuvirran mittaamiseen käytetään summavirtakytkentää, jossa jokaisesta vaiheesta

mitataan virtamuuntajalla virta. Muuntajien välisistä eroista saattaa syntyä isokin eronollavirtaan. Maasulkuvirta joudutaan pelkistämään suurien vaihevirtojen seasta, jolloin virtamuuntajien väliset erot korostuvat. Jos muuntajat olisivat täysin identtiset ominaisuuksiltaan, virheet kumoutuisivat summakytkennässä. Tapauksessa valitaankin usein saman valmistuserän muuntajia, joiden virheet ovat samat. Maasulkuvirrat ovat monesti vain murto-osia muuntajien nimellisarvoista, jolloin tarkkuus heikkenee. Virhettä saattaa myös aiheuttaa vaiheiden erilainen taakka ja muuntajien remanenssi. Pienten nollavirtojen mittaukseen suositellaan mittausvirtamuuntajien käyttöä, jolloin tarkkuus ei kärsi, vaikka mitattavat suureet olisivatkin pienet verrattuna muuntajien nimellisvirtoihin. Tarkkuuden vuoksi summaus tulisi myös tehdä mahdollisimman lähellä virtamuuntajia. /9/

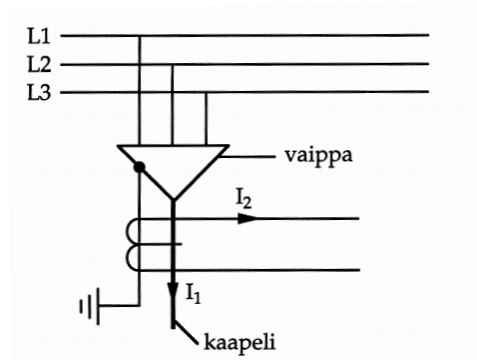
Keskijänniteverkoissa sisääntuonti kytkinlaitokseen tehdään usein kaapelilla. Kolmivaihekaapelin nollavirran mittauksissa on tällöin kätevä käyttää kaapelivirtamuuntajaa. Kaapeli kulkee kaapelivirtamuuntajan läpi ja normaalissa tilassa kaapelin kolmen vaiheen summavirta tulee olla nolla. Kun summavirta eroaa nolasta, on se merkki maasulusta. Kaapelivirtamuuntajan kuormitettavuus, eli nimellistaakka ei ole suuri, mutta nykyaikaisten releiden yhteydessä se ei tuota ongelmia. Pienen nimellistaakan takia mittausjohdot tulee yrittää pitää lyhyinä. Kaapelivirtamuuntajan muuntosuhde valitaan maasulkuvirtojen mukaan, ei kuormitusvirtojen. Kuvassa 17 esitetään johtolähtöjä, joissa nollavirran mittaus on toteutettu kaapelivirtamuuntajilla. /9/



Kuva 17. Kaapelivirtamuuntaja

Maasulkureleiden yhteydessä tulisi kaapelivirtamuuntajan muuntosuhde olla vähintään 30/1 A ja suunnattujen releiden yhteydessä jopa 70/1 A. Suurillakin muuntosuhteilla voidaan kaapelivirtamuuntajalla mitata alle 0,5 A:n ensiöpuolen virtoja. Kaapelivirtamuuntajan muuntosuhde on useimmissa tapauksissa valittavissa toisiopuolen kytkennällä. Silloin on käytettävä numeerisia releitä ja niiden on sijaittava katkaisijakennossa. /9/

Kaapelin maadoitusjohtimessa mahdolliset kulkevat virrat voivat aiheuttaa maasulkureleen virhetoiminnan. Jos kaapelin minkään muotoinen suojamaadoitus viedään kaapelivirtamuuntajan läpi, pitää kaapelin päässä kaapelin suojamaadoitukseen yhdistää maadoitusjohdin, joka viedään kaapelivirtamuuntajan läpi ja yhdistää aseman maadoitukseen. Kuvassa 18 on esitetty kaapelin vaipan maadoitus. Näin kumotaan kaapelin suojamaadoituksessa mahdollisesti kulkevat virrat. Maadoitusjohdin ei saa kaapelipäätteen ja virtamuuntajan välissä olla missään yhteydessä johtaviin rakenteisiin. Jos kaapelinpäätte on metallinen, tulee se eristää tukirakenteista. Kaapelivirtamuuntajalla toteutettu maasulkusuojaus ei toimi aiheetta suurillakaan virtasysäyksillä. /9/



Kuva 18. Kaapelin vaipan maadoitus /9/

Virran mittausta voidaan myös toteuttaa rengasvirtamuuntajilla, jolloin jokainen vaihe tuodaan oman rengasvirtamuuntajan läpi. Tässäkin tapauksessa täytyy kaapelin vaipassa kulkeva virta palauttaa muuntajan läpi. /9/

7. OIKOSULKUSUOJAUS

Oikosulkusuojauksen tavoitteena on ehkäistä oikosulkuvirran johdoille ja laitteille aiheuttamat lämpenemisvauriot sekä erottaa vioittunut osa verkosta. Toisena tavoitteena on taata järjestelmän turvallisuus myös vikatilanteissa. Keskijänniteverkon oikosulkusuojaukseen käytetään Suomessa käänteisaika- tai vakioaikaylivirtarelettä. Rele sisältää usein isolla virralla hetkellislaukaisun aikaansaavan toiminnon. Samat releet toimivat myös ylivirtasuojina. /8/

Avojohtoverkossa ylikuormitus on harvinainen johtimien hyvän lämmönluovutuksen takia. Tällöin havahtumisvirran asetteluarvo on valittava siten, että rele toimii noin kaksinkertaisella kuormitusvirralla, mutta myös johdon päässä tapahtuvassa kaksivaiheisessa oikosulussa. Kaapeliverkossa havahtuminen pitää tapahtua viimeistään kuormittavuuden tullessa vastaan. Hetkellislaukaisulla voidaan varmistaa, että sähköaseman läheisten johto-osien oikosulkukestoisuus ei ylitä. /8/

Sähköasemalla käytetään suojareleiestystä suojaamaan kiskostoa mahdollisissa kiskosto-oikosuluissa. Kiskoston suojaus toimii myös keskijännitelähdöillä tapahtuvissa oikosuluissa, ellei lähdön suojarele ehtisi havahtua ennen kiskoston suojan havahtumista. Johtolähdön oikosulkusuojaus tulee olla nopeampi kuin kiskoston suojaus, jotta toiminta olisi selektiivinen. /8/

7.1. Aikaselektiivinen suojaus

Aikaselektiivisen suojauksen periaatteena on porrasta suojauksen toiminta-aikoja ja näin saada vikakohtaa lähimpänä sijaitsevaa relettä toimimaan ensimmäisenä. Aikaselektiivinen suojaus toteutetaan joko vakioaikaylivirtareleillä tai käänteisaikaylivirtareleillä. /1/

Käänteisaikasuojaus soveltuu erityisen hyvin käytettäväksi säteisverkoissa, joissa oikosulkuvirtojen tasot eivät vaihtelee huomattavasti esimerkiksi eri kytkentätilanteiden johdosta, tai tilanteessa jossa johtojen päiden väliset oikosulkuarvot ovat suuret. Näin käänteisaikasuojaus voidaan nopeuttaa suojausta suurilla vikavirran arvoilla verrattuna vakioaikaiseen suojausmenetelmään. /1/

Standardit IEC 60255 -3, IEC 6025 -4 ja BS 142 määrittelevät neljä käänteisaikatoimintakäyrästä. Taulukossa 7 on esitetty käyrien kertoimet α ja β , jotka määrittelevät käänteisaikakäyrän jyrkkyyden. /1/

Taulukko 7. Käänteisaikatoimintakäyrät /1/

Käänteisaikatoiminta- käyrästä	α	β
Normal inverse	0,02	0,14
Long time inverse	1,0	13,5
Very inverse	2,0	80,0
Extremely inverse	1,0	120,0

Käänteisaikakäyrien mukainen laukaisuaika voidaan laskea kaavalla 32. /1/

$$t = \frac{k \cdot \beta}{\left(\frac{I}{I >}\right)^\alpha - 1} \quad (32)$$

missä

t on laukaisuaika sekunneissa

k on aseteltava aikakerroin

I on vaihevirran arvo

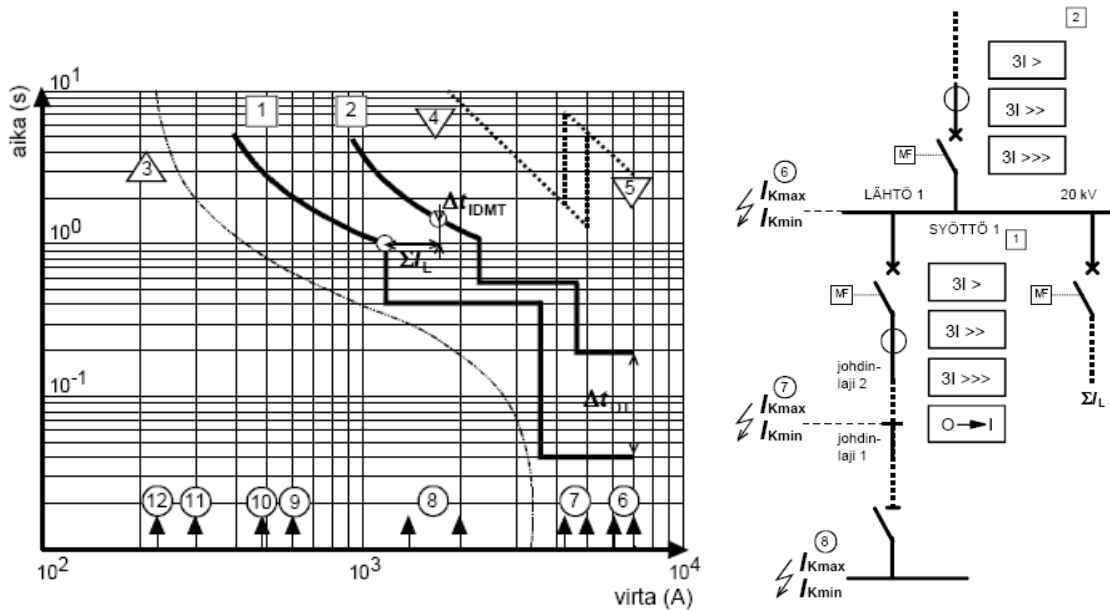
$I >$ on virta-asettelu

α, β ovat toimintakäyräkohtaiset vakiot

Käyttäessä toimintakäyriä normal, very tai extremely inverse tulee suojausten toimia standardien mukaan viimeistään 1,3-kertaisella virta-asettelun virta-arvolla. Long time inverse-käyrän tapauksessa suojausten tulee havahtua viimeistään 1,1-kertaisella virta-arvolla. /1/

Aikaselektiivisen suojausten suunnittelussa käytetään selektiivisyyskäyrästä, joissa on esitetty suojausketjuun kuuluvien suojien toimintakäyrät. Selektiivisyyskäyrästä voidaan myös esittää suojausten toimintaan vaikuttavat tekijät, kuten suurimmat ja pienimmät vikavirrat, joita suojaus havaitsevat vikatilanteessa. Käyrästä voidaan myös lisätä suurimmat kuormitusvirrat, komponenttien oikosulkukestoisuudet sekä mahdolliset kytkentävirtasysäysten virta-arvot. /1/

Kuvassa (x) on esitetty esimerkki säteisverkon ylivirtasuojauksesta ja siihen liittyvä selektiivisyyskäyrästä. Suojauksena käytetään kolmiportaista suojausta, joista alin porttas ($I >$) toimii käänteisaikaisena ja ylemmät portaat ($I >>$ ja $I >>>$) toimivat vakioaikaisena. Ylemmän portaan vakioaikainen ylivirtasuojaus nopeuttaa suojausta, kun vikavirta on suuri. Suojausten herkkyys- ja toimintanopeusvaatimusten sekä selektiivisyyden takia on usein välttämätöntä käyttää kolmiportaista suojausta. Selektiivisyyskäyrästä numero 1 kuvaa lähdön 1 ylivirtasuojauksen toimintakäyrää ja numero 2 kuvaa syötön ylivirtasuojauksen toimintakäyrää. /1/



Kuva 19. Selektiivisyyskäyrästä /1/

Selektiivisyyskäyrästä selviää, että vian sattuessa lähdön 1 johdon loppupäässä on oikosulkuvirta numeron 8 osoittamalla tasolla. Tilanteessa rele 1 havahtuisi ensimmäisenä ja jos se olisi epäkunnossa, niin rele 2 havahtuisi pienen viiveen jälkeen. Johto kuuluu siten molempien releiden suojausalueeseen ja varasuoja muodostuu luonnostaan. /1/

Porrasajalla tarkoitetaan peräkkäisten suojausportaiden toiminta-aikojen erotusta ja selektiivisyyden kannalta sen oikea valinta on tärkeä. Suojaus tulee olla nopea tilanteessa, jossa vikavirta on suuri, mutta toisaalta portaiden marginaalit on oltava selektiivisyyden kannalta riittävät. Käänteisaikasuojuuksessa käytetään yleensä pidempiä porrasaikoja verrattuna vakioaikasuojaukseen, koska mm. virranmittauksen epätarkkuus vaikuttaa toiminta-aikaan. Kuvassa 19 on käänteisaikaisten portaiden välinen porrasaika merkitty Δt_{IDMT} :llä ja vakioaikaportaiden välinen porrasaika on merkitty Δt_{DT} :llä. Vakioaikaisten suojiin välinen porrasaika Δt_{DT} lasketaan kaavalla 33. /1/

$$\Delta t_{DT} = 2 \cdot t_E + t_R + t_{CB} + t_M \quad (33)$$

missä

t_E on releen toiminta-ajan toleranssi

t_{CB} on katkaisijan toiminta-aika

t_R on retardaatio- eli pyörtöaika

t_M on varmuusmarginaali

Varmuusmarginaalilla t_M tarkoitetaan aikaviivettä, jolla otetaan huomioon mm. vikavirran DC-komponentista aiheutuva virtamuuntajan kyllästyminen. Viiveeseen vaikuttaa myös vikatyypin ja vikavirran ja virtamuuntajan toistokyvyn suhde aseteltuun virta-arvoon.

Mikäli vikavirta on vain hieman suurempi kuin suojan asetteluarvo ja asetteluarvo on muuntajan toistokyvyn rajoilla, saattaa viive olla jopa DC-komponentin aikavakion pituinen. Kuitenkin suojausketjussa peräkkäiset virta-muuntaajat kyllästyvät tietyllä virta-alueella viivästyttäen suojien toimintaa yhtä paljon. Varmuusmarginaalin riittävä arvo on näin ollen vaihtovirran jakson pituinen aika. /1/

Tilanteessa, jossa suojaketjun peräkkäisten virta-muuntaajien toistokyvyissä toiminta-virta alueella on suuria eroja, voidaan varmuusmarginaalia kasvattaa suhteessa DC-komponentin aikavakioon. Varmuusmarginaaliin vaikuttavat myös laukaisupiirissä käytetyt apureleet. /1/

Käänteisaikaisten suojien välinen porrassaika Δt_{IDMT} lasketaan kaavalla 34. /1/

$$\Delta t_{IDMT} = t_1 \cdot \left(\frac{(1 + E_1 / 100)}{(1 - E_2 / 100)} - 1 \right) + t_R + t_{CB} + t_M \quad (34)$$

missä

E_1 on tekijä, jolla otetaan huomioon virranmittauksen epätarkkuuden aiheuttaman toiminta-aikavirheen ja toiminta-ajan toleranssin yhteisvaikutus lähimpänä vikakohtaa olevassa releessä (%)

E_2 on tekijä, jolla otetaan huomioon virranmittauksen epätarkkuuden aiheuttaman toiminta-aikavirheen ja toiminta-ajan toleranssin yhteisvaikutus suojausketjussa seuraavana olevassa releessä (%)

t_{CB} on katkaisijan toiminta-aika

t_R on retardaatio- eli pyörtöaika

t_M on varmuusmarginaali

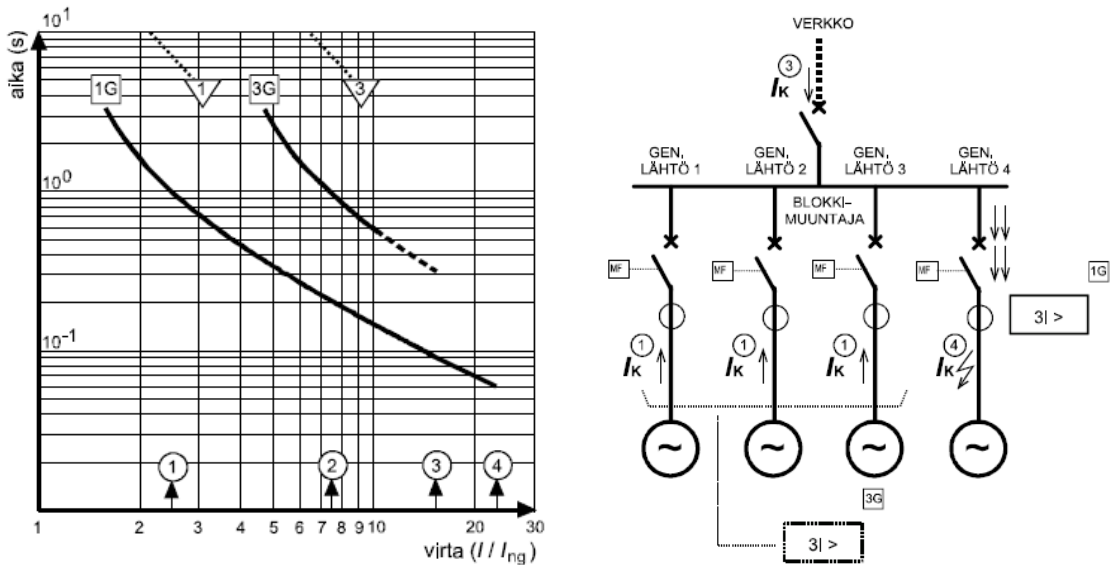
t_1 vikakohtaa lähempänä olevan releen laskennallinen toiminta-aika

Aikaselektiivinen suojaus on myös toteutettavissa vakioaikaisilla ali-impedanssisuojilla. Suoja tarkkailee verkon impedanssia mittaamalla sen jännite- ja virta-arvoja. Oikosulun sattuessa vika ilmenee impedanssin muutoksena. Impedanssisuojalle voidaan määrätä alue, johon saakka suoja ulottuu. Sen toimintaan on riippumaton verkon oikosulkutehon vaihtelusta ja vikavirran määrästä. Impedanssisuojaa käytetään yleisesti verkoissa, joissa oikosulkuteho on pieni. Ali-impedanssisuojaa käytetään tyypillisesti voimalaitoksilla varasuojana, joissa vikavirta saattaa generaattorin vaikutuksesta vaimentua alle ylivirtasuojien asettelu-arvojen. Jos voimalaitoksen johtolähtöjen suojat on toteutettu ali-impedanssireleillä, on suojien välinen selektiivisyys helppo saavuttaa. /1/

7.2. Aika- ja virtaselektiivinen suojaus

Aika- ja virtaselektiivistä sovelletaan tapauksissa, jossa vikavirta on erisuuruinen riippuen siitä, kummalla puolella ylivirtasuojaa oikosulku tapahtuu. Tarvitaan siis erilaiset suojausten toiminta-ajat eri suuntiin ja tarkoitukseen sopii erityisesti käänteisaikainen

suojaus. Myös moniportaisella vakioaika-suojauksella voidaan toteuttaa selektiivinen suojaus. Kuvassa 20 on esitetty eräs aika- ja virtaselektiivinen ylivirtasuojaus sekä siihen liittyvä selektiivisyyskäyrästä. Kuvassa tarkastellaan generaattorilähdön 4 ylivirtasuojauksista. Kaikki neljä generaattoria ovat tehoiltaan yhtä suuret ja niiden käänteisaikaylivirtareleillä ovat samat aika-asettelut. Kolmen ensimmäisen generaattorilähdön suojausten toimintakäyrät on korvattu ns. ekvivalenttisella toimintakäyrällä. Näin generaattorilähdön 4 toimintakäyrää voidaan verrata muiden lähtöjen yhteiseen toimintakäyrään. /1/



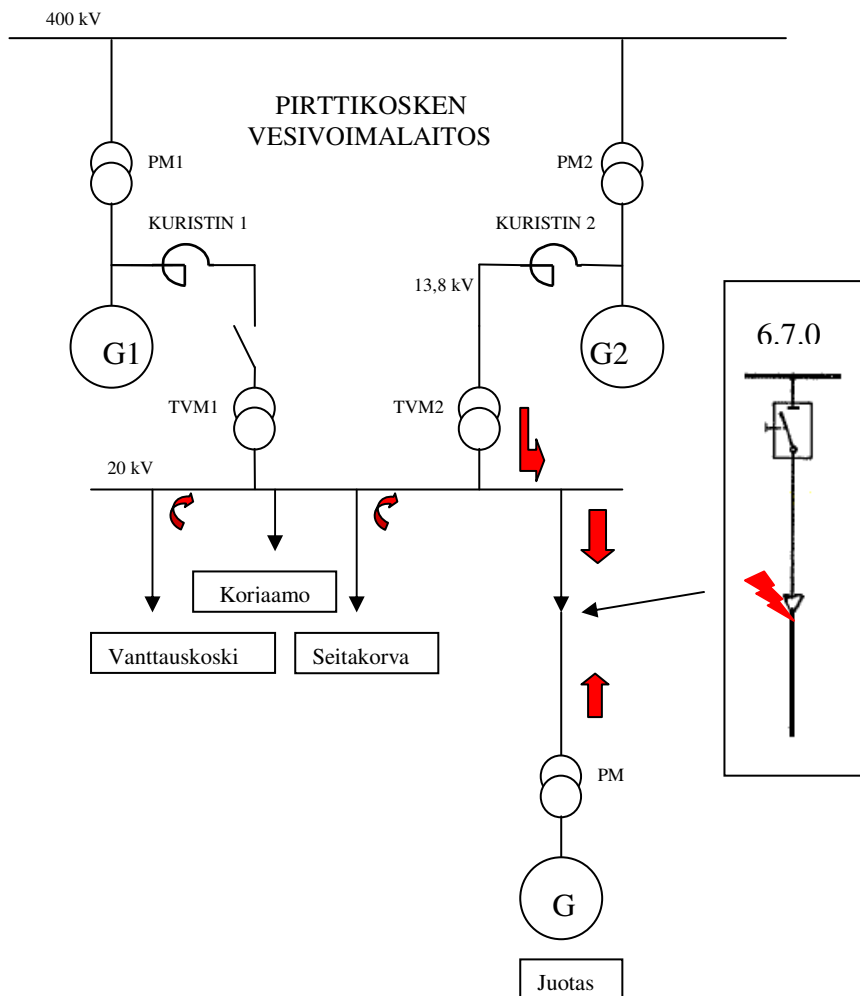
Kuva 20. Aika-virtaselektiivinen suojaus /1/

Ekvivalenttinen toimintakäyrä on saatu kertomalla generaattorien lukumäärä yksittäisen generaattorin toimintakäyrän arvoilla. Ekvivalenttinen toimintakäyrä on merkitty merkillä 3G. Generaattorilähdön 4 toimintakäyrä on merkitty merkillä 1G. Selektiivisyyskäyrästä on merkitty vikavirran taso 4, joka osoittaa generaattorilähdössä 4 tapahtuvan oikosulkuvirran suuruuden, kun vikavirtaa syöttävät taustaverkko ja muut generaattorit. Suojaukseen toiminta-ajaksi voisi käyrästä mukaan näin tulla jopa alle 100 ms. Ekvivalenttgeneraattorin syöttämä vikavirta on vähintään tason 2 osoittamalla tasolla, vaikka yksi generaattori olisi poissa toiminnasta. Siinäkin tapauksessa saavutettaisiin luotettava aikaselektiivisyys generaattorien välillä. /1/

8. JOHTOLÄHDÖN MAA- JA OIKOSULKUSUOJAUS

8.1. Oikosulkuun liittyvät laskutulokset

Pirttikosken vesivoimalaitoksen 20 kV:n järjestelmästä lähtevään, Pirttikosken ja Juotaksen laitokset yhdistävään johtolähtöön 6.7.0 kohdistuu oikosulkutapauksessa vikavirtoja neljästä eri lähteestä, niin kuin kuvassa 21 on esitetty. Vikavirtalähteinä toimivat Pirttikosken vesivoimalaitos sekä Pirttikosken 20 kV:n järjestelmään yhteydessä olevat Vanttauskosken yhteys, Seitakorvan yhteys ja Juotaksen vesivoimalaitoksen yhteys.



