

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Diplomityö

Toni Virtanen

SUOJAUSASETTELUIJEN LASKENTA SÄHKÖRADOILLE

Työn tarkastajat: Apul. prof. Jukka Lassila
TkT Janne Karppanen

Työn ohjaaja: Pasi Kivistö

29.01.2023

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Toni Virtanen

Suojausasettelujen laskenta sähköradoille

Diplomityö

2023

107 sivua, 42 kuvaa, 15 taulukkoa ja 9 liitettä

Työn tarkastajat: Apul. prof. Jukka Lassila
 TkT Janne Karppanen

Työn ohjaaja: Pasi Kivistö

Hakusanat: sähkörata, relesuojaus, sähköverkko, sähköasema, keskijännite

Tässä diplomityössä perehdytään ratasähköverkkojen suojausasettelujen laskentaan sekä Suomessa käytettyjen ratasähköverkkojen eri järjestelmiin ja komponentteihin. Työssä perehdytään myös suojaustoimintojen yleisiin periaatteisiin sekä ratasähköverkkojen erityispiirteiden vaikutuksesta suojaustoimintojen asettelujen määrittämiseen. Työn toimeksiantajana oli Despro Engineering Oy.

Työssä käytetään esimerkkinä erästä sähköasemaa, jonka lähtötietojen perusteella suojausasettelut lasketaan kaikille kyseisellä sähköasemalla oleville suojareleille. Työssä tutkittiin 110 kV syöttöverkon eri kytkentätilojen oikosulkutehojen vaikutusta vikavirtoihin. Suojausasettelulaskennan teorian lähteiksi käytettiin kirjallisuutta, tieteellisiä julkaisuja sekä koulun materiaaleja. Suojausasettelujen laskemisen avuksi luotiin Excel-pohjainen laskentatyökalu ja tämän lisäksi käytettiin DigSilentin PowerFactory -simulointityökalua.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT
LUT School of Energy Systems
Electrical Engineering

Toni Virtanen

Calculations of protection settings for electrified railway grids

Master's Thesis

2023

107 pages, 42 figures, 15 tables and 9 appendixes

Examiners: Assoc. Prof. Jukka Lassila
 D.Sc. (Tech.) Janne Karppanen
Supervisor: Pasi Kivistö

Keywords: electrified railway, relay protection, electrical grid, substation, medium voltage

This master thesis introduces the calculations of protection settings and the different systems and components of electrified railway grids used in Finland. The work also introduces the main principles of protection functions and how special effects of electrified tracks affect to defining of protection function parameters. This thesis is made for Despro Engineering Oy.

This work uses a certain substation as an example for the calculations. The protection settings are calculated for all protection relays in that substation. The work investigated the effects of the different short-circuit powers of the 110 kV supply network on the fault currents. Used sources for the calculations theory are literatures, scientific publications, and school materials. An Excel-based calculation tool was created to help calculations. In addition to this, the DigSilent's PowerFactory -simulation tool was used also.

ALKUSANAT

Kiitokset diplomityön ohjaajille Jukka Lassilalle ja Janne Karppaselle työn ohjaamisesta. Haluan kiittää myös Pasi Kivistöä, joka on ollut ohjaajana Despro Engineering Oy:n puolelta sekä yritystä tämän diplomityön mahdollistamisesta.