Kuva 21. Johtolähtöön 6.7.0 kohdistuvat oikosulkuvirrat

Johtolähdön 6.7.0 katkaisijakennon komponentteihin ja katkaisijakennon jälkeiseen kaapeliin vaikuttavat erisuuret vikavirrat riippuen siitä, millä puolella katkaisijaa oikosulku tapahtuu. Suurimmat oikosulkuvirrat ja sen myötä johtolähdön komponentteihin kohdistuvat suurimmat dynaamiset ja termiset rasitukset esiintyvät oikosulun sattuessa katkaisijakennosta katsottuna Juotaksen puolella, heti katkaisijakennon 6.7.0 jälkeiseen kaapeliin, jolloin katkaisijakennoon kohdistuu oikosulkuvirtoja Pirttikosken vesivoimalaitoksen, Seitakorvan sekä Vanttauskosken suunnista. Itse kaapeliin kohdistuu samassa tapauksessa vielä Juotaksen suunnasta oikosulkuvirtaa. Taulukossa 8 on esitetty katkaisijakennoon 6.7.0 ja jälkeiseen kaapeliin kohdistuvat oikosulkuvirrat sekä oikosulkuvirtojen lähteet. Taulukossa on myös esitetty Pirttikosken vesivoimalaitoksen oikosulkukohtaan tuottamat oikosulkuvirrat ilman laitoksen oikosulkuvirtaa rajoittavien kuristimien vaikutusta. Oikosulkulaskut on esitetty liitteessä 1.

Taulukko 8. Katkaisijakennoon 6.7.0 ja jälkeiseen kaapeliin kohdistuvat 3-vaiheiset oikosulkuvirrat

OIKOSULKULÄHDE:	I_k''	I_k'	I_k
Pirttikosken laitos	1087A	1080A	1068A
Pirttikosken laitos (ilman kuristimia)	1369A	1357A	1339A
Seitakorvan yhteys	860A	800A	740A
Vanttauskosken yhteys	634A	634A	634A
Juotaksen yhteys	424A	368A	141A
YHTEENSÄ:			
Katkaisijakennoon 6.7.0 kohdistuva oikosulkuvirta	2581A	2514A	2442A
Katkaisijakennoon 6.7.0 kohdistuva oikosulkuvirta (ilman kuristimia)	2863A	2791A	2713A

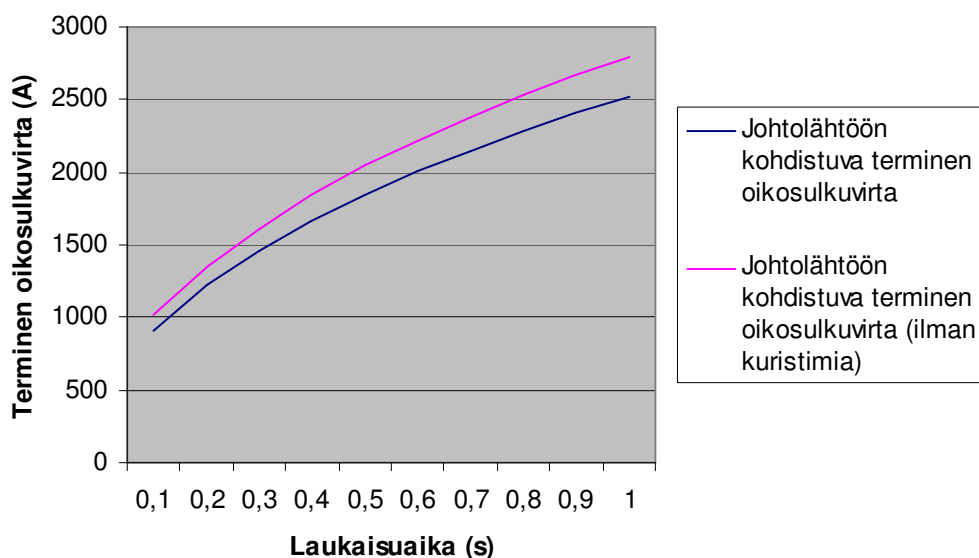
Johtolähdön 6.7.0 jälkeiseen kaapeliin kohdistuvien dynaamisten ja termisten rasituksien laskelmissa on Juotaksen vesivoimalaitoksen oikosulkukohtaan tuottama oikosulkuvirta jätetty huomioimatta, sillä oikosulkukohtaa syötetään kahdesta suunnasta. Tällöin otetaan pelkästään huomioon oikosulkukohtaa syöttävä suunta, joka tuottaa oikosulkukohdassa suurimmat vikavirrat ja näin ollen suurimmat dynaamiset sekä termiset rasitukset.

Johtolähtöön 6.7.0 kohdistuva sysäyoikosulkuvirta määrää sen mekaanisen rasituksen, jonka sen kojeisto tulee minimissään kestää. Taulukossa 9 on esitetty katkaisijakennoon 6.7.0 ja sen jälkeiseen kaapelin oikosulkutapauksessa kohdistuvat sysäyoikosulkuvirran arvot. Taulukossa on myös esitetty katkaisijakennoon 6.7.0 kohdistuvat sysäyoikosulkuvirran arvot, jossa Pirttikosken vesivoimalaitoksen oikosulkuvirtaa rajoittavien kuristimien vaikutusta ei ole otettu huomioon. Sysäyoikosulkuvirran eli dynaamisen oikosulkuvirran laskut on esitetty liitteessä 2.

Taulukko 9. Katkaisijakennoon 6.7.0 ja jälkeiseen kaapeliin kohdistuva dynaaminen oikosulkuvirta

	Kuristimien kanssa	Ilman kuristimia
	I_s	I_s
Johtolähtö	6,323kA	6,911Ka

Kuvassa 22 on esitetty johtolähtöön 6.7.0 ja sen jälkeiseen kaapeliin kohdistuva, 1 sekuntia vastaava ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta suhteessa oikosulun kesto-aikaan. Johtolähdön kojeiston ja johtolähdön jälkeisen kaapelin terminen kestävyys tulee ylittää kuvassa 22 esitetyt arvot. Kuvassa on myös esitetty johtolähtöön kohdistuva terminen oikosulkuvirta tilanteessa, jossa Pirttikosken oikosulkuvirtaa rajoittavien kuristimien vaikutusta vikavirtaan ei ole otettu huomioon. Termisen oikosulkuvirran laskut on esitetty liitteessä 2.



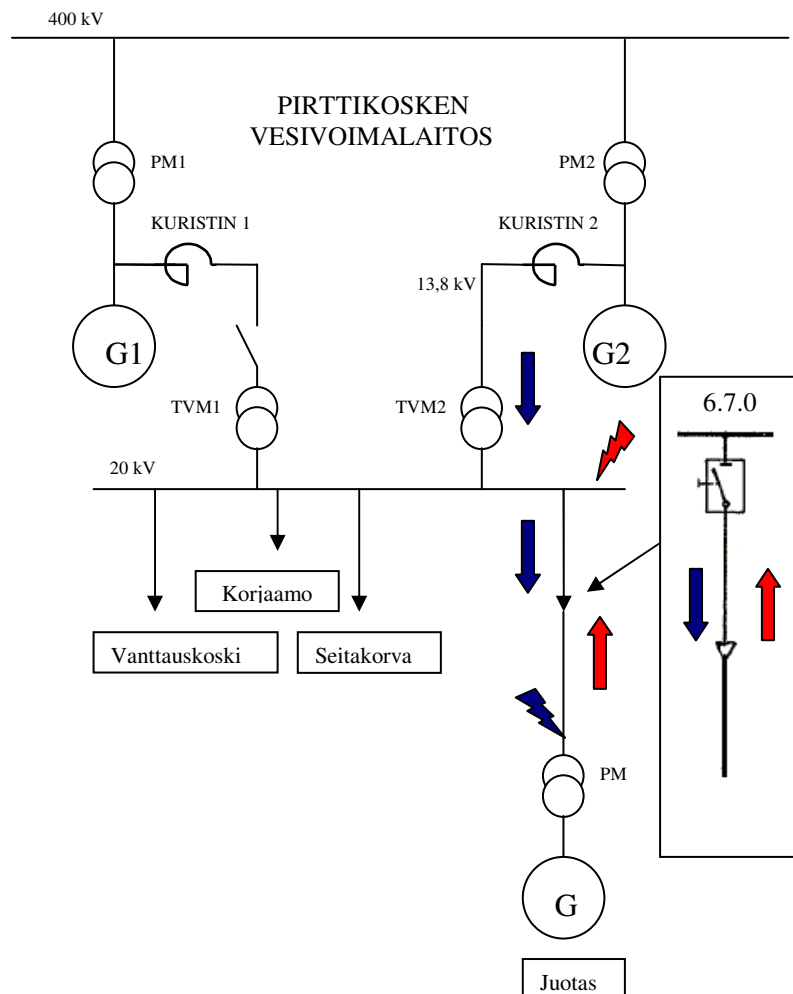
Kuva 22. Johtolähtöön 6.7.0 kohdistuva terminen oikosulkuvirta suhteessa oikosulun kesto-aikaan

Taulukossa 10 on esitetty johtolähdön 6.7.0 läpi kulkevat pienimmät vikavirrat 2-vaiheisessa oikosulussa. Pienimmät johtolähdön läpi kulkevat 2-vaiheiset oikosulkuvirrat esiintyvät oikosulun sattuessa Pirttikosken 20 kV:n kiskostossa, jolloin oikosulkulähteenä toimii Juotaksen vesivoimalaitos. Taulukkoon on myös lisätty 2-vaiheiset oikosulkuarvot, kun oikosulku sattuu Juotaksen puolella. Tässä tapauksessa on vikavirrat laskettu ottaen huomioon verkon kytkentätilanne siten, että pelkästään Pirttikosken vesivoimalaitos toimii oikosulkulähteenä. 2-vaiheiseen oikosulkuun liittyvät laskut on esitetty liitteessä 1. Kuva 23 havainnollistaa vikavirtojen kulun yllä mainituissa vikatilanteissa. Kuvassa sininen nuoli kuvaa vikavirran suunta tilanteessa, jossa Juotaksen vesivoimalaitoksen puolella

sattuu oikosulku. Punainen nuoli osoittaa vikavirran suunnan tapauksessa, jossa oikosulkukohta on Pirttikosken vesivoimalaitoksen 20 kV:n kiskostossa.

Taulukko 10. Johtolähdön 6.7.0 läpi kulkevat 2-vaiheiset oikosulkuvirrat

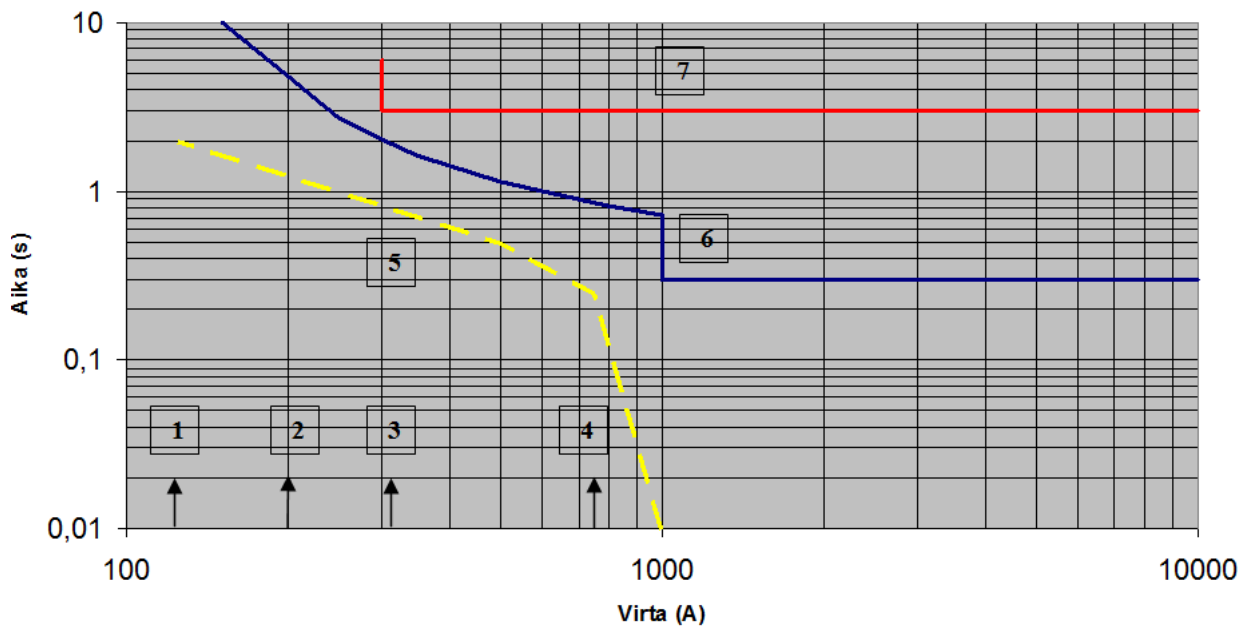
OIKOSULKUKOHTA	OIKOSULKULÄHDE	I_k''	I_k'	I_k'
Pirttikosken vesivoimalaitoksen 20 kV kiskosto	Juotaksen vesivoimalalaitos	334A	289A	111A
Juotas	Pirttikosken vesivoimalalaitos	638A	635A	630A
Juotas	Pirttikosken vesivoimalaitos (ilman kuristimia)	751A	747A	740A



Kuva 23. Vikavirtojen kulku 2-vaiheisessa oikosulussa

8.2. Oikosulkusuojauksen toteutus

Oikosulkusuojaus asetellaan siten, että se toimii luotettavasti pienimmillään oikosulkuvirroilla. Oikosulkusuojaus ei saa toimia suurimmilla kuormitusvirralla ja huomioon tulee myös ottaa muuntajan kytkentävirtasysäys. Komponenttien terminen oikosulkukestoisuus ei saa ylittyä. Selektiivisyyden kannalta suojaus tulee olla nopeampi kuin suojausketjussa ylempänä oleva suojaus. Kuvassa 23 on esitetty johtolähdön suojaukseen liittyvä selektiivisyyskäyrästä. Käyrästä on myös lisätty suojausten kannalta tärkeitä virta-arvoja.



Kuva 23. Selektiivisyyskäyrästä

Ehdotus johtolähdön oikosulkusuojauksesta on esitetty virtakäyrän 6 muodossa. Oikosulkusuojaus toteutettaisiin näin ollen kaksiporraisella suojauskella, jossa ensimmäinen porras olisi käänteisaikainen ja toinen porras vakioaikainen. Käänteisaikatoimintakäyrään liittyvät laskut on esitetty liitteessä 3.

Virtakäyrä 7 esittää Pirttikosken tehovälimuuntajan ylivirtasuojauksien asetukset. Tehovälimuuntajan suojaus on suojausketjussa ensimmäisenä, joten johtolähdön suojaus tulisi laukaista ennen tehovälimuuntajan suojausta. Johtolähdön suojaus on ehdotuksen mukaan aika- sekä osittain virtaselektiivinen tehovälimuuntajan suojauksen suhteen.

Johtolähdön läpi kulkeva kuormitusvirta on merkitty käyrästä numerolla 1. Suurimman kuormitusvirran arvioidaan rajoittuvan Juotaksen vesivoimalaitoksen päämuuntajan nimellisvirta-arvoon, joka on 123 A.

Pienimmät 2-vaiheiset oikosulkuvirrallat on merkitty numerolla 3 ja 4. Numerolla 3 merkityllä virta-arvolla tarkoitetaan johtolähdön 6.7.0 läpi kulkevaa vikavirtaa, oikosulun

sattuessa Pirttikosken 20 kV:n kiskostossa. Tällöin vikavirtalähteenä toimii Juotaksen vesivoimalaitos. Numerolla 4 merkityllä arvolla viitataan johtolähdön 6.7.0 läpi kulkevaan virta-arvoon, joka esiintyy oikosulun sattuessa Juotaksen vesivoimalaitoksen päässä. Tässä tapauksessa vikavirtalähteenä toimii Pirttikosken vesivoimalaitos. Molemmissa tapauksissa johtolähdön 6.7.0 suojaus havahtuu ennen tehovälimuuntajan suojausta.

Johtolähdön 6.7.0 jälkeisen kaapelin suurin sallittu jatkuva kuormitettavuus on merkitty numerolla (2). Kaapelin suurin sallittu jatkuva kuormitettavuus on 200 A. Oikosulkusuojaus havahtuu ennen kaapelin jatkuvan kuormitettavuuden virta-arvon ylittymistä.

Juotaksen vesivoimalaitoksen päämuuntajan kytkentävirtasysäys on merkitty käyrästään numerolla (5). Virtasysäys ei vaikuta suojauksen havahtumiseen.

Näin ollen ylivirtareleen toimintaehdoiksi voidaan asettaa seuraavat arvot, joiden tulee vastata mittamuuntajien ensiöpuolen arvoja seuraavasti:

Ensimmäinen porras I>

Havahtumisvirta = 150 A
Käänteisaikatoimintakäyrästä = Normal inverse
Aikakerroin $k = 0,2$

Toinen porras I>>

Havahtumisvirta = 1 kA
Aikaviive = 0,3s

8.3. Maasulkusuojaukseen liittyvät laskutulokset

8.3.1. Maasulkuvirta

Taulukossa 11 on esitetty Pirttikosken 20 kV:n kiskoston lähtöjen tuottamat maasulkuvirrat vikaresistanssittomassa maasulussa. Maasulkusuojaukseen liittyvät laskut on esitetty liitteessä 4.

Taulukko 11. Maasulkuvirrat

Lähtö:	I_e (A)
Juotas	1,197
Korjaamo	1,15
Seitakorva	2,247
Vanttauskoski	3,33
Yhteensä	7,924

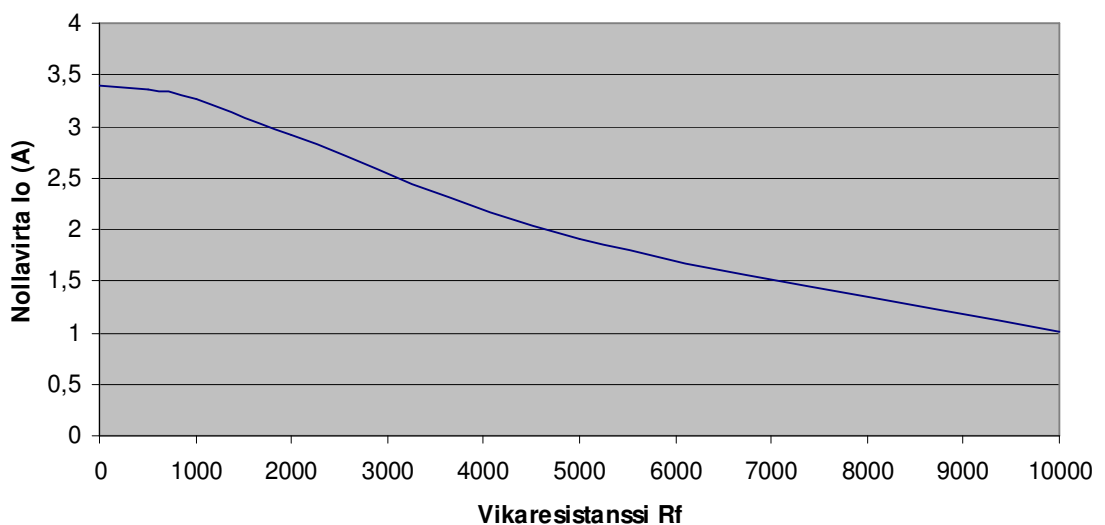
8.3.2. Nollavirta

Maasulkusuojauksen maasulkuvirran asetteluarvoa määriteltäessä on laskettava pienin esiintyvä maasulkuvirran arvo. Maasulkuvirta on pienimmillään silloin, kun verkko on mahdollisimman suppea.

Oletetaan, että pisin yhteys ja siten eniten maasulkuvirtaa maasulkutilanteessa tuottava Vanttauskosken yhteys on auki. Tällöin maasulkuvirran suuruuden määräävät Juotaksen, Korjaamon ja Seitakorvan yhteyksien tuottamat maasulkuvirrat.

Maasulun sattuessa Pirttikosken vesivoimalaitoksen ja Juotaksen vesivoimalaitoksen välisellä yhteydellä on kyseisen lähdön mitattava nollavirta yhtä suuri kuin Seitakorvan ja korjaamon verkkojen tuottamat maasulkuvirrat, sillä viallisen lähdön oma maasulkuvirta kulkee mittauksen läpi kahteen suuntaan ja näin ollen se ei ole mitattavissa.

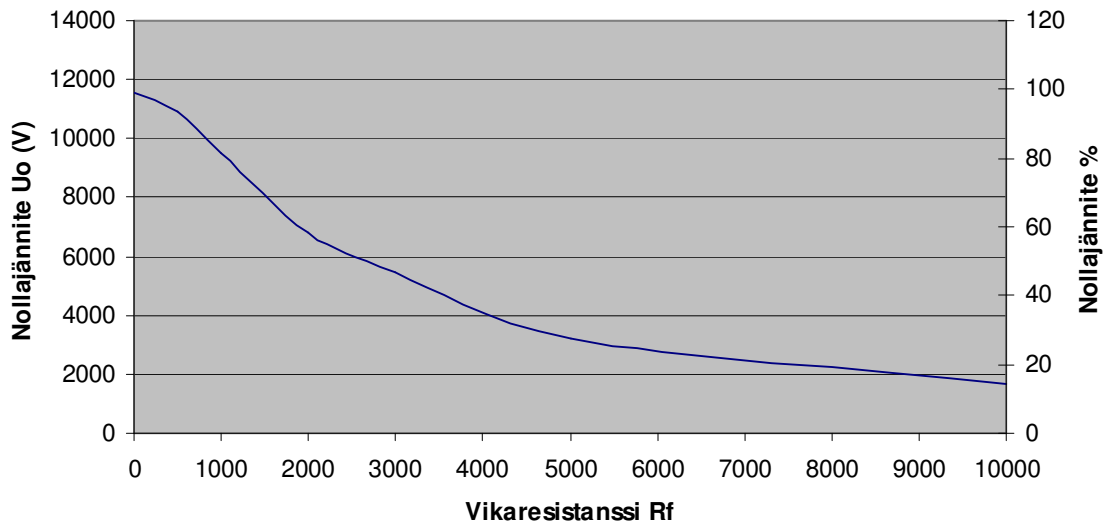
Kuvassa 24 on esitetty Juotaksen lähdön mitattavissa oleva nollavirta suhteessa erisuuruisiin vikaresistanssien arvoihin, kun Vanttauskosken yhteys on auki.



Kuva 24. Nollavirta

8.3.3. Nollajännite

Nollajännite on pienimmillään silloin, kun kaikki lähdöt ovat käytössä ja verkko on mahdollisimman laaja. Kuvassa 25 on esitetty maasulun aikaiset nollajännitteen arvot suhteessa erisuuruisiin vikaresistanssin arvoihin. Nollajännitteen arvot on myös esitetty prosenttilukuna. Prosenttiluku ilmaisee nollajännitteen ja vikaresistanssittomassa maasulussa esiintyvän vaihejännitteen suuruisen nollajännitteen suhteen. Suhdetta kutsutaan myös maasulkuprosentiksi.



Kuva 25. Nollajännite

8.3.4. Kosketusjännite

Maasulkuvirran I_e kulkiessa maahan se muodostaa maadoitusresistanssista R_m johtuen maasulkupaikassa maasulkujännitteen U_m . Maadoitusjännite aiheuttaa ihmisen tai eläimen kosketeltavissa olevan ns. kosketusjännitteen U_{TP} .

Pirttikosken laitoksen suurin maadoitusresistanssi on $0,43 \Omega$. 20 kV:n verkon suurin maasulkuvirta on järjestelmän yhteyksien tuottamat maasulkuvirrat yhteen laskettuna. Maasulkuvirta on tällöin 9,724 A. Mahdollinen maadoitusjännite saisi arvon 3,4 V. Maadoitusjännite on niin pieni, että maasulun kestoaikaa ei maadoitusjännitteen takia täydy rajoittaa.

8.4. Maasulkusuojauksen toteutus

Maasulkusuojaukseen on syytä käyttää suunnattua maasulun suojausta, sillä se toimii ainoastaan silloin, kun maasulku sattuu suojattavalla lähdöllä ja selektiivisyys muiden johtolähtöjen maasulkusuojausten suhteen on yksinkertaisempi saavuttaa.

Maasulun suuntareleen toiminnan ehtona on, että sekä maasulkuvirta I_e ja nollajännite U_o ylittävät tietyt asetteluarvot. Lisäksi suuntareleelle tulee asettaa virran ja jännitteen välinen kulma-arvo, jonka avulla suuntarele havaitsee, että maasulkuvirta kulkee viallisen lähdön läpin viallisella lähdöllä tapahtuvaan maasulkupaikkaan, eikä lähdöltä pois päin. Virran ja jännitteen välinen kulmaero on yllä mainitussa tapauksessa 90° , ainakin teoriassa.

Maasulun voisi esimerkiksi toteuttaa niin, että maasulun suojariele havahtuu maasuluissa, joissa vikaresistanssi alittaa 1000 Ω :n arvot. Tällöin maasulun suuntareleen toimintaehdoiksi asetetaan nollavirran ja nollanjännitteen arvot, jotka esiintyvät vikaresistanssin ollessa 1000 Ω . Toiminnalle voitaisiin asettaa myös 2 sekunnin viive, jolloin nopeasti ohimenevistä maasulkuvioista ei aiheutuisi turhia laukaisuja.

Näin ollen maasulun suuntareleen toimintaehdoiksi voidaan asettaa seuraavat arvot, joiden tulee vastata mittamuuntajien ensiöpuolen arvoja seuraavasti:

Havahtumisvirta I_{oh} : 3,3 A.

Havahtumisjännite U_{oh} : 9,5 kV- 82 %.

Virran ja jännitteen välinen kulma φ_0 : $90^\circ \pm 75^\circ$.

Viive: 2 s.

8.5. Komponenttien tarkastelu

8.5.1. Virtamuuntajat

Katkaisijakennessa sijaitsevat virtamuuntajat koostuvat yhteisistä ensiöistä sekä erillisistä toision mittaus- ja suojausydämistä. Mittaussydäntä käytetään energian mittaukseen ja suojaussydäntä käytetään oikosulkusuojuksen virranmittaukseen. Nykyiset mittaussydämet ovat tarkkuusluokaltaan luokka 1 ja nimellisteholtaan 45 VA. Mittaussydämien mittarivarmuuskerroin on 5.

Virtamuuntajien mittaussydämiä käytetään osana Juotaksen vesivoimalaitokselta Pirttikosken vesivoimalaitokselle siirrettävän energian mittauksessa. Siirrettävä teho on välillä 2-10 MW, jonka vuoksi mittaussydämien tarkkuusluokka on oltava 0.2S tai parempi /13/.

Ensiön nimellisvirta tulee valita siten, että mitattava virta vastaa 5-120 % virtamuuntajan ensiön nimellisvirrasta. Juotaksen vesivoimalaitokseen päämuuntajan nimellisvirta on 123 A, jonka oletetaan olevan maksimi virta-arvo, jota virtamuuntajat mittaavat. Näin ollen virtamuuntajan ensiön nimellisvirraksi voidaan valita 150 A.

Suojaussydämien nimellistaakkaan pohjautuvat virtamuuntajan tarkkuus ja eräät muut suoritusarvot. Virtamuuntajan taakalla tarkoitetaan toisioliittimien väliin kytketyssä kokonaisimpedanssissa kuluvaa tehoa nimellisvirralla. Normaalisti muuntaja pysyy tarkkuusluokassaan taakan vaihdella alueella 25–100 % nimellistaakastaan. /9/

Käytössä olevien mittaussydämien nimellistaakka on 45 VA. Nykyinen kWh-mittari vaihdetaan malliin, joka on tarkkuusluokaltaan parempi kuin entinen. Mittarin vaihto ei

kuitenkaan vaikuta mittaussydämien taakkaan merkittävästi, sillä molemmat mittarit ovat nykyaikaisia ja nykyaikaisten mittarien muodostaman taakan voidaan olettaa olevan mitätön. Nimellistaakan arvot voidaan siten pitää ennallaan.

Mittaussydämen mittarivarmuuskertoimella pyritään varmistamaan, että virtamuuntaja kyllästyy suurilla virta-arvoilla ja toision virrat pysyvät kohtuullisena, näin estäen mittarin vaurioitumisen. Mittarivarmuuseroin on ensiövirran ja muuntajan nimellisvirran suhde, joka kertoo milloin mittaussvirtamuuntajan virhe on nimellistaakallaan yli 10 %, mikä on merkki siitä, että muuntaja on kyllästynyt. Tyypillinen mittarivarmuuseroin on 5. /9/

Vikavirran mittaukseen käytetään suojausvirtasydämiä, sillä muuntajien tulee kykeä toistamaan kymmenkertaisia ensiön nimellisvirta-arvoja. Tarkkuusluokaksi valitaan joko 5P tai 10 P, joista luokkaa 5P käytetään yleisesti keskijänniteverkoissa /9/.

Muuntajan ensiön virta-arvoksi tulee valita kuormitusvirran kannalta riittävä arvo, sillä muuntajan terminen nimellisvirta on yleensä yhtä suuri ensiön nimellisvirran kanssa. Terminen nimellisvirta on suurin virta, joka saa kulkea jatkuvasti ensiökäämityksessä /9/. Johtolähdössä kulkeva kuormitusvirta on arvoiltaan korkeintaan n. 130 A. Näin ollen muuntajan ensiövirran-arvoksi voidaan valita 150 A. Suurempaa ensiön nimellisvirta-arvoa ei kannata valita, sillä oikosulkusuojauksen ensimmäinen ylivirtaporras on suunniteltu asetettavaksi 150 A.

Virtamuuntajan ja suojausvirta-alueen välisillä lyhyillä etäisyyksillä kannattaa toision nimellisvirraksi valita 5 A, koska pienemmällä toision nimellisvirroilla (0,5A, 1A, 2A) täytyy kiinnittää huomiota toisiopuolen ylijännitteisiin /9/. Virtamuuntajien muuntosuhde olisin näin ollen 150/5 A.

Nykyaikaisten suojausvirta-alueiden muuntajalle muodostava taakka on n. 0,5 VA. Muuntajan ja suojausvirta-alueen välisen kaapeloinnin tuottama taakka on lyhyen etäisyyden takia (n. 1m) arvoiltaan n. 0,7 VA, kun käytetään 2,5 mm² johtoja. Lisäksi on otettava huomioon muuntajan toision sisäinen taakka, joka on n. 2 VA suuruinen. Virtamuuntajan nimellistaakaksi voidaan näin ollen valita 5 VA.

Suojausvirtamuuntajan tarkkuusrajakertoimella ilmoitetaan, kuinka monikertaisia nimellisvirran arvoja muuntaja kykenee toistamaan vielä pysyessään omassa tarkkuusluokassaan. Tarkkuusrajakertoimeen vaikuttaa muuntajaan toisioon kytketty taakka. Taakan ollessaan muuntajan nimellistaakkaa pienempi, on muuntajan todellinen tarkkuusrajakerroin suurempi kuin ilmoitettu kerroin. Mikäli muuntajan tarkkuusrajakerroin on 20, on yllä mainittujen taakka-arvojen kanssa laskettu todellinen tarkkuusrajakerroin n. 27.

Muuntajan tulisi pystyä toistamaan suurimmat esiintyvät vikavirta-arvot. Suurin arvioitu virta-arvo on 4,12 kA (ilman kuristimia). Todellisella tarkkuusrajakertoimen arvolla 30 muuntajat kykenevät toistamaan 4,5 kA:n virtoja. Pienemmällä tarkkuusrajakertoimen arvoilla muuntaja saattaa kyllästyä suurilla oikosulkuvirta-arvoilla. Mikäli suojausvirta-alueiden todelliseksi tarkkuusrajakertoimeksi halutaan 30, on sydämien nimelliseksi tarkkuusrajakertoimeksi valittava 30, sillä se on tarkkuusrajakertoimesta 20 seuraava

standardoitu arvo. Todellinen tarkkuusrajakerroin olisi näin ollen 40,5. Näin varmistetaan, että muuntajat eivät kyllästy suurillakaan vikavirta-arvoilla.

Uusien virtamuuntajien tulee näin ollen täyttää seuraavat vaatimukset:

Ensiön nimellisvirta: 150 A

Toision mittaussydämet:

- Tarkkuusluokka 0.2S
- Nimellistaakka 45 VA
- Mittarivarmuuskerroin 5
- Nimellisvirta 5 A

Toision suojaussydämet:

- Tarkkuusluokka 5P
- Nimellistaakka 5 VA
- Tarkkuusrajakerroin 30
- Nimellisvirta 5 A

8.5.2. Kaapelivirtamuuntaja

Nollavirran mittaaminen on nykyään toteutettu kaapelivirtamuuntajalla. Kaapelivirtamuuntajasta ei ole muuta tietoa saatavilla kuin se, että muuntajaa käytetään muuntosuhteella 200/5 A. Muuntosuhdetta on myös mahdollista muuttaa arvoihin 30/5 A ja 20/5 A.

Uuden maasulkureleen myötä virtamuuntajaan kytketty taakka tulee keventämään kaapelivirtamuuntajaan kytkettyä taakkaa, joten muuntajan nimellistaakka ei tule ylittymään.

Nykyaikaisilla releillä on mahdollista mitata 1 % suuruisia ensiön nimellisvirta-arvoja, eli muuntajaa olisi mahdollista käyttää suojauskohteessa muuntosuhteella 200/5 A. Toisaalta muuntosuhteella 20/5 A saavutettaisiin parempi suojausasetteluherkkyys. Nykyisen kaapelivirtamuuntajan katsotaan olevan käyttökelpoinen myös tulevaisuudessa.

8.5.3. Jännitemuuntajat

Jännitemuuntajat sijaitsevat 20 kV:n kytkinlaitoksen yhdessä kennossa, jossa muuntajat on kytketty järjestelmän jännitekiskostoon. Jokaisen muuntajan ensiö on kytketty yhden vaiheen ja maan väliin. Toisiopuolet koostuvat mittaus ja avokolmiokäämistä. Muuntosuhteet ovat $20000/\sqrt{3}:100/\sqrt{3}:100/3$ V. Muuntosuhteella tarkoitetaan, että jännitemuuntajan ensiön ja maan välisen jännitteen ollessa $20000/\sqrt{3}$ V on jännitemuuntajan toision mittauskäämin ja maan välinen jännite $100/\sqrt{3}$ V. /1/

Avokolmiokäämien muuntosuhde $100/3$ V tarkoittaa käämien yli vaikuttavaa jännitettä normaalitilanteessa. Kun kolmen yksivaihemuuntajan toision avokolmiokäämit on kytketty kolmivaiheryhmäksi ja avokolmiokäämit on kytketty yhdestä kulmasta avoimeksi kolmioksi, on avoimen kulman yli vaikuttava jännite 100 V vikaresistanssittomassa maasulussa. /1/

Avokolmiokäämit ovat tyypiltään suojauskäämejä. Jännitemuuntajilta kennoston mittarit ja suojarleet saavat tarvittavat jännite- ja nollajännitetiedot.

Toisiopuolen mittauskäämien tarkkuusluokka on nykyään luokkaa 0,5 ja nimellistaakka on 60 VA. Jännitemuuntajien mittaussydämiä tullaan käyttämään osana Juotaksen vesivoimalaitokselta Pirttikosken vesivoimalaitokselle siirrettävän energian mittauksessa. Siirrettävä teho on välillä 2-10 MW, jonka vuoksi mittaussydämiä tarkkuusluokan on oltava 0.2 tai parempi /12/.

Käytössä olevien mittauskäämien nimellistaakka on 60 VA. Nykyinen kWh-mittari vaihdetaan malliin, joka on tarkkuusluokaltaan parempi kuin entinen. Mittarin vaihto ei kuitenkaan vaikuta mittaussydämiä taakkaan merkittävästi, sillä molemmat mittarit ovat nykyaikaisia ja nykyaikaisten mittarien muodostaman taakan voidaan olettaa olevan mitätön. Nimellistaakan arvot voidaan siten pitää ennallaan.

Muuntajan nimellisjännitekerroin kertoo, kuinka kauan muuntaja sietää ylijännitettä. Maasulun aikana vaiheen jännite saattaa nousta korkeisiin arvoihin. Nimellisjännitekertoimella otetaan siis huomioon jännitteen nousu maasulkutilanteissa. Jännitekertoimen suuruus riippuu verkon maadoitustavasta ja siitä, miten muuntajan ensiökäämi on kytketty verkkoon. Muuntajat on kytketty vaiheiden ja maan väliin ja käytetty verkko maasta erotettu. Nimellisjännitekertoimeksi valitaan 1,2.

Toisiopuolen avokolmiokäämien tarkkuusluokka on nykyään 1 ja nimellistaakka 100 VA. Juotaksen johtolähdön uuden maasulkureleen myötä avokolmiokäämien taakka pienenee. Liian pieni taakka saattaa heikentää muuntajien tarkkuutta. Muuntajiin on kuitenkin kytketty monta taakkaa suojarleiden muodossa, joten yhden releen vaihtuminen nykyaikaiseen releeseen, joka on taakaltaan pienempi, ei vaikuta muuntajien kokonaistaakkaan merkittävästi. Nimellistaakan arvo voidaan pitää ennallaan.

Avokolmiokäämille suositellaan tarkkuusluokkaa 6P, mikä on tarkkuusluokista heikon /1/.

Uusien jännitemuuntajien tulisi täyttää seuraavat ehdot:

- Muuntosuhteet $20000/\sqrt{3}:100/\sqrt{3}:100/3$ V
- Nimellisjännitekerroin 1,2

Toision mittauskäämit:

- Tarkkuusluokka 0.2
- Nimellistaakka 60 VA

Toision avokolmiokäämit:

- Tarkkuusluokka 6P
- Nimellistaakka 100 VA

8.5.4. Katkaisija

Suurin katkaisuvirta voi olla korkeintaan katkaisijaan läpi kulkevan oikosulkuvirran suuruinen. Suurin katkaisijaan läpi kulkeva oikosulkuvirta on 2863 A, kun ei oteta huomioon Pirttikosken vesivoimalaitoksen virtaa rajoittavien kuristimien vaikutusta. Katkaisijan katkaisukyky on 14,5 kA. Katkaisija on käyttökelpoinen myös tulevaisuudessa. Katkaisijan nimellisarvot on esitetty liitteessä 7.

8.5.5. Kaapeli

Pirttikosken laitoksen 20 kV:n kennoston johtolähdön 6.7.0 lähtevä kaapeli on tyyppiä AHXAMK 3*70+35. Kappelin ekvivalenttinen terminen 1 sekunnin oikosulkukestoisuus on pienimmillään 6,7 kA. Kaapeli kestää suurimman lasketun oikosulkuvirran termisen vaikutuksen, pitkälle yli 2 sekunnin kestävillä oikosuluilla.

Kaapelin dynaaminen oikosulkukestoisuus on arvoltaan 100 kA. Kaapeliin vaikuttava dynaaminen oikosulkuvirta on suurimmillaan n. 3 kA. Esiintyvät virrat eivät vaaranna kaapelin dynaamista kestävyyttä. Kaapelin nimellisarvot on esitetty liitteessä 6.

9. TEHTÄVÄT MUUTOKSET

Johtolähdön nykyiset sähkömekaaniset ylivirta- ja maasulkureleet vaihdetaan nykyaikaisiin suojareleisiin. Ylivirta- ja maasulkusuojauksen toteutusehdotuksissa on käytetty ylivirtasuojana kaksiportaista ylivirtasuojasta sekä maasulkusuojauksessa suunnattua yksiportaista suojausta. Suojausportaiden määrää lisätään, mikäli sen katsotaan olevan tarpeen.

Virtamuuntajat joudutaan vaihtamaan, sillä mittausydämien tarkkuusluokka ei täytä sähkökaupan vaatimuksia. Suojaussydämien nimellistaakan todetaan myös olevan turhan suuri. Muuten voidaan uusissa muuntajissa käyttää samoja nimellisarvoja kuin käytössä olevissa muuntajissa.

Jännitemuuntajat joudutaan myös vaihtamaan mittauskäämien liian huonon tarkkuusluokan myötä. Muuntosuhteen ja nimellistaakkojen suhteen on päätytty samoihin arvoihin kuin käytössä olevilla jännitemuuntajilla.

13,8 kV:n kiskostossa sijaitsevien kuristimien poistosta aiheutuva oikosulkuvirta-arvojen kasvu on todettu maltilliseksi. Oikosulkuvirtojen kasvu ei vaaranna johtolähdön katkaisijan katkaisukykyä eikä sen jälkeisen kaapelin dynaamista kestävyyttä. Näin ollen kuristimet on mahdollista poistaa.

Juotaksen vesivoimalaitoksen tahdistus ja kytkeytyminen 20 kV:n verkkoon toteutetaan Juotaksen vesivoimalaitoksella sijaitsevalla kojeistolla. Jotta Pirttikosken ja Juotaksen välinen verkko saadaan jännitteelliseksi ja sitä myötä Juotaksen laitos tahdistettua verkkoon, tulee Pirttikosken puoleisen johtolähdön katkaisija kytkeytyä kiinni.

Edellytyksen katkaisijan kiinni kytkeytymiselle tulee olla Pirttikosken ja Juotaksen välisen verkon jännitteettömyys. Mikäli laitosten välinen verkko on jännitteellinen ilman että Pirttikosken puoleisen johtolähdön katkaisija on kiinni, tarkoittaa se sitä, että Juotaksen laitosta ei ole tahdistettu verkkoon. Pirttikosken ja Juotaksen välisen verkon jännitteettömyyden toteamiseen voitaisiin käyttää kahden vaiheen väliin kytkettyä jännitemuuntajaa, joka ohjaisi relettä. Releeltä saataisiin tieto Pirttikosken puoleisen johtolähdön katkaisijalle laitosten välisen verkon jännitteettömyydestä. Samantyyppistä ratkaisua on Kemijoki Oy:llä käytetty ennestään.

Kantaverkon 400 kV:n ja Pirttikosken vesivoimalaitoksen välisen verkko-yhteyden menettämisen myötä Pirttikosken laitos ja sen 20 kV:n järjestelmään kytketyt verkot toimisivat saarekkeessa. Tällöin Pirttikosken laitoksen generaattoreista yksi kytkeytyy pois verkosta. Toinen generaattori pyritään pitämään käynnissä, jolloin laitoksen omakäyttäjärjestelmä pysyy jännitteellisenä. Saarekekäytössä ongelmaksi muodostuu Juotaksen laitos, sillä sitä ei ole suunniteltu saarekekäyttöön. Siitä syystä verkon taajuus saattaa alkaa heittelehtimään. Juotaksen laitos tulee siinä tapauksessa kytkeä irti Pirttikosken laitoksen 20 kV:n järjestelmästä. Tarkoitukseen voisi käyttää taajuusrelettä, jolla tarkkaillaan Pirttikosken puoleisen verkon taajuutta. Mikäli taajuus ei pysy

asetteluarvojen rajoissa, rele antaa käskyn Pirttikosken puoleisen johtolähdön katkaisijalle laukeamisesta.

10. YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tavoitteisiin kuului Pirttikosken vesivoimalaitoksen 20 kV:n järjestelmästä lähtevän johtolähdön maa- ja oikosulkusuojauksen suunnittelu, jossa johtolähtö on osa Pirttikosken ja Juotaksen vesivoimalaitosten välistä verkkoa. Työn tavoitteisiin kuului myös tarkastella Pirttikosken vesivoimalaitoksessa sijaitsevien kuristimien poistosta aiheutuvaa oikosulkuvirtojen kasvun vaikutusta johtolähdön komponentteihin.

Työssä on käyty läpi oiko- ja maasulkusuojauksen kannalta oleellisia oiko- ja maasulun aikana esiintyviä suureita sekä niiden laskemiseen liittyvää teoriaa. Suojausreleistyksen kannalta työssä on käyty läpi eri aikajaksojen suojarelerakenteita sekä tärkeimpiä suojareletyyppejä ja niiden toimintaperiaatteita.

Työssä on laskettu esiintyvät maa- ja oikosulkuvirrat. Laskentatulosten perusteella on laadittu ehdotus johtolähdön oiko- ja maasulkusuojauksesta. Ehdotukseen kuuluu johtolähdön vanhojen sähkömekaanisten suojareleiden uusiminen nykyaikaisella kaksiportaisella ylivirtasuojauksella sekä suunnatulla maasulkusuojauksilla. Suojauksen suhteen on myös annettu ehdotus suojareleiden asetteluarvoista.

Työssä on käsitelty mittamuuntajien toimintaperiaatteisiin, käyttötarkoituksiin sekä nimellisarvojen valitsemiseen liittyvää teoriaa. Mittamuuntajista on todettu, että nykyiset virta- ja jännitemuuntajat eivät täytä niille asetettuja tarkkuusluokan vaatimuksia. Työssä on esitetty ehdotus uusien mittamuuntajien nimellisarvoista. Kaapelivirtamuuntajan on todettu olevan käyttökelpoinen myös tulevaisuudessa.