Seinäjoella 29.01.2023

Toni Virtanen

SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET	8
1 JOHDANTO	11
2 SÄHKÖRATOJEN JÄRJESTELMÄT JA KOMPONENTIT.....	13
2.1 Ratasähköjärjestelmät Suomessa	13
2.1.1 Imumuuntajajärjestelmä 1 x 25 kV	15
2.1.2 Reduktiojärjestelmä 1 x 25 kV	16
2.1.3 Säästömuuntajajärjestelmä 2 x 25 kV	16
2.2 Ratasähköasemat.....	18
2.2.1 Ratasähköaseman päämuuntajat.....	20
2.3 Ratajohdon komponentit.....	20
2.4 Erotusjakso.....	22
2.5 Kytkinlaitteet.....	23
2.5.1 Katkaisijat.....	24
2.5.2 Erottimet.....	24
2.6 Mittamuuntajat.....	24
2.6.1 Virtamuuntajan perusteet	25
2.6.2 Jännitemuuntajan perusteet	27
2.7 Loisteho ja yliaaltojen suodatus.....	27
3 RELESUOJAUKSEN YLEISET PERIAATTEET	29
3.1 Suojarele	31
3.1.1 Sähkömekaaniset releet	32
3.1.2 Staattiset releet	33
3.1.3 Digitaaliset releet.....	33
3.2 Suojaukseen liittyvät vaatimukset.....	34
3.2.1 Kosketussuojauksen vaatimukset.....	34
3.2.2 Sähköturvallisuuslaki	37
3.2.3 Standardit	37
3.2.4 Fingrid liityntävaatimukset	38
3.3 Ylivirtasuojaus	39
3.3.1 Oikosulkusuojaus	39
3.3.2 Oikosulkupiirin impedanssien laskenta.....	40

3.3.3	Terminen oikosulkukestoisuus	42
3.4	Maasulkusuojaus	43
3.5	Jännitesuojaus	44
3.6	Päämuuntajan suojaaminen.....	45
3.6.1	Muuntajan ylivirtasuojaus	45
3.6.2	Muuntajan maasulkusuojaus	46
3.6.3	Muuntajan primäärisuojat	46
3.7	Differentiaalisuojaus	47
3.8	Distanssisuojaus	50
3.9	Vikojen paikantaminen	51
3.10	Selektiivisyys	52
3.10.1	Porrasaika	53
3.10.2	Selektiivisyyskäyrästä	53
3.11	Jälleenkytkennät.....	55
3.12	Katkaisijan vikasuojaus	56
3.13	Valokaarisuojaus.....	57
4	SÄHKÖRATOJEN SUOJAUKSIEN ERITYISPIIRTEITÄ.....	58
4.1	Ylivirtasuojaus sähköradoilla.....	58
4.2	Ratasähköaseman päämuuntajan differentiaalisuojaus.....	59
4.3	Sähköratojen distanssisuojaus.....	59
4.3.1	Distanssisuojaus 1x25 kV imumuuntajajärjestelmässä.....	59
4.3.2	Distanssisuojaus 2x25 kV -säästömuuntajajärjestelmässä.....	59
4.3.3	Säästömuuntajajärjestelmän distanssisuojaus yksivaihemittauksella ...	60
4.3.4	Säästömuuntajajärjestelmän distanssisuojaus kolmella impedanssimittauksella	61
4.4	Vikapaikan etäisyys	64
4.5	Ratajohdon lämpösuojaus	64
4.6	Jälleenkytkennät sähköradoilla	65
5	SUOJAUSASETTELUIJEN MÄÄRITTÄMINEN.....	66
5.1	Suojausasettelujen määrittämiseen käytetty verkko	66
5.2	Oikosulkuvirtojen ja -impedanssien laskeminen	67
5.3	Syöttökenttä 3.01 suojauksien määrittäminen	71
5.3.1	Muuntajan yläjännitepuolen suojauksien määrittäminen	72