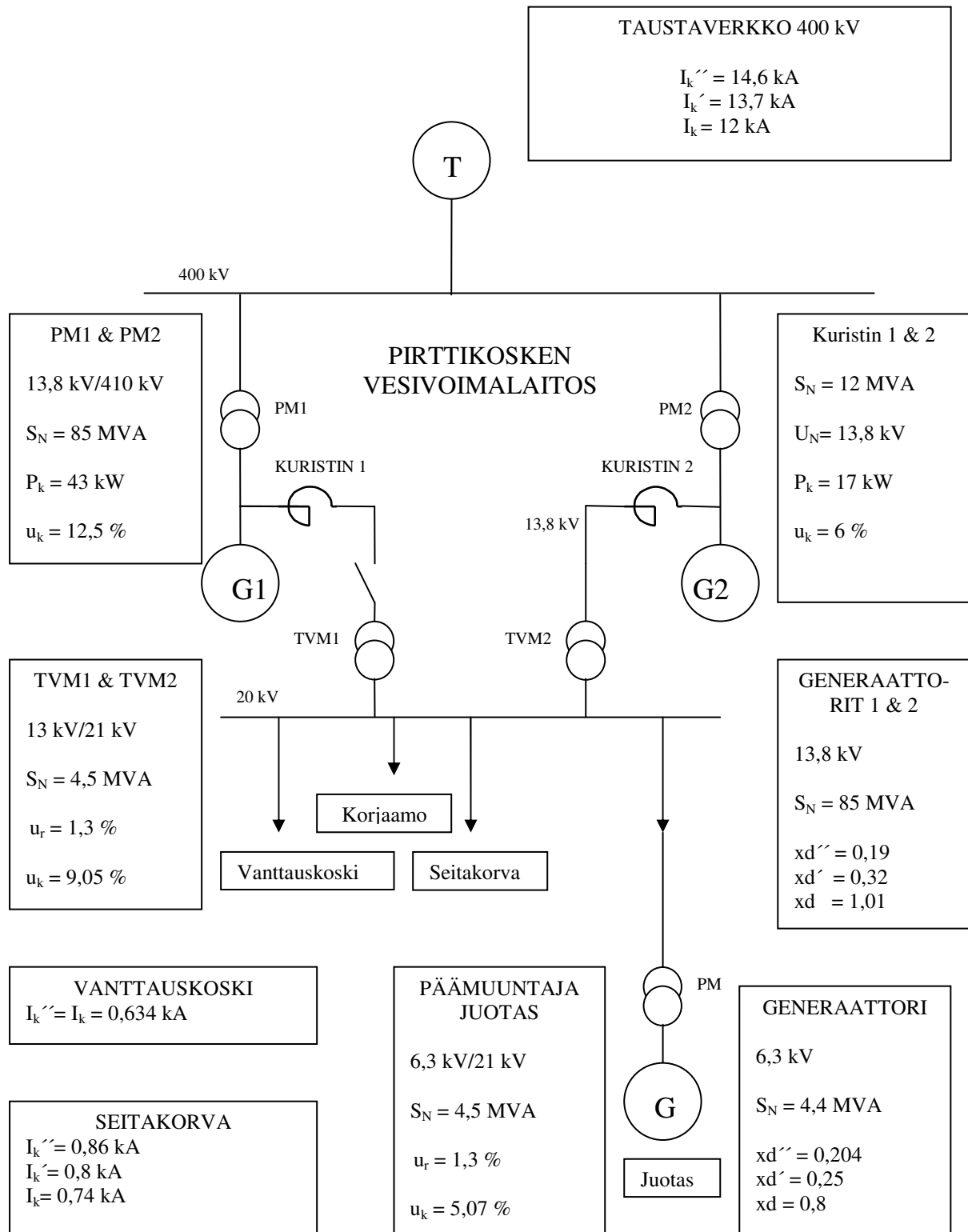
Pirttikosken voimalaitoksella sijaitsevien, oikosulkuvirtaa rajoittavien kuristimien poistosta aiheutuva oikosulkuvirran kasvu on työssä todettu niin pieneksi, että siitä ei aiheudu vaaraa johtolähdön katkaisijan katkaisukyvyyn eikä johtolähdön kaapelin dynaamisen kestävyys suhteen.

11. LÄHDELUETTELO

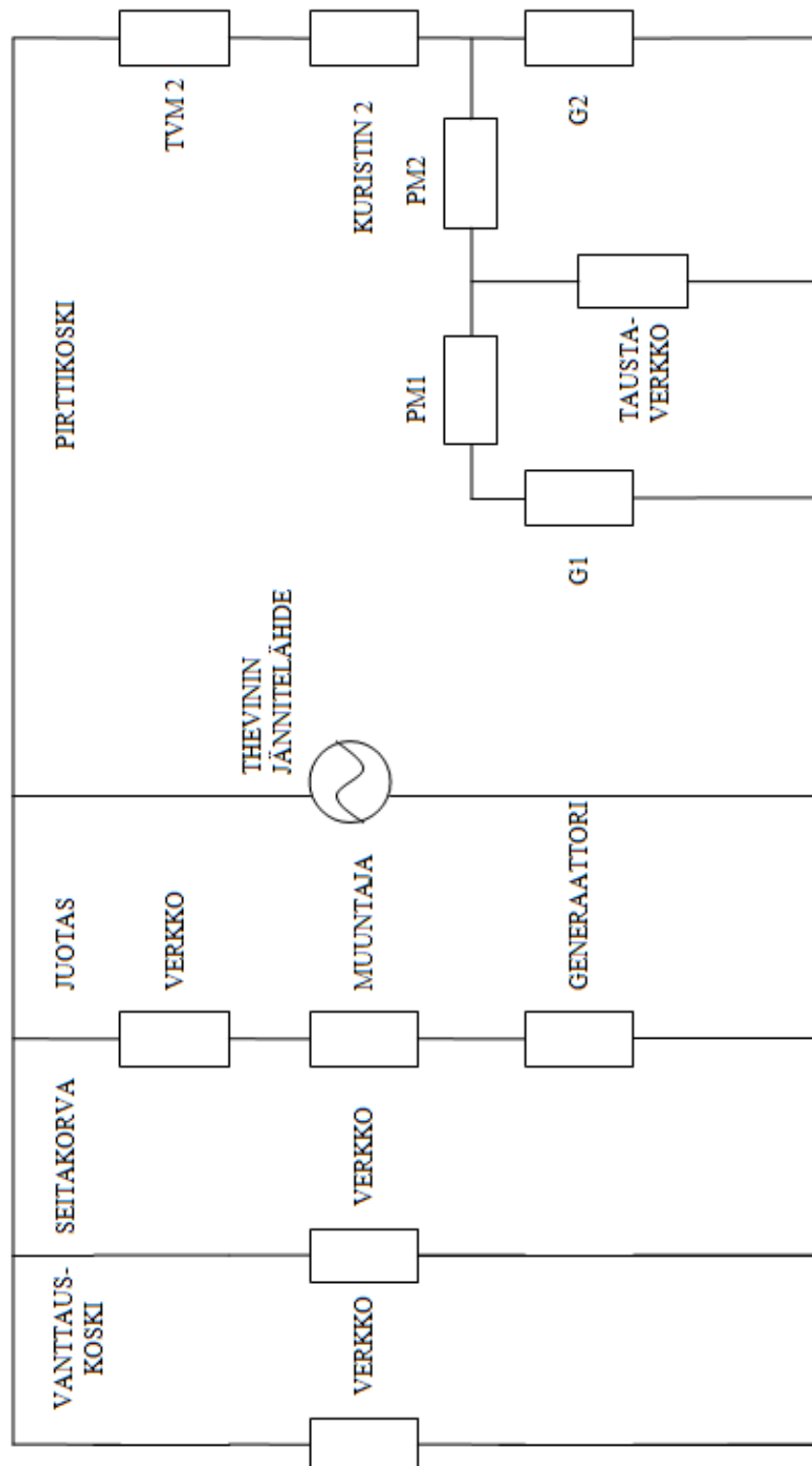
- /1/ ABB, TTT-käsikirja, [www-dokumentti], < www.abb.fi >, 10.3.2010.
- /2/ ABB Oy, Distribution Automation, Calculation of the Current Transformer Accuracy Limit Factor, [www-dokumentti], <[http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf?display/194811e319ce2bb7c2256f9e00324a2f/\\$File/applicationCT_accuracylimitfactorENa.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf?display/194811e319ce2bb7c2256f9e00324a2f/$File/applicationCT_accuracylimitfactorENa.pdf)>, 1.4.2010.
- /3/ Aura, Lauri & Tonteri, Antti J, Sähkölaitostekniikka, 1.painos, WSOY 1993.
- /4/ Huotari, Kari & Partanen, Jarmo, Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto, 1998.
- /5/ IEC 909, Short-circuit current calculation in three-phase a.c systems, 1.painos, 1998.
- /6/ INSKO, Oikosulkukysymykset sähköverkossa, 3.painos, Copy-Set Oy, 1991.
- /7/ Kemijoki Oy, Internet sivusto, [www-sivusto], < www.kemijoki.fi>, 10.2.2010.
- /8/ Lakervi, Erkki & Partanen, Jarmo, Sähköjaketekniikka, 1.painos, Gaudeamus Helsinki University Press / Otatiето, 2008.
- /9/ Mörsky Jorma, Relesuojaustekniikka, 2.painos, Otatiето, 1992.
- /10/ Partanen J., Maasulkusuojaus, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, [www-dokumentti], <www.ee.lut.fi/fi/opi/kurssit/Sa2710500/Maasulkusuojaus.pdf>, 1.3.2010.
- /11/ SFS 6001 Suurjänniteasennukset, 3.painos, Suomen standardisoimisliitto, 2009.
- /12/ Sähköenergialiitto ry, Vapaan sähkökaupan mittaus, [www-dokumentti], < <http://www.satavakka.fi/skansio/pdfat/30298.pdf>>, 20.3.2010.
- /13/ Utu Powel Oy, Tuoteluettelo 2008, [www-sivusto], <www.utupowell.fi>, 25.3.2010.

12. LIITELUETTELO

LIITE 1	OIKOSULKULASKUT
LIITE 2	DYNAAMISET JA TERMISET OIKOSULKUVIRRAT
LIITE 3	OIKOSULKUSUOJAUKSEN LASKUT
LIITE 4	MAASULKUVIRRAT
LIITE 5	PIIRIKAAVIOT
LIITE 6	VERKKOKARTAT, KAAPELI- JA JOHTOTAULUKOT
LIITE 7	KATKAISIJAN NIMELLISARVOT



OIKOSULKUPIIRIN SIJASKYTKENTÄ



PIRTTIKOSKEN VESIVOIMALAITOKSEN, OIKOSULKUPIIRIIN SISÄLTYVIEN
KOMPONENTTIEN MALLINTAMINEN NIITÄ VASTAAVILLA IMPEDANSSILLA

TAUSTAVERKKO (KANTAVERKKO)

Pääjännite	$U_n := 400\text{KV}$
Jännitekerroin	$c := 1.1$
Alkuoikosulkuvirta	$I'_k := 14.6\text{KA}$
Muutosoikosulkuvirta	$I'_k := 13.7\text{KA}$
Jatkuvan tilan oikosulkuvirta	$I_k := 12\text{KA}$

$$X''_k := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I'_k} = 17.399597\Omega$$

$$X'_k := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I'_k} = 18.542636\Omega$$

$$X_k := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I_k} = 21.16951\Omega$$

Redusointi 21 kV tasolle:

$$U_{N1} := 410\text{KV}$$

$$U_{N2} := 21\text{KV}$$

$$X''_{kT21KV} := X''_k \cdot \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}} \right)^2 = 0.045647\Omega$$

$$X'_{kT21KV} := X'_k \cdot \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}} \right)^2 = 0.048645\Omega$$

$$X_{kT21KV} := X_k \cdot \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}} \right)^2 = 0.055537\Omega$$

Taustaverkon impedanssit redusoituna 21 kV tasolle:

$$Z''_{TAUSTA21KV} := X''_{kT21KV}j = 0.045647j\Omega$$

$$Z'_{TAUSTA21KV} := X'_{kT21KV}j = 0.048645j\Omega$$

$$Z_{TAUSTA21KV} := X_{kT21KV}j = 0.055537j\Omega$$

PM1 & PM2 (PÄÄMUUNTAJAT)

Nimellisjännite	$U_n := 13.8\text{KV}$
Nimellisteho	$S_n := 85\text{MW}$
Suhteellinen oikosulkuimpedanssi (%)	$u_k := 12.5$
Tyhjäkäyntihäviöt	$P_k := 43\text{kW}$

$$Z_k := \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0.280059\Omega$$

$$R_k := \frac{P_k}{S_n} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0.001133\Omega$$

$$X_k := \sqrt{(Z_k^2 - R_k^2)} = 0.280057\Omega$$

Redusointi:

$$U_{N1} := 13.8\text{KV} \quad U_{N2} := 21\text{KV}$$

$$X_{\text{PM}21\text{KV}} := X_k \cdot \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}} \right)^2 = 0.648524\Omega$$

$$R_{\text{PM}21\text{KV}} := R_k \cdot \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}} \right)^2 = 0.002625\Omega$$

Päämuuntajien impedanssit redusoituna 21 kV tasolle:

$$Z_{\text{PM}21\text{KV}} := R_{\text{PM}21\text{KV}} + X_{\text{PM}21\text{KV}} = (0.002625 + 0.648524j)\Omega$$

GENERAATTORIT

$$x''_d := 0.19 \quad U_n := 13.8\text{KV}$$

$$x'_d := 0.32 \quad S_n := 85\text{MW}$$

$$x_d := 1.01$$

Reaktanssit:

$$X''_{\text{GEN}} := x''_d \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0.425689\Omega$$

$$X'_{\text{GEN}} := x'_d \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0.716951\Omega$$

$$X_{\text{GEN}} := x_d \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 2.262875 \Omega$$

Resistanssit:

$$R''_{\text{GEN}} := 0.07 \cdot X''_{\text{GEN}} = 0.029798 \Omega$$

$$R'_{\text{GEN}} := 0.07 \cdot X'_{\text{GEN}} = 0.050187 \Omega$$

$$R_{\text{GEN}} := 0.07 \cdot X_{\text{GEN}} = 0.158401 \Omega$$

Redusointi:

$$U_{N1} := 13.8 \text{ kV}$$

$$U_{N2} := 21 \text{ kV}$$

Reaktanssit:

$$X''_{\text{GEN}21\text{KV}} := X''_{\text{GEN}} \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}} \right)^2 = 0.985765 \Omega$$

$$X'_{\text{GEN}21\text{KV}} := X'_{\text{GEN}} \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}} \right)^2 = 1.660235 \Omega$$

$$X_{\text{GEN}21\text{KV}} := X_{\text{GEN}} \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}} \right)^2 = 5.240118 \Omega$$

Resistanssit:

$$R''_{\text{GEN}21\text{KV}} := R''_{\text{GEN}} \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}} \right)^2 = 0.069004 \Omega$$

$$R'_{\text{GEN}21\text{KV}} := R'_{\text{GEN}} \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}} \right)^2 = 0.116216 \Omega$$

$$R_{\text{GEN}21\text{KV}} := R_{\text{GEN}} \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}} \right)^2 = 0.366808 \Omega$$

Generaattorien impedanssit redusoituna 21 kV tasolle:

$$Z''_{\text{GEN}21\text{KV}} := R''_{\text{GEN}21\text{KV}} + j X''_{\text{GEN}21\text{KV}} = (0.069004 + j 0.985765) \Omega$$

$$Z'_{\text{GEN21KV}} = R'_{\text{GEN21KV}} + jX'_{\text{GEN21KV}} = (0.116216 + j1.660235) \Omega$$

$$Z_{\text{GEN21KV}} = R_{\text{GEN21KV}} + jX_{\text{GEN21KV}} = (0.366808 + j5.240118) \Omega$$

KURISTIMET

Nimellisjännite	$U_n := 14\text{KV}$
Nimellisteho	$S_n := 12\text{MW}$
Suhteellinen oikosulkuimpedanssi (%)	$u_k := 6.4$
Tyhjäkäyntihäviöt	$P_k := 17\text{kW}$

$$Z_k := \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 1.045333 \Omega$$

$$R_k := \frac{P_k}{S_n} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0.023139 \Omega$$

$$X_k := \sqrt{(Z_k^2 - R_k^2)} = 1.045077 \Omega$$

Redusointi:

$$U_{N1} := 13.8\text{KV} \quad U_{N2} := 21\text{KV}$$

$$X_{\text{KURISTIN21KV}} = X_k \cdot \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}} \right)^2 = 2.420075 \Omega$$

$$R_{\text{KURISTIN21KV}} = R_k \cdot \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}} \right)^2 = 0.053582 \Omega$$

Kuristimien impedanssit redusoituna 21 kV tasolle:

$$Z_{\text{KUR21KV}} = R_{\text{KURISTIN21KV}} + jX_{\text{KURISTIN21KV}} = (0.053582 + j2.420075) \Omega$$

TEHOVÄLIMUUNTAJAT

Nimellisjännite	$U_n := 21\text{KV}$
Nimellisteho	$S_n := 4.5\text{MW}$
Suhteellinen oikosulkuimpedanssi (%)	$u_k := 9.0\%$
Suhteellinen oikosulkuresistanssi (%)	$u_r := 1.3$

$$Z_k := \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 8.869\Omega$$

$$R_{TVM21KV} := \frac{u_r}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 1.274\Omega$$

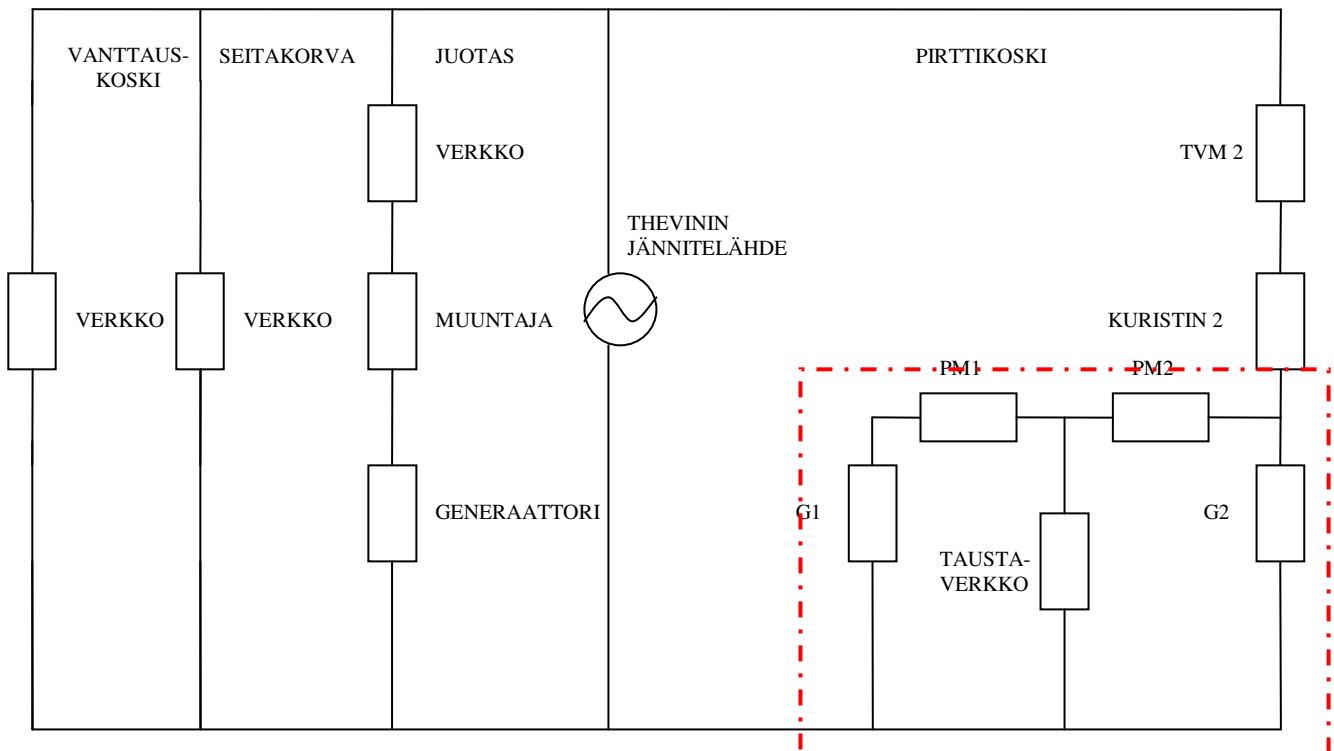
$$X_{TVM21KV} := \sqrt{(Z_k^2 - R_{TVM21KV}^2)} = 8.77702\Omega$$

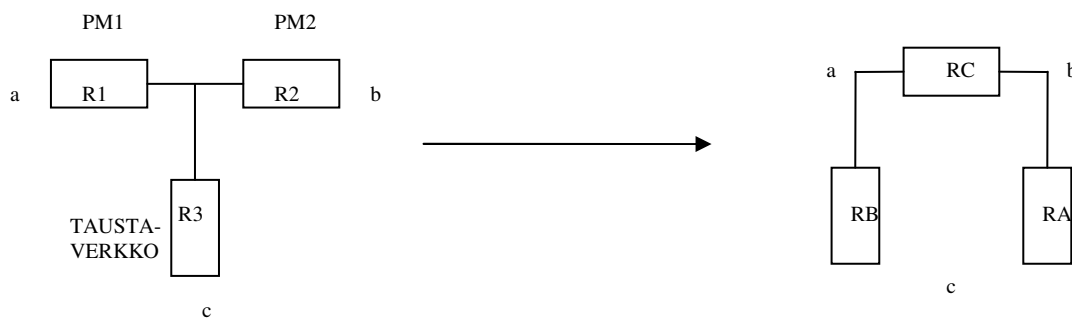
Tehovälimuuntajien impedanssit:

$$Z_{TVM21KV} := R_{TVM21KV} + jX_{TVM21KV} = (1.274 + j8.77702)\Omega$$

SIJASKYTKENNÄN SIEVENNYS

Punaista aluetta ei ole mahdollista sieventää ilman tähti-kolmio muunnosta.





Y-D MUUNNOKSET

$$R_1 := Z_{PM21KV} = (0.002625 + 0.648524j) \Omega$$

$$R_2 := Z_{PM21KV} = (0.002625 + 0.648524j) \Omega$$

$$R_3 := Z''_{TAUSTA21KV} = 0.045647 \Omega$$

$$R''_c := \frac{(R_1 \cdot R_2) + (R_1 \cdot R_3) + (R_2 \cdot R_3)}{R_3} = (0.079828 + 10.510769j) \Omega$$

$$R''_b := \frac{(R_1 \cdot R_2) + (R_1 \cdot R_3) + (R_2 \cdot R_3)}{R_2} = (0.002625 + 0.739818j) \Omega$$

$$R''_a := \frac{(R_1 \cdot R_2) + (R_1 \cdot R_3) + (R_2 \cdot R_3)}{R_1} = (0.002625 + 0.739818j) \Omega$$

$$R_1 := Z_{PM21KV} = (0.002625 + 0.648524j) \Omega$$

$$R_2 := Z_{PM21KV} = (0.002625 + 0.648524j) \Omega$$

$$R_3 := Z'_{TAUSTA21KV} = 0.048645 \Omega$$

$$R'_c := \frac{(R_1 \cdot R_2) + (R_1 \cdot R_3) + (R_2 \cdot R_3)}{R_3} = (0.075231 + 9.9428j) \Omega$$

$$R'_b := \frac{(R_1 \cdot R_2) + (R_1 \cdot R_3) + (R_2 \cdot R_3)}{R_2} = (0.002625 + 0.745815j) \Omega$$

$$R'_a := \frac{(R_1 \cdot R_2) + (R_1 \cdot R_3) + (R_2 \cdot R_3)}{R_1} = (0.002625 + 0.745815j) \Omega$$

$$R_1 := Z_{PM21KV} = (0.002625 + 0.648524j) \Omega$$

$$R_2 := Z_{PM21KV} = (0.002625 + 0.648524j) \Omega$$

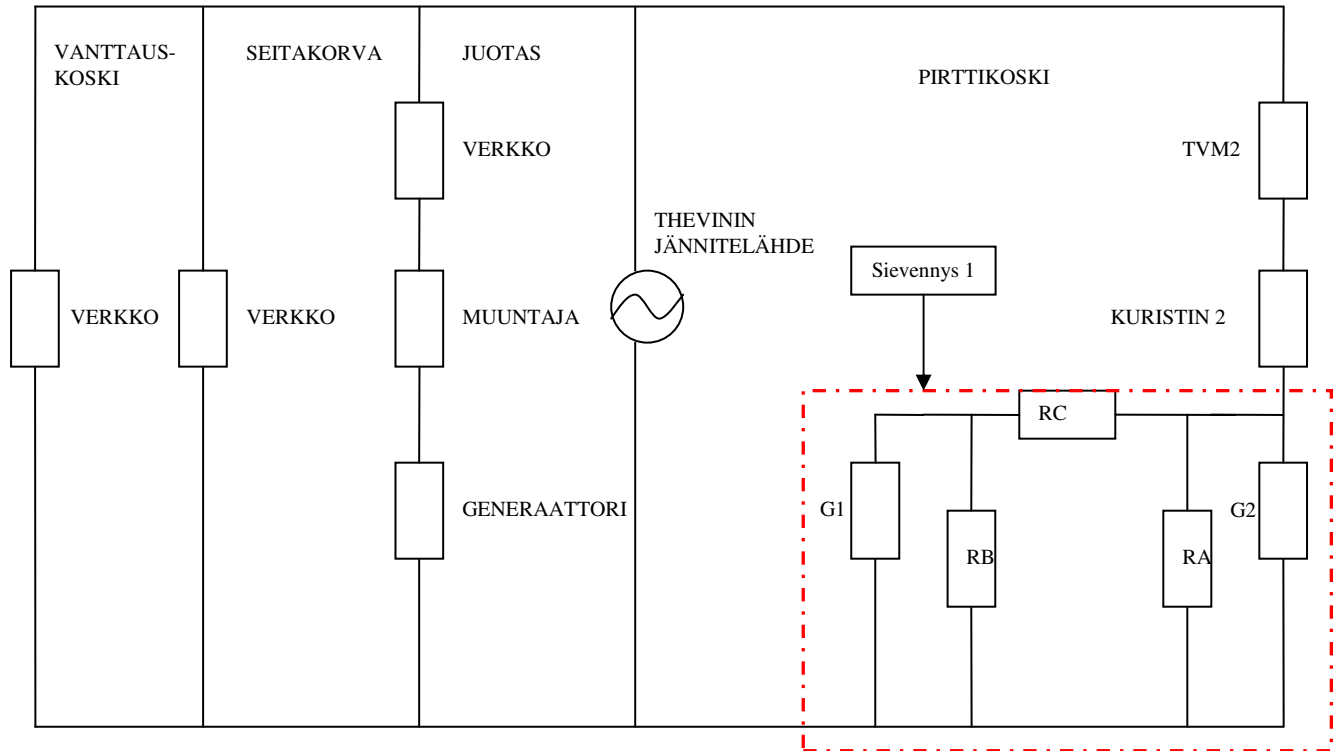
$$R_3 := Z_{TAUSTA21KV} = 0.055537 \Omega$$

$$R_c := \frac{(R_1 \cdot R_2) + (R_1 \cdot R_3) + (R_2 \cdot R_3)}{R_3} = (0.066547 + 8.86997j) \Omega$$

$$R_b := \frac{(R_1 \cdot R_2) + (R_1 \cdot R_3) + (R_2 \cdot R_3)}{R_2} = (0.002625 + 0.759598j) \Omega$$

$$R_a := \frac{(R_1 \cdot R_2) + (R_1 \cdot R_3) + (R_2 \cdot R_3)}{R_1} = (0.002625 + 0.759598j) \Omega$$

SIJAISSKYTKENTÄ TÄHTI-KOLMIO MUUNNOKSEN JÄLKEEN



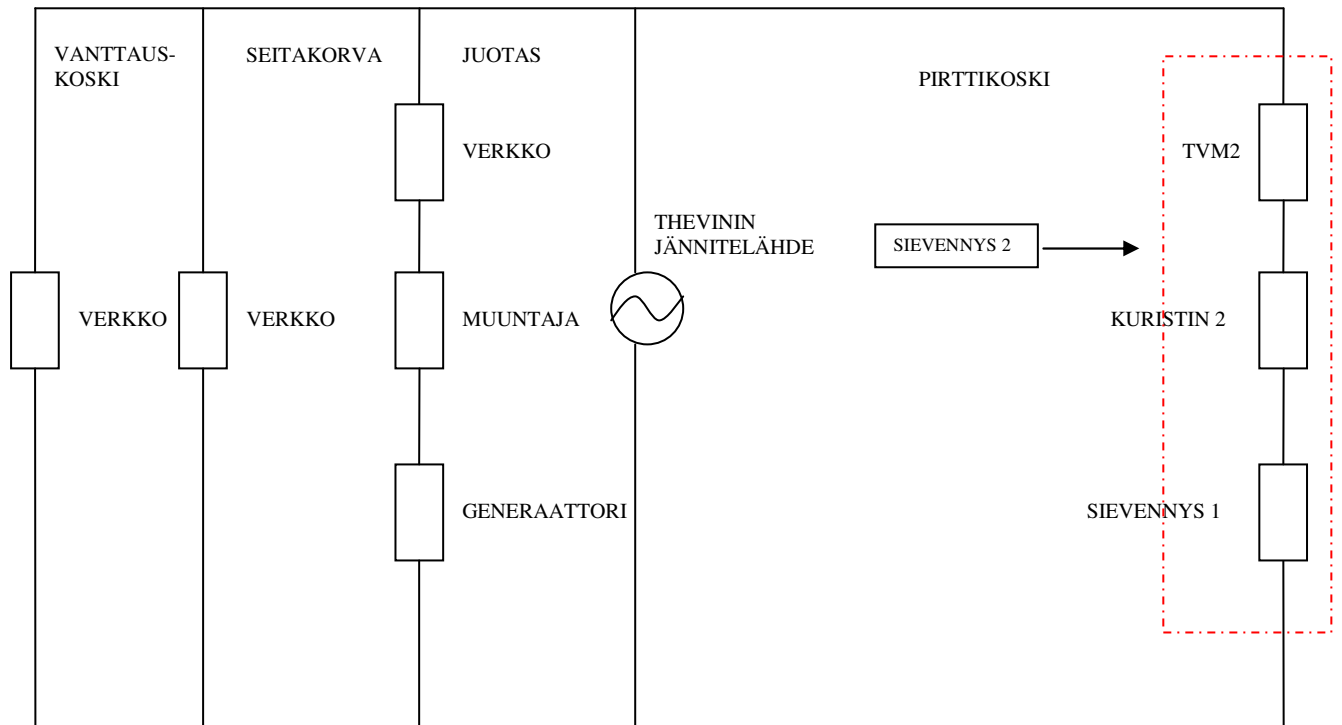
ALUEEN 1 SIEVENNYYS

$$Z''_{S1} := \left[\left[\frac{1}{\left[\left(\frac{1}{Z''_{GEN21KV}} \right) + \left(\frac{1}{R''_a} \right) \right]^{-1} + R''_c} \right] + \left[\frac{1}{\left[\left(\frac{1}{R''_b} \right) + \left(\frac{1}{Z''_{GEN21KV}} \right) \right]^{-1}} \right] \right]^{-1} = (0.012662 + 0.407335j) \Omega$$

$$Z'_{S1} := \left[\left[\frac{1}{\left[\left(\frac{1}{Z'_{GEN21KV}} \right) + \left(\frac{1}{R'_a} \right) \right]^{-1} + R'_c} \right] + \left[\frac{1}{\left[\left(\frac{1}{R'_b} \right) + \left(\frac{1}{Z'_{GEN21KV}} \right) \right]^{-1}} \right] \right]^{-1} = (0.011449 + 0.49094j) \Omega$$

$$Z_{S1} := \left[\left[\frac{1}{\left[\left(\frac{1}{Z_{GEN21KV}} \right) + \left(\frac{1}{R_a} \right) \right]^{-1} + R_c} \right] + \left[\frac{1}{\left[\left(\frac{1}{R_b} \right) + \left(\frac{1}{Z_{GEN21KV}} \right) \right]^{-1}} \right] \right]^{-1} = (0.007187 + 0.620549j) \Omega$$

SIEVENNYS 2



PIRTTIKOSKEN VESIVOIMALAITOKSEN, OIKOSULKUPIIRIIN SISÄLTYVIEN KOMPONENTTIEN MUODOSTAMAT IMPEDANSSIT SIJAISKYTKENNÄSSÄ

Alueen 2 sievennys:

$$Z''_{PK} := Z''_{S1} + Z_{TVM21KV} + Z_{KUR21KV} = (1.340245 + 11.60443j) \Omega$$

$$Z'_{PK} := Z'_{S1} + Z_{TVM21KV} + Z_{KUR21KV} = (1.339032 + 11.688035j) \Omega$$

$$Z_{PK} := Z_{S1} + Z_{TVM21KV} + Z_{KUR21KV} = (1.334769 + 11.817644j) \Omega$$

PIRTTIKOSKEN VESIVOIMALAITOKSEN, OIKOSULKUPIIRIIN SISÄLTYVIEN KOMPONENTTIEN MUODOSTAMAT IMPEDANSSIT SIJAISKYTKENNÄSSÄ, KURISTIMET POISLUKIEN

$$Z''_{PKIK} := Z''_{S1} + Z_{TVM21KV} = (1.286662 + 9.184355j) \Omega$$

$$Z'_{PKIK} := Z'_{S1} + Z_{TVM21KV} = (1.285449 + 9.267961j) \Omega$$

$$Z_{PKIK} := Z_{S1} + Z_{TVM21KV} = (1.281187 + 9.39757j) \Omega$$

PIRTTIKOSKEN VESIVOIMALAITOKSEN TUOTTAMA OIKOSULKUVIRTA
JOHTOLÄHTÖÖN 6.7.0

3-vaiheinen oikosulkuvirta:

Jännitekerroin $c := 1.1$
Verkon jännite oikosulkukohdassa $U_n := 20KV$

$$I''_{PK} := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z''_{PK}|} = 1087.328797A$$

$$I'_{PK} := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z'_{PK}|} = 1079.665001A$$

$$I_{PK} := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{PK}|} = 1068.017819A$$

PIRTTIKOSKEN VESIVOIMALAITOKSEN TUOTTAMA
SYSÄYSOIKOSULKUVIRTA JOHTOLÄHTÖÖN 6.7.0

Sysäyskerroin:

$$x := 1.02 + 0.98e^{\left(\frac{-3 \cdot 1.340245}{11.60443}\right)} = 1.713028$$

Sysäysoikosulkuvirta:

$$i_{sPK} := x \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{PK} = 2634.148441A$$

PIRTTIKOSKEN VESIVOIMALAITOKSEN TUOTTAMA OIKOSULKUVIRTA
JOHTOLÄHTÖÖN 6.7.0, KUN LAITOKSEN OIKOSULKUVIRTAA RAJOITTAVIEN
KURISTIMIEN VAIKUTUSTA EI OLE OTETTU HUOMIOON

3-vaiheinen oikosulkuvirta:

Jännitekerroin $c := 1.1$
Verkon jännite oikosulkukohdassa $U_n := 20KV$

$$I''_{PKIK} := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z''_{PKIK}|} = 1369.597474A$$

$$I'_{PKIK} := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z'_{PKIK}|} = 1357.501274A$$

$$I_{PKIK} := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{PKIK}|} = 1339.206607A$$

PIRTTIKOSKEN VESIVOIMALAITOKSEN TUOTTAMA SYSÄYSOIKOSULKUVIRTA
JOHTOLÄHTÖÖN 6.7.0, KUN LAITOKSEN KURISTIMIEN VAIKUTUSTA EI OLE
OTETTU HUOMIOON

$$x := 1.02 + 0.98e^{\left(\frac{-3 \cdot 1.286662}{9.184355}\right)} = 1.663727$$

$$i_{sPKIK} := x \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{PKIK} = 3222.477669 \text{ A}$$

PIRTTIKOSKEN VESIVOIMALAITOKSEN TUOTTAMA 2-VAIHEINEN
OIKOSULKUVIRTA

TAUSTAVERKKO (KANTAVERKKO)

Pääjännite	$U_n := 400 \text{ kV}$
Jännitekerroin	$c := 1$
Alkuoikosulkuvirta	$I'_k := 14.6 \text{ kA}$
Muutosoikosulkuvirta	$I'_k := 13.7 \text{ kA}$
Jatkuvan tilan oikosulkuvirta	$I_k := 12 \text{ kA}$

$$X''_k := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I''_k} = 15.817816 \Omega$$

$$X'_k := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I'_k} = 16.856942 \Omega$$

$$X_k := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I_k} = 19.245009 \Omega$$

Redusointi 21 kV tasolle:

$$U_{N1} := 410 \text{ kV}$$

$$U_{N2} := 21 \text{ kV}$$

$$X''_{kT21KV} := X''_k \cdot \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}}\right)^2 = 0.041497 \Omega$$

$$X'_{kT21KV} := X'_k \cdot \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}}\right)^2 = 0.044223 \Omega$$

$$X_{kT21KV} := X_k \cdot \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}}\right)^2 = 0.050488 \Omega$$

Taustaverkon impedanssit redusoituna 21 kV tasolle:

$$Z''_{TAUSTA21KV} := X''_{kT21KV}j = 0.041497j\Omega$$

$$Z'_{TAUSTA21KV} := X'_{kT21KV}j = 0.044223j\Omega$$

$$Z_{TAUSTA21KV} := X_{kT21KV}j = 0.050488j\Omega$$

Y-D MUUNNOKSET

$$R_1 := Z_{PM21KV} = (0.002625 + 0.648524j)\Omega$$

$$R_2 := Z_{PM21KV} = (0.002625 + 0.648524j)\Omega$$

$$R_3 := Z''_{TAUSTA21KV} = 0.041497j\Omega$$

$$R''_c := \frac{(R_1 \cdot R_2) + (R_1 \cdot R_3) + (R_2 \cdot R_3)}{R_3} = (0.087286 + 11.432141j)\Omega$$

$$R''_b := \frac{(R_1 \cdot R_2) + (R_1 \cdot R_3) + (R_2 \cdot R_3)}{R_2} = (0.002625 + 0.731518j)\Omega$$

$$R''_a := \frac{(R_1 \cdot R_2) + (R_1 \cdot R_3) + (R_2 \cdot R_3)}{R_1} = (0.002625 + 0.731518j)\Omega$$

$$R_1 := Z_{PM21KV} = (0.002625 + 0.648524j)\Omega$$

$$R_2 := Z_{PM21KV} = (0.002625 + 0.648524j)\Omega$$

$$R_3 := Z'_{TAUSTA21KV} = 0.044223j\Omega$$

$$R'_c := \frac{(R_1 \cdot R_2) + (R_1 \cdot R_3) + (R_2 \cdot R_3)}{R_3} = (0.082229 + 10.807375j)\Omega$$

$$R'_b := \frac{(R_1 \cdot R_2) + (R_1 \cdot R_3) + (R_2 \cdot R_3)}{R_2} = (0.002625 + 0.73697j)\Omega$$

$$R'_a := \frac{(R_1 \cdot R_2) + (R_1 \cdot R_3) + (R_2 \cdot R_3)}{R_1} = (0.002625 + 0.73697j)\Omega$$

$$R_1 := Z_{PM21KV} = (0.002625 + 0.648524j)\Omega$$

$$R_2 := Z_{PM21KV} = (0.002625 + 0.648524j)\Omega$$

$$R_3 := Z_{TAUSTA21KV} = 0.050488j \Omega$$

$$R_c := \frac{(R_1 \cdot R_2) + (R_1 \cdot R_3) + (R_2 \cdot R_3)}{R_3} = (0.072677 + 9.627262j) \Omega$$

$$R_b := \frac{(R_1 \cdot R_2) + (R_1 \cdot R_3) + (R_2 \cdot R_3)}{R_2} = (0.002625 + 0.7495j) \Omega$$

$$R_a := \frac{(R_1 \cdot R_2) + (R_1 \cdot R_3) + (R_2 \cdot R_3)}{R_1} = (0.002625 + 0.7495j) \Omega$$

ALUEEN 1 SIEVENNYS

$$Z''_{S1} := \left[\frac{1}{\left[\left(\frac{1}{Z''_{GEN21KV}} \right) + \left(\frac{1}{R''_a} \right) \right]^{-1} + R''_c} \right] + \left[\frac{1}{\left[\left(\frac{1}{R''_b} \right) + \left(\frac{1}{Z''_{GEN21KV}} \right) \right]^{-1}} \right]^{-1} = (0.012585 + 0.405972j) \Omega$$

$$Z'_{S1} := \left[\frac{1}{\left[\left(\frac{1}{Z'_{GEN21KV}} \right) + \left(\frac{1}{R'_a} \right) \right]^{-1} + R'_c} \right] + \left[\frac{1}{\left[\left(\frac{1}{R'_b} \right) + \left(\frac{1}{Z'_{GEN21KV}} \right) \right]^{-1}} \right]^{-1} = (0.011363 + 0.488824j) \Omega$$

$$Z_{S1} := \left[\frac{1}{\left[\left(\frac{1}{Z_{GEN21KV}} \right) + \left(\frac{1}{R_a} \right) \right]^{-1} + R_c} \right] + \left[\frac{1}{\left[\left(\frac{1}{R_b} \right) + \left(\frac{1}{Z_{GEN21KV}} \right) \right]^{-1}} \right]^{-1} = (0.007122 + 0.616688j) \Omega$$

PIRTTIKOSKEN VESIVOIMALAITOKSEN, OIKOSULKUPIIRIIN SISÄLTYVIEN KOMPONENTTIEN MUODOSTAMAT IMPEDANSSIT SIJAISKYTKENNÄSSÄ

Alueen 2 sievennys:

$$Z''_{PK} := Z''_{S1} + Z_{TVM21KV} + Z_{KUR21KV} = (1.340167 + 11.603067j) \Omega$$

$$Z'_{PK} := Z'_{S1} + Z_{TVM21KV} + Z_{KUR21KV} = (1.338945 + 11.685919j) \Omega$$

$$Z_{PK} := Z_{S1} + Z_{TVM21KV} + Z_{KUR21KV} = (1.334705 + 11.813783j) \Omega$$

PIRTTIKOSKEN VESIVOIMALAITOKSEN, OIKOSULKUPIIRIIN SISÄLTYVIEN KOMPONENTTIEN MUODOSTAMAT IMPEDANSSIT SIJAISKYTKENNÄSSÄ, KURISTIMET POISLUKIEN

$$Z''_{PKIK} := Z''_{S1} + Z_{TVM21KV} = (1.286585 + 9.182992j) \Omega$$

$$Z'_{PKIK} := Z'_{S1} + Z_{TVM21KV} = (1.285363 + 9.265844j) \Omega$$

$$Z_{PKIK} := Z_{S1} + Z_{TVM21KV} = (1.281122 + 9.393708j) \Omega$$

PIRTTIKOSKEN VESIVOIMALAITOKSEN TUOTTAMA 2-VAIHEINEN OIKOSULKUVIRTA

2-vaiheinen oikosulkuvirta:

Jännitekerroin

$$c := 1$$

Verkon jännite oikosulkukohdassa

$$U_n := 20KV$$

$$I''_{2PK} := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z''_{PK}|} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 856.149296A$$

$$I'_{2PK} := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z'_{PK}|} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 850.168433A$$

$$I_{2PK} := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{PK}|} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 841.117857A$$

PIRTTIKOSKEN VESIVOIMALAITOKSEN TUOTTAMA 2-VAIHEINEN OIKOSULKUVIRTA, KUN LAITOKSEN OIKOSULKUVIRTAA RAJOITTAVIEN KURISTIMIEN VAIKUTUSTA EI OLE OTETTU HUOMIOON

2-vaiheinen oikosulkuvirta:

Jännitekerroin

$$c := 1$$

Verkon nimellisjännite

$$U_n := 20KV$$

$$I''_{PK} := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z''_{PKIK}|} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 1078.436566A$$

$$I'_{PK} := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z'_{PKIK}|} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 1068.995988A$$

$$I_{PK} := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{PKIK}|} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 1054.778237A$$

PIRTTIKOSKEN VESIVOIMALAITOKSEN TUOTTAMA 2-VAIHEINEN OIKOSULKUVIRTA JUOTAKSEN VESIVOIMALAITOKSEN PÄÄSSÄ

Pirttikosken ja Juotaksen välisen verkon impedanssi:

$$Z_{kVERKKO} := (2.539 + 3.562j) \text{ohm}$$

Oikosulkuimpedanssit kuristimien kanssa:

$$Z''_{k2} := Z_{kVERKKO} + Z''_{PK} = (3.879167 + 15.165067j) \Omega$$

$$Z'_{k2} := Z_{kVERKKO} + Z'_{PK} = (3.877945 + 15.247919j) \Omega$$

$$Z_{k2} := Z_{kVERKKO} + Z_{PK} = (3.873705 + 15.375783j) \Omega$$

Oikosulkuimpedanssit ilman kuristimia:

$$Z''_{k2IK} := Z_{kVERKKO} + Z''_{PKIK} = (3.825585 + 12.744992j) \Omega$$

$$Z'_{k2IK} := Z_{kVERKKO} + Z'_{PKIK} = (3.824363 + 12.827844j) \Omega$$

$$Z_{k2IK} := Z_{kVERKKO} + Z_{PKIK} = (3.820122 + 12.955708j) \Omega$$

Oikosulkuvirrat:

$$I''_{k2} := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z''_{k2}|} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 638.841115 \text{ A}$$

$$I'_{k2} := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z'_{k2}|} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 635.593602 \text{ A}$$

$$I_{k2} := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{k2}|} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 630.666614 \text{ A}$$

Oikosulkuvirrat ilman laitoksen kuristimien vaikutusta:

$$I''_{k2IK} := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z''_{k2IK}|} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 751.497608 \text{ A}$$

$$I'_{k2IK} := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z'_{k2IK}|} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 747.060976 \text{ A}$$

$$I_{k2IK} := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{k2IK}|} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 740.347404 \text{ A}$$

JUOTAKSEN VESIVOIMALAITOKSEN, OIKOSULKUPIIRIIN SISÄLTYVIEN
KOMPONENTTIEN MALLINTAMINEN NIITÄ VASTAAVILLA IMPEDANSSEILLA

GENERAATTORI

$$x''_d := 0.204$$

$$U_n := 6.3 \text{KV}$$

$$x'_d := 0.25$$

$$S_n := 4.4 \text{MW}$$

$$x_d := 0.8$$

Reaktanssit:

$$X''_d := x''_d \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 1.84 \Omega$$

$$X'_d := x'_d \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 2.255 \Omega$$

$$X_d := x_d \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 7.216 \Omega$$

Resistanssit:

$$R''_G := 0.07 \cdot X''_d = 0.129 \Omega$$

$$R'_G := 0.07 \cdot X'_d = 0.158 \Omega$$

$$R_G := 0.07 \cdot X_d = 0.505 \Omega$$

Redusointi:

$$U_{N1} := 6.3 \text{KV}$$

$$U_{N2} := 21 \text{KV}$$

$$X''_d := X''_d \cdot \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}} \right)^2 = 20.446 \Omega$$

$$X'_d := X'_d \cdot \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}} \right)^2 = 25.057 \Omega$$

$$X_d := X_d \cdot \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}} \right)^2 = 80.182 \Omega$$

$$R''_d := R'_G \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}} \right)^2 = 1.431 \Omega$$

$$R'_d := R'_G \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}} \right)^2 = 1.754 \Omega$$

$$R_d := R_G \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}} \right)^2 = 5.613 \Omega$$