5.3.2	Muuntajan differentiaalisuojaus	75
5.3.3	Käämikytkimen ohjaus.....	77
5.3.4	Muuntajan alajännitepuolen suojausten määrittely	78
5.4	Suodatin- ja reaktorikentän 6.91.0 suojausten määrittely	79
5.4.1	Suodattimen suojaus.....	80
5.4.2	Reaktorin suojaus	81
5.5	Ratalähdön 6.12 suojausten määrittely	83
5.5.1	Distanssisuojauksen määrittely	83
5.5.2	Vikapaikan etäisyyden määrittely	85
5.5.3	Ylivirtasuojauksen ja jännitesuojauksen määrittely.....	85
5.5.4	Lämpösuojauksen määrittely.....	86
5.6	Ratalähdön 6.13 suojausten määrittely	88
5.7	Omakäyttömuuntajan suojaus	91
5.8	Porrasajat.....	92
6	YHTEENVETO.....	93
	LÄHDELUETTELO	95
	LIITTEET	
	LIITE I: Sähköradoilla käytettävät johtimet.	
	LIITE II: Sähköasemaa syöttävän 110 kV sähköverkon oikosulkuvirrat.	
	LIITE III: Ratasähköverkon lasketut oikosulkuvirrat.	
	LIITE IV: Differentiaalisuojauksen määrittely.	
	LIITE V: Distanssisuojauksen määrittely.	
	LIITE VI: Ratalähdön 6.12 oikosulkusimuloinnit minimitalanteessa.	
	LIITE VII: Ratalähdön 6.13 oikosulkusimuloinnit minimitalanteessa.	
	LIITE VIII: Ratalähdön 6.12 oikosulkusimuloinnit maksimitilanteessa.	
	LIITE IX: Ratalähdön 6.13 oikosulkusimuloinnit maksimitilanteessa.	

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

muuttujat

BF	kehon kerroin
$CT_{\text{ensiö}}$	yläjännitepuolen virtamuuntajan ensiöarvo
CT_{korjaus}	yläjännitepuolen virtamuuntajan korjauskerroin
$D_{\text{ylä}}$	differentiaalisuojauksen yläasettelu
$E_{\text{käämikytkin}}$	käämikytkimen säätöalue
E_{rele}	suojareleen mittauksen tarkkuus
$E_{VM,AJ}$	alajännitepuolen virtamuuntajien tarkkuus
$E_{VM,YJ}$	yläjännitepuolen virtamuuntajien tarkkuus
HF	sydämen virtakerroin
$I_B(t_f)$	kehon kautta kulkevan virran raja-arvot
I_{ekv}	terminen virrankestoisuus ekvivalenttiajalla
I_k	oikosulkuvirta
I_{kt}	kuormitusvirta
I_{k1s}	virta, jolla komponentti kestää termisesti yhden sekunnin ajan
I_{k2}	kaksivaiheinen oikosulkuvirta
I_{k3}	kolmivaiheinen oikosulkuvirta
I_{meas}	mitattu virta
I_p	kuormitusvirta ennen kuin ylikuormitus alkaa
I_{ref}	asettelu virta-arvo
I_0	nollavirta
I_{0110kV}	110 kV maasulkuvirta
k_r	reduktiokerroin
$K0_{\text{ajojohdin}}$	ajojohtimen nollakomponentin kompensointikerroin
$K0_{\text{vastajohdin}}$	vastajohtimen nollakomponentin kompensointikerroin
P	perusasetus
P_{kn}	muuntajan kuormitushäviöt
$P_{\text{no-load}}\%$	muuntajan tyhjäkäyntikuorma prosentteina
$R_{\text{ensiö}}$	syöttöverkon resistanssi muuntajan yläjännitepuolella
R_F	jalan lisäresistanssi
R_f	110 kV vikaresistanssi