Generaattorin impedanssit:

$$Z''_{kGEN} := R''_d + X''_d i = (1.431 + 20.446i) \Omega$$

$$Z'_{kGEN} := R'_d + X'_d i = (1.754 + 25.057i) \Omega$$

$$Z_{kGEN} := R_d + X_d i = (5.613 + 80.182i) \Omega$$

MUUNTAJA

Nimellisjännite $U_n := 21 \cdot \text{KV}$

Nimellisteho $S_n := 4.5 \text{MW}$

Suhteellinen oikosulkuimpedanssi (%) $u_k := 5.7$

Suhteellinen oikosulkuresistanssi (%) $u_r := 1.3$

$$Z_k := \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 5.586 \Omega$$

$$R_k := \frac{u_r}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 1.274 \Omega$$

$$X_k := \sqrt{(Z_k^2 - R_k^2)} = 5.439 \Omega$$

Muuntajan impedanssi:

$$Z_{k\text{MUUNTAJA}} := R_k + X_{k,i} = (1.274 + 5.439i) \Omega$$

JUOTAKSEN JA PIRTTIKOSKEN VÄLINEN VERKKO

Johdin/kaapeli	Impedanssi/km
Suursavo 106Al/25FE	$Z_{\text{ssv}} := (0.270 + 0.344i)\text{ohm}$
Par 157	$Z_{\text{par}} := (0.236 + 0.344i)\text{ohm}$
Bllt - 157 (AlMgSi 178)	$Z_{\text{bllt}} := (0.203 + 0.335i)\text{ohm}$
Ahxamk-w 3*70+35	$Z_{\text{ahxamk}} := (0.482 + 0.138i)\text{ohm}$

Verkon impedanssi:

$$Z_{k\text{VERKKO}} := Z_{\text{ssv}} \cdot 1.3 + Z_{\text{par}} \cdot 7.3 + Z_{\text{bllt}} \cdot 1.7 + Z_{\text{ahxamk}} \cdot 0.25 = (2.539 + 3.562i) \Omega$$

JUOTAKSEN VESIVOIMALAITOKSEN, OIKOSULKUPIIRIN SISÄLTYVIEN KOMPONENTTIEN MUODOSTAMAT IMPEDANSSIT SIIJAISKYTKENNÄSSÄ

$$Z''_{k\text{JUOTAS}} := (Z''_{k\text{GEN}}) + (Z_{k\text{MUUNTAJA}}) + (Z_{k\text{VERKKO}}) = (5.245 + 29.448i) \Omega$$

$$Z'_{k\text{JUOTAS}} := (Z'_{k\text{GEN}}) + (Z_{k\text{MUUNTAJA}}) + (Z_{k\text{VERKKO}}) = (5.567 + 34.058i) \Omega$$

$$Z_{k\text{JUOTAS}} := (Z_{k\text{GEN}}) + (Z_{k\text{MUUNTAJA}}) + (Z_{k\text{VERKKO}}) = (9.426 + 89.183i) \Omega$$

JUOTAKSEN VESIVOIMALAITOKSEN TUOTTAMA OIKOSULKUVIRTA JOHTOLÄHTÖÖN 6.7.0

- 3-vaiheinen oikosulkuvirta

$$c := 1.1$$

$$U_n := 20\text{KV}$$

$$I''_{k\text{JUOTAS}} := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z''_{k\text{JUOTAS}}|} = 424.651 \text{ A}$$

$$I'_{k\text{JUOTAS}} := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z'_{k\text{JUOTAS}}|} = 368.058 \text{ A}$$

$$I_{\text{kJUOTAS}} := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{\text{kJUOTAS}}|} = 141.634 \text{ A}$$

- 2-vaiheinen oikosulkuvirta
(jännitekerroin 1)

$$I'_{\text{k2JUOTAS}} := \frac{I'_{\text{kJUOTAS}} \cdot \sqrt{3}}{1.1 \cdot 2} = 334.326 \text{ A}$$

$$I_{\text{k2JUOTAS}} := \frac{I_{\text{kJUOTAS}} \cdot \sqrt{3}}{1.1 \cdot 2} = 289.771 \text{ A}$$

$$I_{\text{k2JUOTAS}} := \frac{I_{\text{kJUOTAS}} \cdot \sqrt{3}}{1.1 \cdot 2} = 111.508 \text{ A}$$

SYSÄYSOIKOSULKUVIRTA:

$$x := 1.02 + 0.98e^{\left(\frac{-3 \cdot 5.245}{29.448}\right)} = 1.594$$

$$i_{\text{sJUOTAS}} := x \cdot \sqrt{2} \cdot I'_{\text{k2JUOTAS}} = 957.476 \text{ A}$$

SEITAKORVAN JA PIRTTIKOSKEN VÄLISEN VERKON
MALLINTAMINEN SITÄ VASTAAVILLA IMPEDANSSEILLA

$$I''_k := 0.86\text{KA}$$

$$U_n := 20\text{KV}$$

$$I'_k := 0.8\text{KA}$$

$$c := 1.1$$

$$I_k := 0.74\text{KA}$$

Impedanssit:

$$Z''_k := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I''_k} = 14.769425\Omega$$

$$Z'_k := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I'_k} = 15.877132\Omega$$

$$Z_k := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I_k} = 17.164467\Omega$$

Reaktanssit:

$$X''_k := 0.995 Z''_k = 14.695578\Omega$$

$$X'_k := 0.995 Z'_k = 15.797747\Omega$$

$$X_k := 0.995 Z_k = 17.078645\Omega$$

Resistanssit:

$$R''_k := 0.1 \cdot X''_k = 1.469558\Omega$$

$$R'_k := 0.1 \cdot X'_k = 1.579775\Omega$$

$$R_k := 0.1 \cdot X_k = 1.707865\Omega$$

SEITAKORVAN JA PIRTTIKOSKEN VÄLISEN VERKON
MUODOSTAMAT IMPEDANSSIT SIJAISKYTKENNÄSSÄ

$$Z''_{kSEITAKORVA} := R''_k + X''_k i = (1.469558 + 14.695578i) \Omega$$

$$Z'_{kSEITAKORVA} := R'_k + X'_k i = (1.579775 + 15.797747i) \Omega$$

$$Z_{kSEITAKORVA} := R_k + X_k i = (1.707865 + 17.078645i) \Omega$$

SEITAKORVAN JA PIRTTIKOSKEN VÄLISEN VERKON
TUOTTAMA OIKOSULKUVIRTA JOHTOLÄHTÖÖN 6.7.0

- 3-vaiheinen oikosulkuvirta:

$$c := 1.1 \quad U_n := 20 \text{KV}$$

$$I''_{kSEITAKORVA} := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z''_{kSEITAKORVA}|} = 860.032144 \text{A}$$

$$I'_{kSEITAKORVA} := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z'_{kSEITAKORVA}|} = 800.029902 \text{A}$$

$$I_{kSEITAKORVA} := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{kSEITAKORVA}|} = 740.027659 \text{A}$$

- 2-vaiheinen oikosulkuvirta:

(Jännitekerroin 1)

$$I''_{k2SEITAKORVA} := \frac{I''_{kSEITAKORVA}}{1.1} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 677.099714 \text{A}$$

$$I'_{k2SEITAKORVA} := \frac{I'_{kSEITAKORVA}}{1.1} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 629.860199 \text{A}$$

$$I_{k2SEITAKORVA} := \frac{I_{kSEITAKORVA}}{1.1} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 582.620684 \text{A}$$

SEITAKORVAN JA PIRTTIKOSKEN VÄLISEN VERKON
TUOTTAMA SYÄYSOIKOSULKUVIRTA JOHTOLÄHTÖÖN 6.7.0

$$x := 1.02 + 0.98 \left(\frac{-3 \cdot 1.469558}{14.695578} \right) = 1.746002$$

$$i_{\text{SEITAKORVA}} := x \sqrt{2} \cdot I''_{\text{KSEITAKORVA}} = 2123.60811 \text{ A}$$

VANTTAUSKOSKEN JA PIRTTIKOSKEN VÄLISEN VERKON MALLINTAMINEN SITÄ VASTAAVALLA IMPEDANSSILLA

$$I''_k := 0.634 \text{KA}$$

$$U_n := 20 \text{KV}$$

$$I'_k := 0.634 \text{KA}$$

$$c := 1.1$$

$$I_k := 0.634 \text{KA}$$

Impedanssit:

$$Z''_k := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I''_k} = 20.034 \Omega$$

Reaktanssit:

$$X''_k := 0.995 Z''_k = 19.934 \Omega$$

Resistanssit:

$$R''_k := 0.1 \cdot X''_k = 1.993 \Omega$$

Vanttauskosken impedanssiarvot:

$$Z''_{k\text{VANTTAUSKOSKI}} := R''_k + X''_k i = (1.993 + 19.934j) \Omega$$

$$Z'_{k\text{VANTTAUSKOSKI}} := R'_k + X'_k i = (1.993 + 19.934j) \Omega$$

$$Z_{k\text{VANTTAUSKOSKI}} := R'_k + X'_k i = (1.993 + 19.934j) \Omega$$

VANTTAUSKOSKEN JA PIRTTIKOSKEN VÄLISEN VERKON TUOTTAMA OIKOSULKUVIRTA JOHTOLÄHTÖÖN 6.7.0

- 3-vaiheinen oikosulkuvirta:

$$c := 1.1$$

$$U_n := 20 \text{KV}$$

$$I''_{kVANTTAUSKOSKI} := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z''_{kVANTTAUSKOSKI}|} = 634.024A$$

$$I'_{kVANTTAUSKOSKI} := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z'_{kVANTTAUSKOSKI}|} = 634.024A$$

$$I_{kVANTTAUSKOSKI} := \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{kVANTTAUSKOSKI}|} = 634.024A$$

- 2-vaiheinen oikosulkuvirta:

(Jännitekerroin 1)

$$I''_{k2VANTTAUSKOSKI} := \frac{I''_{kVANTTAUSKOSKI} \cdot \sqrt{3}}{1.1 \cdot 2} = 499.164A$$

$$I'_{k2VANTTAUSKOSKI} := \frac{I'_{kVANTTAUSKOSKI} \cdot \sqrt{3}}{1.1 \cdot 2} = 499.164A$$

$$I_{k2VANTTAUSKOSKI} := \frac{I_{kVANTTAUSKOSKI} \cdot \sqrt{3}}{1.1 \cdot 2} = 499.164A$$

VANTTAUSKOSKEN JA PIRTTIKOSKEN VÄLISEN VERKON
TUOTTAMA SYSÄYSOIKOSULKUVIRTA JOHTOLÄHTÖÖN 6.7.0

$$x := 1.02 + 0.98 \cdot \left(\frac{-3 \cdot 1.993}{19.934} \right) = 1.746$$

$$i_{sVANTTAUSKOSKI} := x \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{kVANTTAUSKOSKI} = 1565.582868A$$

JOHTOLÄHTÖÖN 6.7.0 KOHDISTUVAT TERMISET OIKOSULKUVIRRAT

Pirttikosken vesivoimalaitoksen tuottama oikosulkuvirta johtolähtöön 6.7.0:

$I'_{PK} := 1087A$	Alkuoikosulkuvirta
$I_{PK} := 1067A$	Jatkuvan tilan oikosulkuvirta
$x_{PK} := 1.71303$	Sysäyskerroin

Pirttikosken vesivoimalaitoksen tuottama oikosulkuvirta johtolähtöön 6.7.0, kun laitoksen kuristimien vaikutusta ei oteta huomioon:

$I'_{PKIK} := 1369A$
$I_{PKIK} := 1339A$
$x_{PKIK} := 1.6637$

Seitakorvan ja Pirttikosken välisen verkon tuottama oikosulkuvirta johtolähtöön 6.7.0:

$I'_{SK} := 860A$
$I_{SK} := 740A$
$x_{SK} := 1.74600$

Vanttauskosken ja Pirttikosken välisen verkon tuottama oikosulkuvirta johtolähtöön 6.7.0:

$I'_{VK} := 634A$

PIRTTIKOSKEN VESIVOIMALAITOKSEN TUOTTAMA TERMINEN OIKOSULKUVIRTA JOHTOLÄHTÖÖN 6.7.0

$\frac{I'_{PK}}{I_{PK}} = 1.018744$	Alkuoikosulkuvirran ja jatkuvan tilan oikosulkuvirran suhde
-------------------------------------	---

-katkaisuaika 0,1s

$m := 0.28$	$n := 1$	$m = \text{tasavirtatekijä}$	$n = \text{vaihtovirtatekijä}$
-------------	----------	------------------------------	--------------------------------

$$I_{1sPK0.1s} := I'_{PK} \sqrt{(m+n) \cdot 0.1} = 388.896943A$$

-katkaisuaika 0,2s

$m := 0.14$	$n := 1$
-------------	----------

$$I_{1sPK0.2s} := I'_{PK} \sqrt{(m+n) \cdot 0.2} = 519.035386A$$

-katkaisuaika 0,3s

$m := 0.08$	$n := 0.95$
-------------	-------------

$$I_{1sPK0.3s} := I'_{PK} \sqrt{(m+n) \cdot 0.3} = 615.860089A$$

-katkaisuaika 0,4s

$$m := 0.07 \quad n := 0.98$$

$$I_{1sPK0.4s} := I''_{PK} \cdot \sqrt{(m+n) \cdot 0.4} = 704.456514A$$

-katkaisuaika 0,5s

$$m := 0.06 \quad n := 0.97$$

$$I_{1sPK0.5s} := I''_{PK} \cdot \sqrt{(m+n) \cdot 0.5} = 780.06925A$$

-katkaisuaika 0,6s

$$m := 0.04 \quad n := 0.97$$

$$I_{1sPK0.6s} := I''_{PK} \cdot \sqrt{(m+n) \cdot 0.6} = 846.18604A$$

-katkaisuaika 0,7s

$$m := 0.03 \quad n := 0.97$$

$$I_{1sPK0.7s} := I''_{PK} \cdot \sqrt{(m+n) \cdot 0.7} = 909.449449A$$

-katkaisuaika 0,8s

$$m := 0.02 \quad n := 0.96$$

$$I_{1sPK0.8s} := I''_{PK} \cdot \sqrt{(m+n) \cdot 0.8} = 962.470829A$$

-katkaisuaika 0,9s

$$m := 0.015 \quad n := 0.96$$

$$I_{1sPK0.9s} := I''_{PK} \cdot \sqrt{(m+n) \cdot 0.9} = 1018.246924A$$

-katkaisuaika 1s

$$m := 0.01 \quad n := 0.95$$

$$I_{1sPK1s} := I''_{PK} \cdot \sqrt{(m+n) \cdot 1} = 1065.03814A$$

PIRTTIKOSKEN VESIVOIMALAITOKSEN TUOTTAMA TERMINEN OIKOSULKUVIRTA
JOHTOLÄHTÖÖN 6.7.0, ILMAN LAITOKEN KURISTIMIEN VAIKUTUSTA

$$\frac{I'_{PKIK}}{I_{PKIK}} = 1.022405$$

-katkaisuaika 0,1s

$$m := 0.28 \quad n := 1$$

$$I_{1sPKIK0.1s} := I'_{PKIK} \sqrt{(m+n) \cdot 0.1} = 489.78833A$$

-katkaisuaika 0,2s

$$m := 0.14 \quad n := 1$$

$$I_{1sPKIK0.2s} := I'_{PKIK} \sqrt{(m+n) \cdot 0.2} = 653.688541A$$

-katkaisuaika 0,3s

$$m := 0.08 \quad n := 0.99$$

$$I_{1sPKIK0.3s} := I'_{PKIK} \sqrt{(m+n) \cdot 0.3} = 775.632439A$$

-katkaisuaika 0,4s

$$m := 0.07 \quad n := 0.98$$

$$I_{1sPKIK0.4s} := I'_{PKIK} \sqrt{(m+n) \cdot 0.4} = 887.213402A$$

-katkaisuaika 0,5s

$$m := 0.06 \quad n := 0.97$$

$$I_{1sPKIK0.5s} := I'_{PKIK} \sqrt{(m+n) \cdot 0.5} = 982.442321A$$

-katkaisuaika 0,6s

$$m := 0.04 \quad n := 0.97$$

$$I_{1sPKIK0.6s} := I'_{PKIK} \sqrt{(m+n) \cdot 0.6} = 1065.711765A$$

-katkaisuaika 0,7s

$$m := 0.03 \quad n := 0.97$$

$$I_{1sPKIK0.7s} := I''_{PKIK} \cdot \sqrt{(m+n) \cdot 0.7} = 1145.387576A$$

-katkaisuaika 0,8s

$$m := 0.02 \quad n := 0.96$$

$$I_{1sPKIK0.8s} := I''_{PKIK} \cdot \sqrt{(m+n) \cdot 0.8} = 1212.164273A$$

-katkaisuaika 0,9s

$$m := 0.015 \quad n := 0.96$$

$$I_{1sPKIK0.9s} := I''_{PKIK} \cdot \sqrt{(m+n) \cdot 0.9} = 1282.410339A$$

-katkaisuaika 1s

$$m := 0.01 \quad n := 0.95$$

$$I_{1sPKIK1s} := I''_{PKIK} \cdot \sqrt{(m+n) \cdot 1} = 1341.340583A$$

SEITAKORVAN JA PIRTTIKOSKEN VÄLISEN VERKON TUOTTAMA TERMINEN OIKOSULKUVIRTA JOHTOLÄHTÖÖN 6.7.0

$$\frac{I''_{SK}}{I_{SK}} = 1.162162$$

-katkaisuaika 0,1s

$$m := 0.4 \quad n := 1$$

$$I_{1sSK0.1s} := I''_{SK} \cdot \sqrt{(m+n) \cdot 0.1} = 321.782535A$$

-katkaisuaika 0,2s

$$m := 0.2 \quad n := 0.98$$

$$I_{1sSK0.2s} := I''_{SK} \cdot \sqrt{(m+n) \cdot 0.2} = 417.786548A$$

-katkaisuaika 0,3s

$$m := 0.12 \quad n := 0.97$$

$$I_{1sSK0.3s} := I''_{SK} \cdot \sqrt{(m+n) \cdot 0.3} = 491.781659A$$

-katkaisuaika 0,4s

$$m := 0.1 \quad n := 0.9\epsilon$$

$$I_{1sSK0.4s} := I''_{SK} \cdot \sqrt{(m+n) \cdot 0.4} = 559.991429A$$

-katkaisuaika 0,5s

$$m := 0.0\delta \quad n := 0.9\zeta$$

$$I_{1sSK0.5s} := I''_{SK} \cdot \sqrt{(m+n) \cdot 0.5} = 617.166104A$$

-katkaisuaika 0,6s

$$m := 0.0\epsilon \quad n := 0.9\eta$$

$$I_{1sSK0.6s} := I''_{SK} \cdot \sqrt{(m+n) \cdot 0.6} = 666.153136A$$

-katkaisuaika 0,7s

$$m := 0.0\theta \quad n := 0.9\iota$$

$$I_{1sSK0.7s} := I''_{SK} \cdot \sqrt{(m+n) \cdot 0.7} = 708.652524A$$

-katkaisuaika 0,8s

$$m := 0.0\kappa \quad n := 0.9\kappa$$

$$I_{1sSK0.8s} := I''_{SK} \cdot \sqrt{(m+n) \cdot 0.8} = 749.730618A$$

-katkaisuaika 0,9s

$$m := 0.0\lambda \quad n := 0.9\lambda$$

$$I_{1sSK0.9s} := I''_{SK} \cdot \sqrt{(m+n) \cdot 0.9} = 786.794255A$$

-katkaisuaika 1s

$$m := 0.0\mu \quad n := 0.9\mu$$

$$I_{1sSK1s} := I''_{SK} \cdot \sqrt{(m+n) \cdot 1} = 820.387713A$$

VANTTAUSKOSKEN JA PIRTTIKOSKEN VÄLISEN VERKON TUOTTAMA TERMINEN OIKOSULKUVIRTA JOHTOLÄHTÖÖN 6.7.0

-katkaisuaika 0,1s

$$I_{1sVK0.1s} := I''_{VK} \sqrt{0.1} = 200.488404A$$

-katkaisuaika 0,2s

$$I_{1sVK0.2s} := I''_{VK} \sqrt{0.2} = 283.53342A$$

-katkaisuaika 0,3s

$$I_{1sVK0.3s} := I''_{VK} \sqrt{0.3} = 347.256101A$$

-katkaisuaika 0,4s

$$I_{1sVK0.4s} := I''_{VK} \sqrt{0.4} = 400.976807A$$

-katkaisuaika 0,5s

$$I_{1sVK0.5s} := I''_{VK} \sqrt{0.5} = 448.305699A$$

-katkaisuaika 0,6s

$$I_{1sVK0.6s} := I''_{VK} \sqrt{0.6} = 491.094288A$$

-katkaisuaika 0,7s

$$I_{1sVK0.7s} := I''_{VK} \sqrt{0.7} = 530.442457A$$

-katkaisuaika 0,8s

$$I_{1sVK0.8s} := I''_{VK} \sqrt{0.8} = 567.066839A$$

-katkaisuaika 0,9s

$$I_{1sVK0.9s} := I''_{VK} \sqrt{0.9} = 601.465211A$$

-katkaisuaika 1s

$$I_{1sVK1s} := I''_{VK} \sqrt{1} = 634A$$

JOHTOLÄHTÖÖN 6.7.0 KOHDISTUVA TERMIEN OIKOSULKUVIRTA

-katkaisuaika 0,1s

$$I_{1s} := I_{1sPK0.1s} + I_{1sSK0.1s} + I_{1sVK0.1s} = 911.167882A$$

-katkaisuaika 0,2s

$$I_{1s} := I_{1sPK0.2s} + I_{1sSK0.2s} + I_{1sVK0.2s} = 1220.355354A$$

-katkaisuaika 0,3s

$$I_{1s} := I_{1sPK0.3s} + I_{1sSK0.3s} + I_{1sVK0.3s} = 1454.897849A$$

-katkaisuaika 0,4s

$$I_{1s} := I_{1sPK0.4s} + I_{1sSK0.4s} + I_{1sVK0.4s} = 1665.42475A$$

-katkaisuaika 0,5s

$$I_{1s} := I_{1sPK0.5s} + I_{1sSK0.5s} + I_{1sVK0.5s} = 1845.541053A$$

-katkaisuaika 0,6s

$$I_{1s} := I_{1sPK0.6s} + I_{1sSK0.6s} + I_{1sVK0.6s} = 2003.433464A$$

-katkaisuaika 0,7s

$$I_{1s} := I_{1sPK0.7s} + I_{1sSK0.7s} + I_{1sVK0.7s} = 2148.54443A$$

-katkaisuaika 0,8s

$$I_{1s} := I_{1sPK0.8s} + I_{1sSK0.8s} + I_{1sVK0.8s} = 2279.268286A$$

-katkaisuaika 0,9s

$$I_{1s} := I_{1sPK0.9s} + I_{1sSK0.9s} + I_{1sVK0.9s} = 2406.50639A$$

-katkaisuaika 1s

$$I_{1s} := I_{1sPK1s} + I_{1sSK1s} + I_{1sVK1s} = 2519.425853A$$

JOHTOLÄHTÖÖN 6.7.0 KOHDISTUVA TERMINEN OIKOSULKUVIRTA, ILMAN
PIRTTIKOSKEN VESIVOIMALAITOKSEN KURISTIMIEN VAIKUTUSTA

-katkaisuaika 0,1s

$$I_{1s} := I_{1sPKIK0.1s} + I_{1sSK0.1s} + I_{1sVK0.1s} = 1012.059269A$$

-katkaisuaika 0,2s

$$I_{1s} := I_{1sPKIK0.2s} + I_{1sSK0.2s} + I_{1sVK0.2s} = 1355.008508A$$

-katkaisuaika 0,3s

$$I_{1s} := I_{1sPKIK0.3s} + I_{1sSK0.3s} + I_{1sVK0.3s} = 1614.6702A$$

-katkaisuaika 0,4s

$$I_{1s} := I_{1sPKIK0.4s} + I_{1sSK0.4s} + I_{1sVK0.4s} = 1848.181637A$$

-katkaisuaika 0,5s

$$I_{1s} := I_{1sPKIK0.5s} + I_{1sSK0.5s} + I_{1sVK0.5s} = 2047.914125A$$

-katkaisuaika 0,6s

$$I_{1s} := I_{1sPKIK0.6s} + I_{1sSK0.6s} + I_{1sVK0.6s} = 2222.959189A$$

-katkaisuaika 0,7s

$$I_{1s} := I_{1sPKIK0.7s} + I_{1sSK0.7s} + I_{1sVK0.7s} = 2384.482557A$$

-katkaisuaika 0,8s

$$I_{1s} := I_{1sPKIK0.8s} + I_{1sSK0.8s} + I_{1sVK0.8s} = 2528.96173A$$

-katkaisuaika 0,9s

$$I_{1s} := I_{1sPKIK0.9s} + I_{1sSK0.9s} + I_{1sVK0.9s} = 2670.669805A$$

-katkaisuaika 1s

$$I_{1s} := I_{1sPKIK1s} + I_{1sSK1s} + I_{1sVK1s} = 2795.728296A$$

KÄÄNTEISAIKAKÄYRÄN LAUKAISUAIKA

Käyrätyyppi:

Normal inverse

Käyräkohtaiset vakiot:

$$\alpha := 0.02$$

$$\beta := 0.14$$

Virta-asettelu (A):

$$I_1 := 150$$

Aikakerroin:

$$k := 0.2$$

Laukaisuaika (sekunneissa) vikavirta-arvolla:

- 150,1A

$$t := \frac{k \cdot \beta}{\left(\frac{151.1}{I_1}\right)^\alpha - 1} = 191.594$$

- 200A

$$t := \frac{k \cdot \beta}{\left(\frac{200}{I_1}\right)^\alpha - 1} = 4.852$$

- 350A

$$t := \frac{k \cdot \beta}{\left(\frac{350}{I_1}\right)^\alpha - 1} = 1.638$$

- 500A

$$t := \frac{k \cdot \beta}{\left(\frac{500}{I_1}\right)^\alpha - 1} = 1.149$$

- 750A

$$t := \frac{k \cdot \beta}{\left(\frac{750}{I_1}\right)^\alpha - 1} = 0.856$$

- 1000A

$$t := \frac{k \cdot \beta}{\left(\frac{1000}{I_1}\right)^\alpha - 1} = 0.724$$

MAASULKUVIRRAT

Pirttikosken ja Juotaksen välinen verkko:

Verkko kostuu 10,3 km avojohtoverkosta sekä 300m kaapelista. Kaapeli on tyypiltään AHXAMK-W 3*70. Kaapelin tuottama maasulkuvirta on 2A/km.

$$U_n := 20 \quad \text{Verkon nimellisjännite/kV}$$

$$l := 10.3 \quad \text{Verkon pituus/km}$$

Avojohtoverkon maasulkuvirta:

$$I_{e1} := \frac{U_n \cdot l}{300} = 0.686667$$

Kaapelin maasulkuvirta 2 A/km:

$$I_{e2} := 0.2552 = 0.51$$

Yhteensä:

$$I_e := I_{e1} + I_{e2} = 1.196667$$

Vaihekapasitanssi C0:

$$C_{0J} := \frac{I_e}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 20000} = 1.099595 \times 10^{-7}$$

Pirttikoski - Seitakorva

Verkko kostuu 13 km avojohtoverkosta sekä 600m kaapelista. Kaapeli on tyypiltään AHXAMK-W 3*95. Kaapelin tuottama maasulkuvirta on 2,3A/km.

$$l := 13.0 \quad \text{Verkon pituus/km}$$

Avojohtoverkon maasulkuvirta:

$$I_{e1} := \frac{U_n \cdot l}{300} = 0.866667$$

Kaapelin maasulkuvirta 2,3 A/km

$$I_{e2} := 0.6 \cdot 2.3 = 1.38$$

Yhteensä:

$$I_e := I_{e1} + I_{e2} = 2.246667$$

Vaihekapasitanssi C₀:

$$C_{0S} := \frac{I_e}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 20000} = 2.06442 \times 10^{-7}$$

Pirttikoski-Korjaamo:

Verkko kostuu 500m kaapelista. Kaapeli on tyyppiä AHXAMK-W 3*95.
Kaapeli tuottama maasulkuvirta on 2,3A/km.

Kaapelin maasulkuvirta 2,3 A/km

$$I_e := 0.5 \cdot 2.3 = 1.15$$

Vaihekapasitanssi C₀:

$$C_{0K} := \frac{I_e}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 20000} = 1.056714 \times 10^{-7}$$

Maasulkuvirta eri vikaresistanssin arvoilla:

Seuraavat maasulkuarvot on laskettu huomioon ottaen verkon kytkentätilanne siten, että Pirttikosken ja Vanttauskosken yhteys in auki. Arvot ovat virta-arvoja, jotka näkyvät Juotaksen johtolähdön (6.7.0) nollavirtamittauksessa, kun maasulku sattuu kyseiselle lähdölle.

Seitakorvan ja korjaamon verkkojen yhteenlaskettu vaihekapasitanssi:

$$C_0 := C_{0S} + C_{0K} = 3.121134 \times 10^{-7}$$

Vaihejännite:

$$U_V := \frac{20000}{\sqrt{3}} = 1.154701 \times 10^4$$

- R_f = 0 Ω

$$I_{eo} := \frac{3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50) \cdot C_0}{\sqrt{1 + [3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50) \cdot C_0]^2}} \cdot U_V = 3.396667$$

- Rf = 500 Ω

$$I_{ef500} := \frac{3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50) \cdot C_0}{\sqrt{1 + [3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50) \cdot C_0 \cdot 500]^2}} \cdot U_v = 3.360513$$

- Rf = 1000 Ω

$$I_{ef1000} := \frac{3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50) \cdot C_0}{\sqrt{1 + [3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50) \cdot C_0 \cdot 1000]^2}} \cdot U_v = 3.258607$$

- Rf = 2000 Ω

$$I_{ef2000} := \frac{3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50) \cdot C_0}{\sqrt{1 + [3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50) \cdot C_0 \cdot 2000]^2}} \cdot U_v = 2.927595$$

- Rf = 5000 Ω

$$I_{ef5000} := \frac{3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50) \cdot C_0}{\sqrt{1 + [3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50) \cdot C_0 \cdot 5000]^2}} \cdot U_v = 1.909792$$

- Rf = 10000 Ω

$$I_{ef10000} := \frac{3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50) \cdot C_0}{\sqrt{1 + [3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50) \cdot C_0 \cdot 10000]^2}} \cdot U_v = 1.093255$$

Pirttikoski - Vanttauskoski

Verkon on arvioitu vastaavan noin 50 km avojohtoverkkoa.

$$U_n := 20$$

$$l := 50 \quad (\text{Pituus arvioitu n. 50 km})$$

Avojohtoverkon maasulkuvirta:

$$I_e := \frac{U_n \cdot l}{300} = 3.333333$$

Vaihekapasitanssi C0:

$$C_{0V} := \frac{I_e}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 20000} = 3.062938 \times 10^{-7}$$

NOLLAJÄNNITE

Nollajännite, kun kaikki lähdöt kytkettynä eri vikaresistanssin arvoilla:

- $R_f = 0 \Omega$

$$U_0 := \frac{1}{\sqrt{1 + [3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (C_{0J} + C_{0S} + C_{0V} + C_{0K}) \cdot 0]^2}} \cdot U_V = 1.154701 \times 10^4$$

- $R_f = 500 \Omega$

$$U_{0500} := \frac{1}{\sqrt{1 + [3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (C_{0J} + C_{0S} + C_{0V} + C_{0K}) \cdot 500]^2}} \cdot U_V = 1.092158 \times 10^4$$

- $R_f = 1000 \Omega$

$$U_{01000} := \frac{1}{\sqrt{1 + [3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (C_{0J} + C_{0S} + C_{0V} + C_{0K}) \cdot 1000]^2}} \cdot U_V = 9.519794 \times 10^3$$

- $R_f = 2000 \Omega$

$$U_{02000} := \frac{1}{\sqrt{1 + [3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (C_{0J} + C_{0S} + C_{0V} + C_{0K}) \cdot 2000]^2}} \cdot U_V = 6.798285 \times 10^3$$

- $R_f = 3000 \Omega$

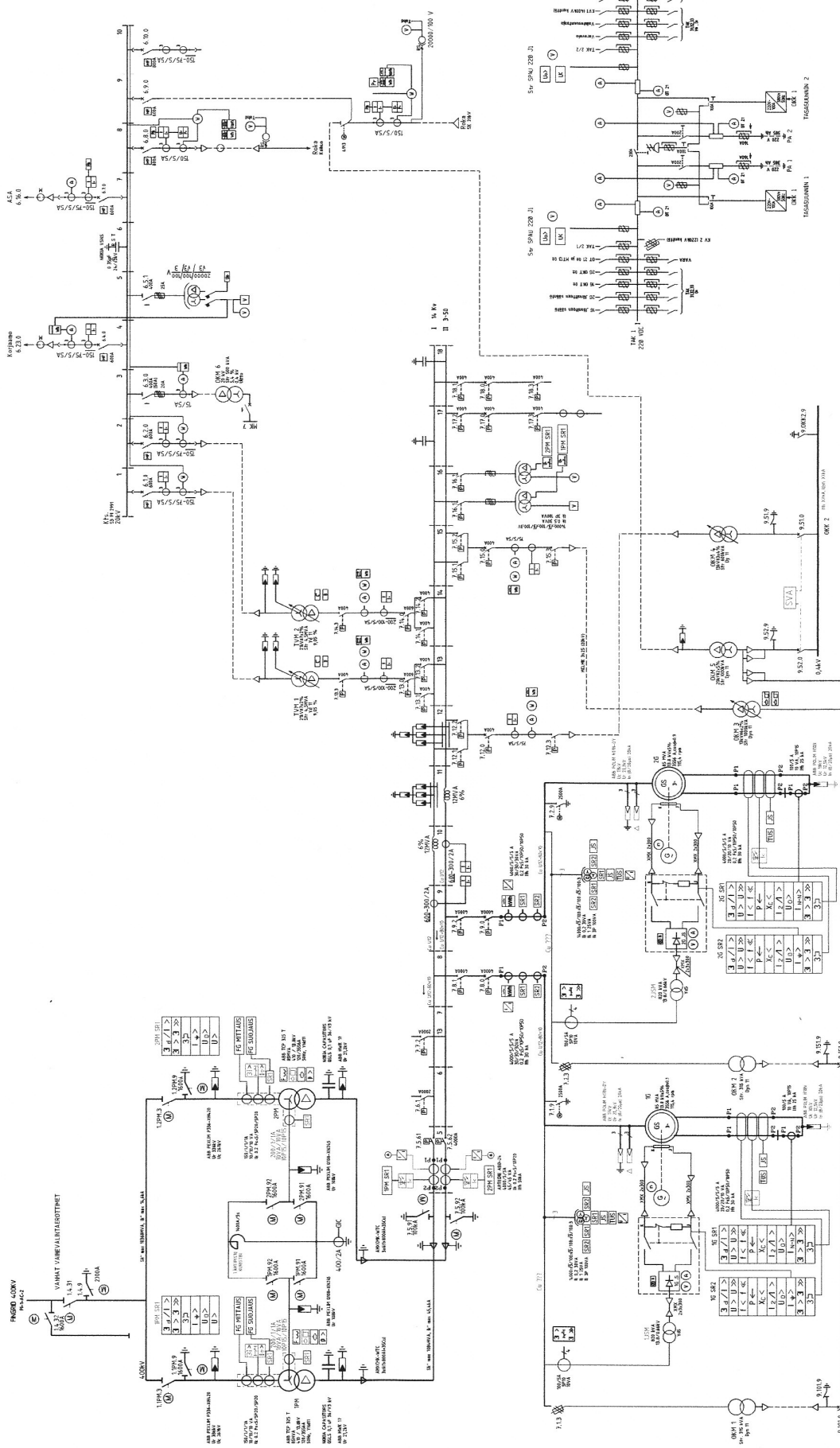
$$U_{03000} := \frac{1}{\sqrt{1 + [3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (C_{0J} + C_{0S} + C_{0V} + C_{0K}) \cdot 3000]^2}} \cdot U_V = 5.043773 \times 10^3$$

- $R_f = 5000 \Omega$

$$U_{05000} := \frac{1}{\sqrt{1 + [3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (C_{0J} + C_{0S} + C_{0V} + C_{0K}) \cdot 5000]^2}} \cdot U_V = 3.229883 \times 10^3$$

- $R_f = 10000 \Omega$

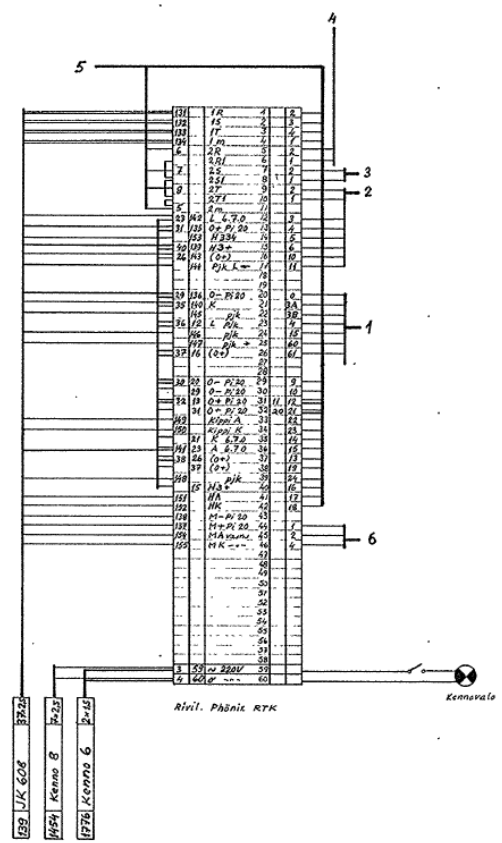
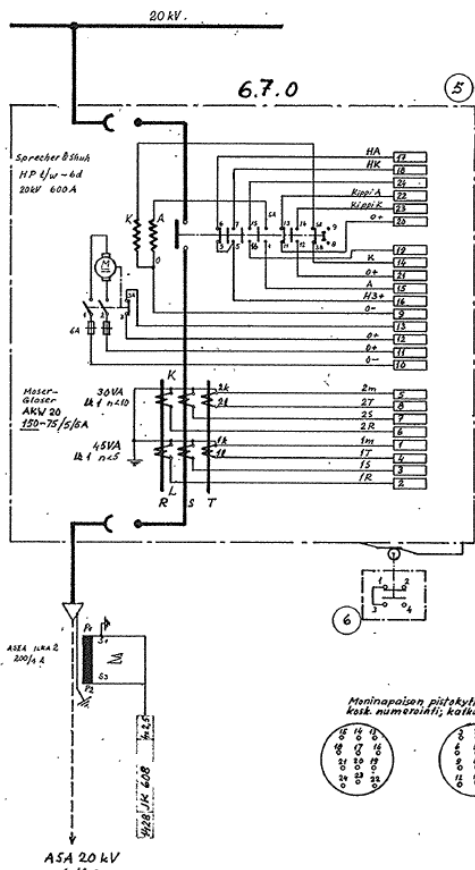
$$U_{010000} := \frac{1}{\sqrt{1 + [3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (C_{0J} + C_{0S} + C_{0V} + C_{0K}) \cdot 10000]^2}} \cdot U_V = 1.664517 \times 10^3$$



RI 712005 SÄSKÖNKA
 OI 562009 SÄSKÖNKA
 PIRRETTY LUBESTÄÄN 26.11.2007 VTY

PAKKAANO 2008
 OI 562009 SÄSKÖNKA

Yhteystiedot	SAHRO	PAKKAANO	Yhteystiedot
Yhteystiedot	SAHRO	PAKKAANO	Yhteystiedot
Yhteystiedot	SAHRO	PAKKAANO	Yhteystiedot
Yhteystiedot	SAHRO	PAKKAANO	Yhteystiedot



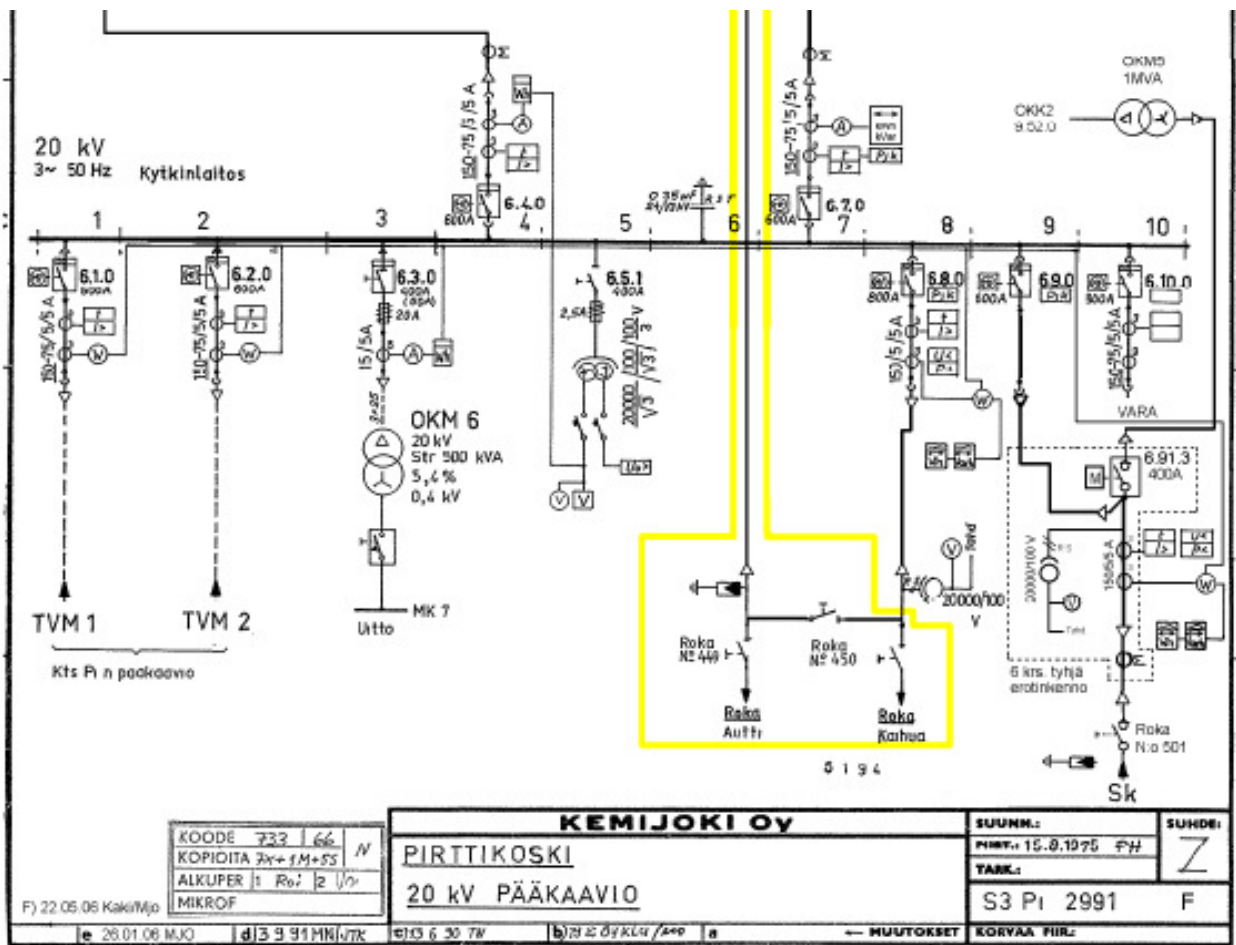
5194

KOODI	733	166	P
KOPIOITA	8		
AKKUPER	1	Roi	2. V ₀
MIKROF.			