R_H	käden lisäresistanssi
R_k	muuntajan oikosulkuresistanssi
R_m	mitattu maadoitusresistanssi
R_{sum}	yhteenlaskettu resistanssi oikosulkupisteessä
R_{toisio}	syöttöverkon resistanssi redusoituna muuntajan alajännitepuolelle
R_0	110 kV verkon oikosulkuresistanssi
S	havahtumissuhde
S_n	muuntajan nimellisteho
T_{amb}	ulkolämpötila
t_{cb}	katkaisijan toiminta-aika
t_e	releen toiminta-ajan toleranssi
t_f	vian kesto aika
t_{ekv}	ekvivalenttiaika
t_{kv}	suurin termien kuormitus aika
t_m	varmuusmarginaali
t_r	retardaatio eli pyörtöaika
T_{ref}	lämpötilan nousu ulkolämpötilan yläpuolelle I_{ref} arvolla
T_{trip}	aseteltu laukaisulämpötila
t_0	AJK:n jännitteetön aika
t_1	oikosulun kesto aika ennen AJK:ta
t_2	oikosulun kesto aika AJK:n jälkeen
U_{ensio}	muuntajan yläjännitepuolen jännite
U_k	oikosulkupisteen jännitetaso
U_m	maadoitusjännite
U_{toisio}	muuntajan alajännitepuolen jännite
U_T	kosketusjännite
U_{Tp}	sallittu kosketusjännite
U_{vTp}	sallittu prospektiivinen kosketusjännite
X_{ensio}	syöttöverkon reaktanssi muuntajan yläjännitepuolella
X_k	muuntajan reaktanssi
X_{sum}	yhteenlaskettu reaktanssi oikosulkupisteessä
X_0	110 kV verkon oikosulkureaktanssi
Z_k	muuntajan oikosulkuimpedanssi

z_k	muuntajan suhteellinen oikosulkuimpedanssi
$ZL0$	nollakomponentin impedanssi
$Z_T(U_T)$	kehon impedanssi
$3I_{0max}$	syöttöverkon maksimitilanteen maasulkuvirta

symbolit

e	Neperin luku
τ	jäähtymisaikavakio

lyhenteet

AJK	aikajälleenkytkentä
PJK	pikajälleenkytkentä
PKL	paluujohtimen kiskoonliitäntäpiste
PM	päämuuntaja
OKM	omakäyttömuuntaja
SCADA	Supervisory control and data acquisition
STL	Sähköturvallisuuslaki
YTE	Yhteentoimivuuden tekniset eritelvät

1 JOHDANTO

Suomessa liikenneviraston hallinnoiman rataverkon pituus on noin 6000 km, joista 55 % on sähköistetty. Tätä sähköistettyä rataverkkoa syöttää noin 90 sähköasemaa. Sähköasemat saavat sähkönsä 110 kV verkosta ja syöttävät ratasähköverkkoon 25kV 50 Hz jännitettä. (Liikennevirasto, 2018) Sähköasemien saneerauksien myötä myös suojarieleet uusitaan ja tämän takia on tarvetta suojausasettelujen uudelleen määrittelylle. Myös uusia rataosuuksia ja sähköasemia rakennetaan. Sähköverkkojen suojaus toteutetaan pääsääntöisesti suojarieleillä. Hyvin toteutettu suojausjärjestelmä on selektiivinen, nopea, luotettava, herkkä ja toimii myös normaalista poikkeavissa käyttötilanteissa. Sähköverkkojen suojauksella pyritään suojaamaan verkossa olevia komponentteja sekä varmistamaan henkilöturvallisuus. Sähköverkossa tapahtuvat vikavirrat voivat vahingoittaa sähköverkon laitteita ja komponentteja. Vikojen aiheuttamat virrat ja jännitteet voivat olla myös ihmisille vaarallisia. Onkin tärkeätä, että sähköjärjestelmän suojaus toimii riittävän nopeasti ja varmasti. Jotta sähköverkkojen suojaus saadaan toimimaan oikeaoppisesti ja turvallisesti täytyy laskea suojausasettelut, asettaa ne releisiin ja varmistaa koestamalla, että suojaus toimii halutulla tavalla. Sähköverkkojen suojauksella saadaan myös rajattua vika-aluetta pienemmäksi, jotta vika-alue jäisi mahdollisimman pienelle alueelle, tällä tavoin saadaan turvattua sähkönjakelu vika-alueen ulkopuolella.

Työn tarkoituksena on kehittää laskentamenetelmät, joiden avulla voidaan laskea ja määrittellä ratasähköverkoissa tarvittavat ja käytettävät suojaustoiminnot sekä parametrit. Työn tavoitteena on määrittellä suojausparametrit teorian avulla sekä käyttäen apuna PowerFactory -simulointiohjelmaa. Tuloksia tullaan hyödyntämään Despro Engineering Oy:n tulevissa ratasähköasemaprojekteissa.

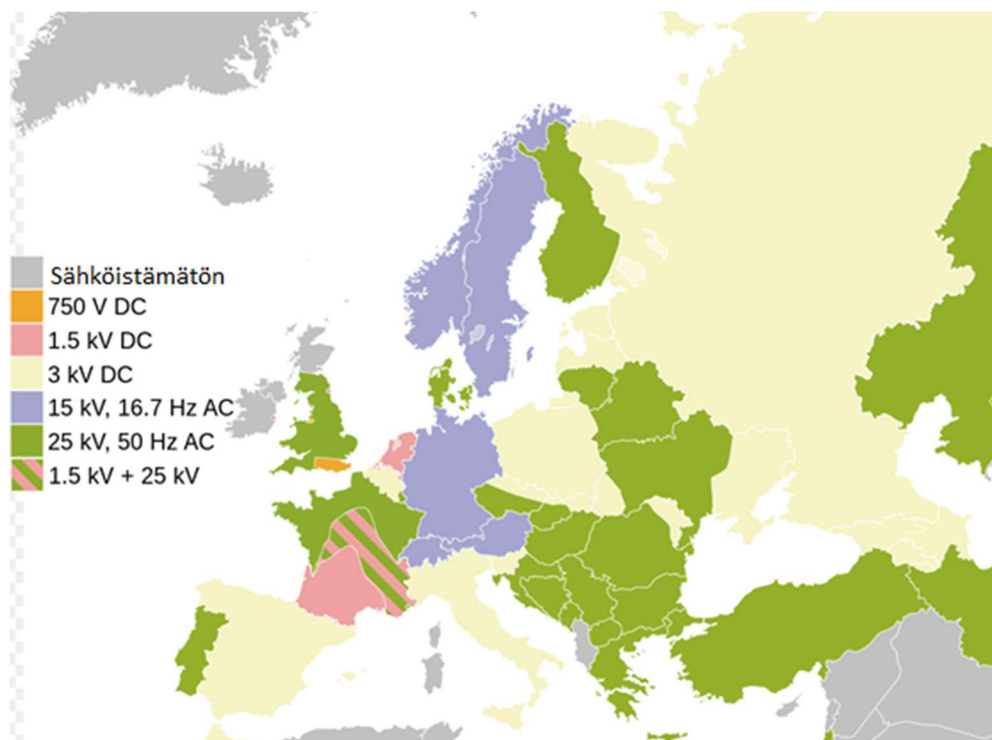
Tässä työssä rajaus on tehty koskemaan ratasähköverkkojen suojausasettelujen ja niiden määrittelyyn koskevaa tutkimusta. Työ keskittyy ratasähköverkkojen suojausasettelujen määrittämiseen sähköasemilla oleviin suojarieleisiin. Työn teoriaosuudessa lähestytään aihetta ainoastaan ratasähköverkkojen suojauksiin liittyvältä näkökannalta.

Toisessa luvussa käydään läpi sähköradoilla käytettäviä sähköistysjärjestelmiä yleisesti. Luvussa käydään läpi Euroopassa ja Suomessa käytettyjä sähköistysjärjestelmiä ja niiden komponentteja. Kolmannessa luvussa esitetään relesuojauksen ja eri suojaustoimintojen

yleisiä periaatteita. Neljännessä luvussa syvennyttään sähköratojen relesuojauksen erityispiirteisiin. Viidennessä luvussa käytetään erästä 110/25 kV sähköasemaa esimerkkinä suojausasettelujen laskennassa. Luvussa käydään läpi aseman kaikki suojareleet ja lähdöt. Luvussa on myös esitetty PowerFactory-ohjelmalla saatuja simulointituloksia ja verrataan näitä Excelillä laskettuihin arvoihin.

2 SÄHKÖRATOJEN JÄRJESTELMÄT JA KOMPONENTIT

Euroopan sähköradoilla käytetään useita erilaisia sähköistysjärjestelmiä. Kuvassa 2.1 on esitetty Euroopan sähköradoilla käytössä olevat järjestelmät.



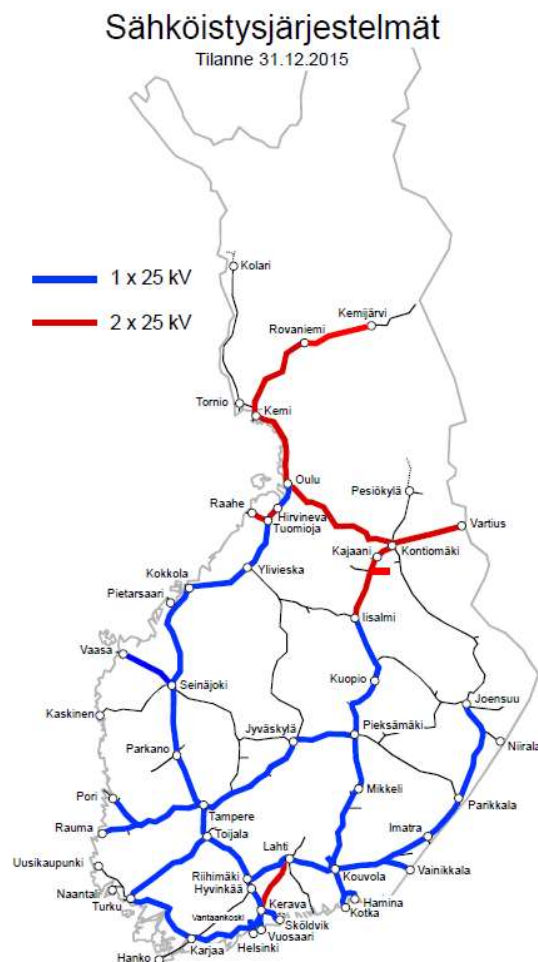
Kuva 2.1. Euroopan sähköradoilla käytettävät järjestelmät.

Osassa Eurooppaa ratasähköverkko toimii tasasähköllä ja osassa vaihtosähköllä. Tasasähköjärjestelminä ovat 0,75, 1,5 ja 3 kVDC -järjestelmät. Vaihtosähköjärjestelmiä ovat 15 kVAC 16,7 Hz ja 25 kVAC 50 Hz -järjestelmä. Sähköistysjärjestelmän valintaan eri valtioissa on vaikuttanut esimerkiksi se, milloin rautatiejärjestelmä on sähköistetty. Suomessakin käytössä oleva 25 kV 50 Hz vaihtosähköjärjestelmä on yleisin käytössä oleva sähköistysjärjestelmä Euroopan rautatieverkoissa. Se on yleisesti käytössä Itä-Euroopan maissa, Pohjoismaista Suomen lisäksi Tanskassa sekä Pohjois-Ranskassa, Portugalissa ja suurimmaksi osaksi Iso-Britanniaa.

2.1 Ratasähköjärjestelmät Suomessa

Ratasähköjärjestelmä koostuu ratajohdosta, syöttöasemista sekä sähköistetyn radan kaukokäytöstä. Suomessa käytetään pääsääntöisesti 1 x 25 kV imumuuntaja- tai 2 x 25 kV säästömuuntajajärjestelmää. Näiden lisäksi on olemassa vielä 1 x 25 kV reduktiojärjestelmä, joka on esitetty tarkemmin luvussa 2.1.2. Sähköistysjärjestelmän valinta tehdään pääasiallisesti taloudellisen perustein ottaen huomioon syöttöasemien mahdollisuudet liittyä

110 kV verkkoon. (Liikennevirasto, 2018) Kuvassa 2.2 on esitetty Suomen rautatieverkossa käytössä olevat sähköistysjärjestelmät.



Kuva 2.2. Sähköistysjärjestelmät Suomessa. (