PIRTTIKOSKI
Kytkinlaitoksen 20 kV:n keskus.
Kennon 7 johdotus

KEMIJOKI Oy	
SUUNN.	
PIIRT.	2/9.71 VT
S2 Pi 2807 D	

1:200-20:2010101



KOODE	732	66	N
KOPIOITA	3x	1M+5S	
ALKUPER	1	Ro:	2 V
MIKROF			

KEMIJOKI OY	
PIRTTIKOSKI	
20 kV PÄÄKAAVIO	

SUUNN:	SUUNN:	SUUNN:
PIIRI: 15.8.1975 FH		Z
TARK:		
S3 P1 2991		F

F) 22.05.06 Kakkimjo

e 28.01.06 MJO

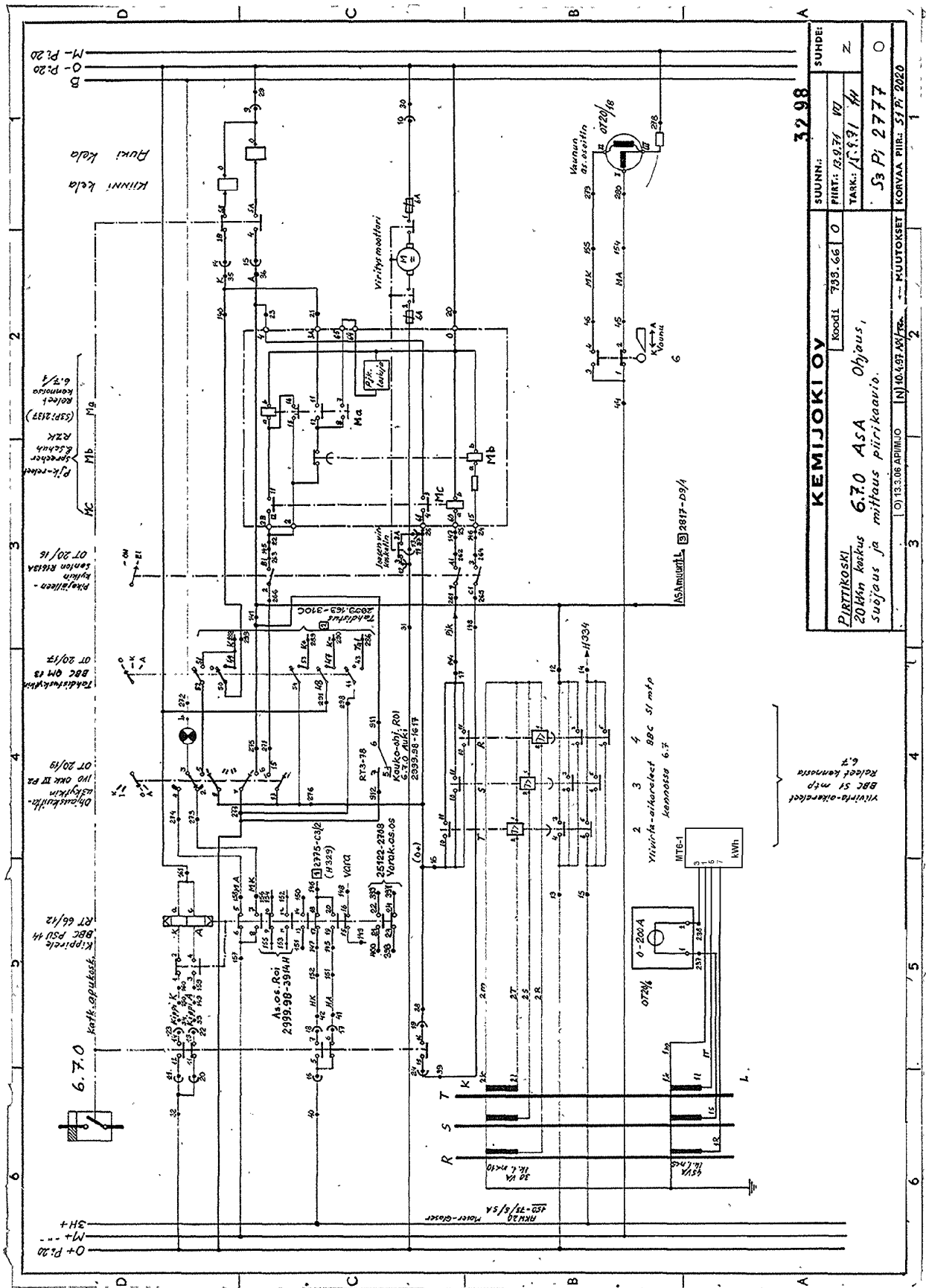
d 13 9 91 MN / JK

© 13 6 30 TK

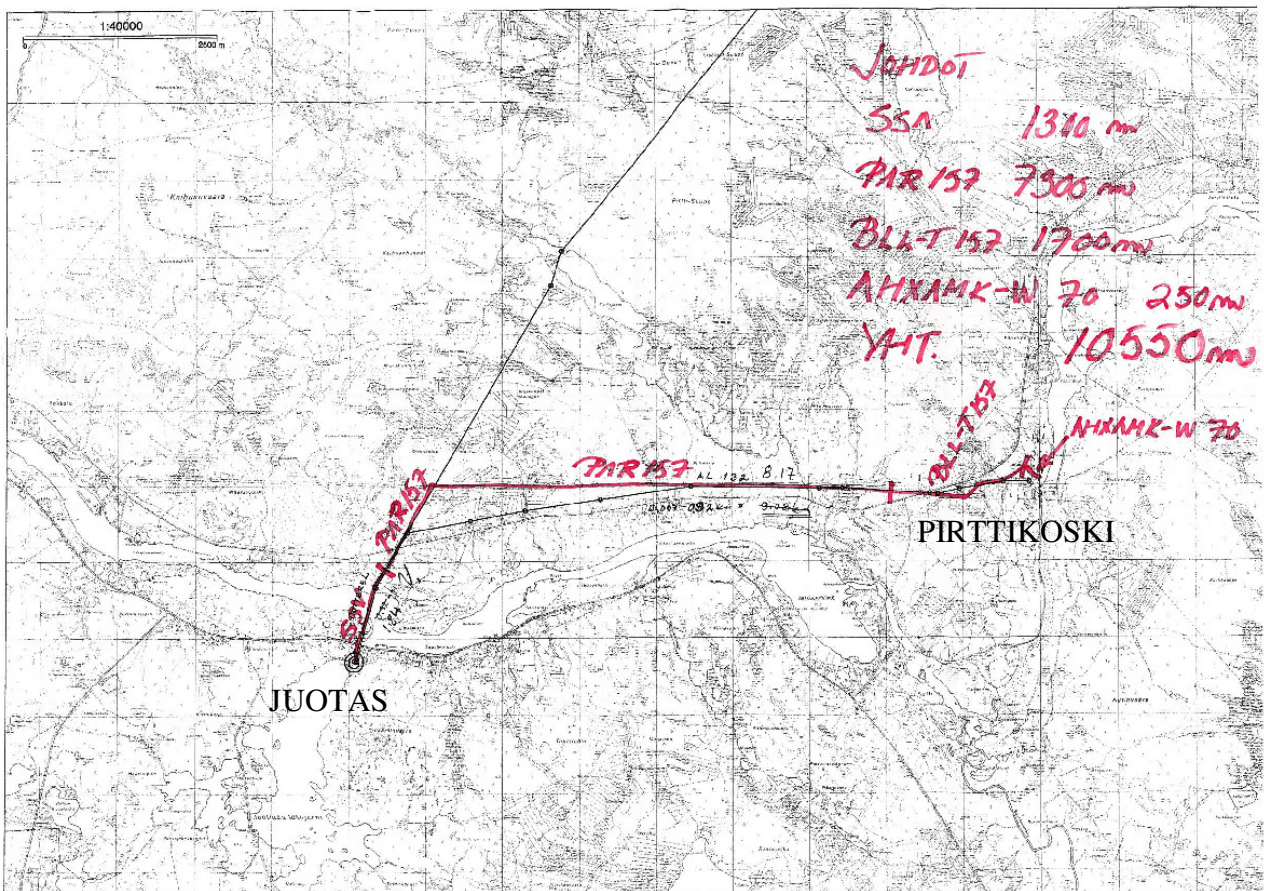
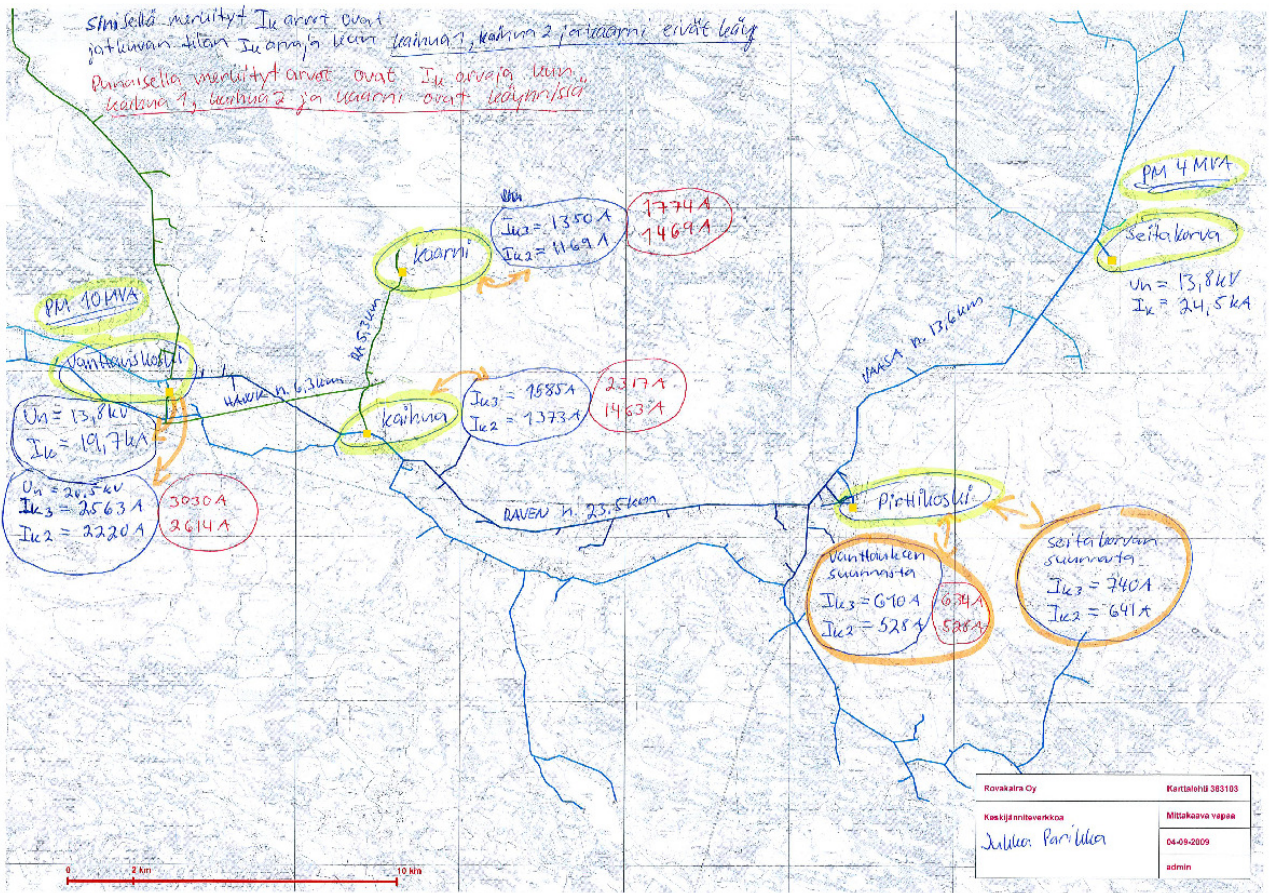
b) 22 20 KKK / 400

--- MUUTOKSET

KORVAA VIIR:



KEMIJOKI OY			SUUNN:	32 98
Koodi: 793.66			PIIRI:	B.9.71 / 97
Pirttikoski 67.0 Asa Oyhan, suojaus ja mittaus piirikaavio.			TARK:	J.9.31 / 97
N:o 10.497-XX/97			KORVAUS:	53 Pi 2777 O
OJ 13.3.00 APILUO			--- MUUTOKSET	KORVAUS PIIRI: 53 Pi 2020



Taulukko 3. Kaapeleiden ja varusteiden dynaamisia kestoisuuksia.

Kaapelityyppi	Kaapeli ilmassa	Kaapeli maassa hiekan tuke- mana	Ulkopääte	Sisäpääte	Ulkopääte + oikosulkutuki XVXT 1001	Sisäpääte + oikosulkutuki XVXT 1001	Jatkos ilmassa	Jatkos maassa hiekan tuke- mana
AHXCMMK-WTC 10 kV			XVKUP 39 + lisätarvikkeet 50...63 63	XVKP 39 + lisätarvikkeet 50...63 63	XVKUP 39 + lisätarvikkeet 80...100 100...125	XVKP 39 + lisätarvikkeet 80...100 100...125	XVRW 49 + lisätarvikkeet 50 50	XVRW 49 + lisätarvikkeet 100 100...125
3 x 70...120 mm ² 3 x 185...300 mm ²	75...89 100...114	100 100...125						
AHXCMMK-WTC 20 kV			XVKUP 49 + lisätarvikkeet 50...63 63	XVKP 49 + lisätarvikkeet 50...63 63	XVKUP 49 + lisätarvikkeet 80...100 100...125	XVKP 49 + lisätarvikkeet 80...100 100...125	XVRW 49 + lisätarvikkeet 50 50	XVRW 49 + lisätarvikkeet 100 125
3 x 70...120 mm ² 3 x 150...300 mm ²	93...104 108...125	105 125						
AHXAMK-W 10 kV			XVKUP 39 + XVKWM 10... 63	XVKP 39 + XVKWM 10... 63	XVKUP 39 + XVKWM 10... 100...125	XVKP 39 + XVKWM 10... 100...125	XVRW 49 + XVRO 100 50	XVRW 49 + XVRO 100 100...125
3 x 120...300 mm ²	34...59	100...125						
AHXAMK-W 20 kV			XVKUP 49 + XVKWM 10... 50...63 63	XVKP 49 + XVKWM 10... 50...63 63	XVKUP 49 + XVKWM 10... 80...100 100...125	XVKP 49 + XVKWM 10... 80...100 100...125	XVRW 49 + XVRO 100 50 50	XVRW 49 + XVRO 100 100 100...125
3 x 70...120 mm ² 3 x 150...240 mm ²	33...42 44...57	100 100...125						
AHXCMMK(-WTC) 10 kV			XVKUP 39 125	XVKP 39 125				
3 x 1 x 800 mm ²	Ks. kuva 8							
AHXCMMK(-WTC) 20 kV			XVKUP 49 125	XVKP 49 125				
3 x 1 x 300...800 mm ²	Ks. kuva 8							
AHXCMMK 10 ja 20 kV /3/			XVKUP 39/49 63 63	XVKP 39/49 63 63	XVKUP 39/49 100 125	XVKP 39/49 100 125	XVRW 49 80 100	XVRW 49 125 125
3 x 70...120 mm ² 3 x 150...300 mm ²	100 125	125 125						
APAKM 10 kV /3/			XVC 33 50 63	XVB 33 50 50			XVN 33 40 40	XVN 33 40 40
3 x 35...95 mm ² 3 x 120...185 mm ²	50 63	50 63						
APYAKMM 10 ja 20 kV /3/			XVCA 39 XVCA 49 50 63	XVB 39 XVB 49 50 63	XVCA 39 XVCA 49 125 125	XVB 39 XVB 49 100 100	XVN 39 XVVK 49 63 63	XVN 39 XVVK 49 125 125
3 x 70...120 mm ² 3 x 150...300 mm ²	100 125	125 125						

3-johtiminen AHXAMK-W 20 kV

Alumiinijohtiminen, PEX-eristeinen 20 kV vesitiivis Wiski™-maakaapeli

OMINAISUUDET

Tuotteen nimi	AHXAMK-W 3x70Al+35Cu 20 kV	AHXAMK-W 3x95Al+35Cu 20 kV	AHXAMK-W 3x120Al+35Cu 20 kV	AHXAMK-W 3x150Al+35Cu 20 kV	AHXAMK-W 3x185Al+35Cu 20 kV	AHXAMK-W 3x240Al+70Cu 20 kV	AHXAMK-W 3x300Al+35Cu 20 kV		
Sähkönnumero	06 242 51	06 242 52	06 242 53	06 242 54	06 242 55	06 242 56	06 242 59		
Tullikoodi	85 44 60 90								
RAKENNETIETOJA									
Johtimen halkaisija (1)	mm	9,6	11,3	12,7	14,1	15,7	18,1	20,3	
Vaihejohtimen halkaisija (1)	mm	30	33	34	35	37	40	43	
Kaapelin ulkohalkaisija (ympäri piirretyn ympyrän halkaisija) (1)	mm	66	71	74	76	80	89	91	
Massa (1)									
alumiini	kg/km	690	910	1100	1350	1650	2200	2700	
kupari	kg/km	305	305	305	305	305	600	305	
kaapeli	kg/km	2650	3100	3450	3800	4300	5500	5950	
TOIMITUSTIETOJA									
Vakiotuotuspituus	m	500	500	500	500	500	500	500	
Toimituskela		K24	K26	K26	K26	K26	K28	K28	
Massa (1)	kaapeli+kela	kg	1775	2450	2625	2800	3050	3930	4155
MEKAANISIA ARVOJA (3)									
Pienin sallittu taipuvuusäde asennusvedossa vaihe kaapeli	m	0,45	0,50	0,51	0,53	0,56	0,60	0,65	
	m	0,53	0,57	0,60	0,61	0,64	0,71	0,73	
Pienin sallittu taipuvuusäde lopullisessa asennuksessa (4) vaihe kaapeli	m	0,32	0,35	0,36	0,37	0,39	0,42	0,46	
	m	0,37	0,40	0,42	0,43	0,45	0,50	0,51	
Suurin sallittu asennusvetovoima vetosukalla	kN	3,2	4,3	5,4	6,8	8,3	8,5	8,5	
Suurin sallittu asennusvetovoima vetopäällä	kN	10,5	14,3	18,0	20,0	20,0	20,0	20,0	
SÄHKÖISIÄ ARVOJA (3)									
Vaihejohtimen vaihtovirtaresistanssi johdin 20 °C	Ω/km	0,443	0,320	0,253	0,206	0,164	0,125	0,100	
Vaihejohtimen vaihtovirtaresistanssi (1)(2) johdin 65 °C	Ω/km	0,53	0,38	0,30	0,25	0,20	0,15	0,12	
	Ω/km	0,57	0,41	0,33	0,27	0,21	0,16	0,13	
Keskusköyden maks. tasavirtaresistanssi keskusköysi 20 °C	Ω/km	0,524	0,524	0,524	0,524	0,524	0,268	0,524	
Induktanssi vaihetta kohti (1)	mH/km	0,42	0,40	0,39	0,37	0,36	0,35	0,34	
Käyttökapasitanssi (1)	μF/km	0,19	0,21	0,23	0,24	0,26	0,30	0,32	
Varausvirta (1)	A/km	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	
Maasulkuvirta (1)	A/km	2,0	2,3	2,5	2,6	2,9	3,2	3,5	
KUORMITETTAVUUS (3)									
Maassa (2) johdin 65 °C	A	200	235	265	300	330	385	435	
Ilmassa (2) johdin 65 °C	A	190	230	265	300	345	400	460	
	A	235	280	325	370	425	510	565	
TERMINEN OIKOSULKUKESTOISUUS (3)									
Suurin sallittu 1 sekunnin oikosulkuvirta vaihejohdin (5)	KA	6,6	8,9	11,3	14,1	17,4	22,6	28,3	
kosketussuojat (6)	KA	2,3	2,5	2,6	2,8	2,9	4,3	4,5	
keskusköysi (7)	KA	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	9,7	5,0	

(1) Likiarvo

(2) Kosketussuojat kytketty yhteen yhteyden molemmissa päissä.

(3) Katso taulukkoarvojen lähtöoletukset kappaleesta Yleistä tuotetietoa.

(4) Taipuvuus on tehtävä varovaisena ja tasaisena kertataiputuksena.

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

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

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



Sweden, ACSR

Characteristics of aluminium conductors steel reinforced used in Sweden

Code	Old Code	Areas		No. of wires		Wire Diameter		Diameter		Mass per unit length			Rated Strength kN	DC Resistance Ω/km	
		Al mm^2	Steel mm^2	Total mm^2	Al	Steel	Al mm	Steel mm	Core mm	Cond. mm	Al kg/km	Steel kg/km			Total kg/km
54-AL1/9-ST1A	62 Raven	53,5	8,92	62,4	6	1	3,37	3,37	3,37	10,1	146,6	69,5	216,1	18,64	0,5355
85-AL1/14-ST1A	99 Pigeon	85,1	14,2	99,3	6	1	4,25	4,25	4,25	12,8	110,5	343,6	343,6	29,22	0,3367
135-AL1/22-ST1A	157 Partridge	134,9	22,0	156,9	26	7	2,57	2,00	6,00	16,3	372,4	172,1	544,5	48,66	0,2141
201-AL1/33-ST1A	234 Ibis	201,3	32,7	234,1	26	7	3,14	2,44	7,32	19,9	656,4	255,7	812,1	70,53	0,1434
283-AL146-ST1A	329 Dove	282,6	45,9	328,5	26	7	3,72	2,89	8,67	23,6	780,6	359,0	1139,6	97,56	0,1022
402-AL1/52-ST1A	454 Condor	402,3	52,2	454,5	54	7	3,08	3,08	9,24	27,7	1112,3	408,2	1520,5	123,75	0,0719
525-AL1/68-ST1A	593 Curlew	525,5	68,1	593,6	54	7	3,52	3,52	10,6	31,7	1453,3	532,7	1986,0	159,01	0,0550
685-AL1/89-ST1A	774 Skata	685,4	88,8	774,2	54	7	4,02	4,02	12,1	36,2	1895,7	694,5	2590,2	207,39	0,0422
806-AL1/102-ST1A	910 Falcon	806,2	102,4	908,7	54	19	4,36	2,62	13,1	39,3	2228,6	803,1	3031,7	245,77	0,0358
563-AL1/29-ST1A	593Morkulla	562,7	29,3	592,0	42	7	4,13	2,31	6,93	31,7	1554,5	229,2	1783,7	123,47	0,0313
735-AL1/38-ST1A	774 Ripa	734,9	38,0	772,9	42	7	4,72	2,63	7,89	36,2	2030,3	297,2	2327,5	160,93	0,0393
865-AL1/44-ST1A	910 Orre	864,7	44,0	908,8	42	7	5,12	2,83	8,49	39,2	2388,9	344,2	2733,1	188,55	0,0334
89-AL1/52-ST1A	142 Dottrel	89,4	52,2	141,6	12	7	3,08	3,08	9,24	15,4	246,6	408,2	654,8	72,12	0,3230
117-AL1/68-ST1A	185 Oden	116,8	68,1	184,9	12	7	3,52	3,52	10,6	17,6	322,6	532,6	855,2	93,62	0,2473
152-AL1/89-ST1A	241 Atle	152,3	88,8	241,2	12	7	4,02	4,02	12,1	20,1	420,8	694,6	1115,4	122,10	0,1896
251-AL1/65-ST1A	319 Ymer	251,0	64,7	315,6	32	7	3,16	3,43	10,3	22,9	694,0	505,8	1199,8	112,56	0,1152

0 KV JA 20 KV ILMAJOHTOJEN JOHTOTIETOJA

1)

10 KV JA 20 KV ILMAJOHTOJEN JOHTOTIETOJA

1(2)

Johdin	Vaiheresistanssi (DC)		Vaihe-reaktanssi Xv Ω/ km 3)	Maakapasitanssi Cm μF/km 4)	Käyttökapasitanssi Ck μF/km 3)	Suurin sallittu kuormitusvirta In A 5)	Suurin sallittu 1 s oikosulkuvirta		Jäähymisaikavakio τ min
	Rv Ω/ km						Ik kA	Ik kA	
	+20 °C 1)	+40 °C 2)							
Cu 16	1,14	1,23	0,412	0,0061	0,0088	145	2,2	2,3	3
Cu 25	0,718	0,774	0,398	0,0061	0,0092	195	3,5	3,7	4
Cu 35	0,526	0,567	0,387	0,0061	0,0094	240	4,8	5,1	5
Cu 50	0,365	0,394	0,377	0,0061	0,0097	305	6,9	7,3	7
Cu 70	0,266	0,287	0,365	0,0061	0,010	370	9,5	10,1	9
Cu 95	0,195	0,210	0,355	0,0061	0,010	465	13,1	13,8	11
Cu 120	0,150	0,162	0,348	0,0061	0,011	535	17,1	18	13
Al 25	1,16	1,25	0,397	0,0061	0,0092	170	2,1	-	3
Al 40	0,725	0,783	0,382	0,0061	0,0095	230	3,5	-	4
Al 62	0,459	0,496	0,368	0,0061	0,0099	305	5,6	-	6
Al 99	0,288	0,311	0,354	0,0061	0,010	415	8,7	-	8
Al 132	0,218	0,236	0,344	0,0061	0,011	495	11,6	-	10
Al 178	0,162	0,175	0,335	0,0061	0,011	600	15,6	-	13
Al 201	0,143	0,155	0,331	0,0061	0,011	645	17,7	-	15
AlMgSi 25	1,37	1,48	0,397	0,0061	0,0092	155	2,5	-	3
AlMgSi 40	0,834	0,901	0,382	0,0061	0,0095	210	3,5	3,7	4
AlMgSi 62	0,527	0,569	0,368	0,0061	0,0099	285	5,5	5,8	6
AlMgSi 99	0,332	0,359	0,354	0,0061	0,010	390	8,8	9,3	8
AlMgSi 132	0,251	0,271	0,344	0,0061	0,011	460	11,7	12,4	10
AlMgSi 178	0,188	0,203	0,335	0,0061	0,011	560	15,8	16,7	13
AlMgSi/Fe 21/4 Fersema	1,56	1,68	0,398	0,0061	0,0092	145	1,9	2	3
AlMgSi/Fe 106/25	0,317	0,343	0,344	0,0061	0,011	400	9,4	9,9	10
Al/Fe 7/9 Bantam	4,31	4,66	0,413	0,0061	0,0088	80	0,6	0,7	2
Al 11/14 Magpic	2,71	2,93	0,397	0,0061	0,0092	110	1,1	1,2	3
Al/Fe 21/4 Swan	1,35	1,46	0,398	0,0061	0,0092	155	2	2,1	3
Al/Fe 34/6 Sparrow	0,847	0,915	0,383	0,0061	0,0095	210	3,2	3,3	4
Al/Fe 42/25 Savo	0,682	0,737	0,365	0,0061	0,010	250	4	4,2	7
Al/Fe 54/9 Raven	0,535	0,578	0,368	0,0061	0,010	280	5,1	5,3	6
Al/Fe 75/14 Loviisa	0,380	0,411	0,357	0,0061	0,010	335	7,1	7,5	9
Al/Fe 85/14 Pigeon	0,337	0,364	0,354	0,0061	0,010	360	8	8,4	9
Al/Fe 89/52 Dotterel	0,323	0,349	0,342	0,0061	0,011	400	8,4	8,8	13
Al/Fe 93/39 Imatra	0,310	0,335	0,344	0,0061	0,011	405	8,7	9,2	12
Al/Fe 106/25 Suursavo	0,279	0,301	0,344	0,0061	0,011	430	10	10,5	10
Al/Fe 108/23 Vaasa	0,266	0,287	0,344	0,0061	0,011	420	10	10,5	10
Al/Fe 148/68 Kuopio	0,196	0,212	0,328	0,0061	0,011	550	13,9	14,6	16
Al/Fe 152/25 Ostrich	0,190	0,205	0,335	0,0061	0,011	550	14,3	15	15
Al/Fe 305/39 Duck	0,095	0,103	0,314	0,0061	0,012	845	28,7	30,2	22

Huomautukset 1) 2) 3) 4) ja 5), katso seuraava sivu.

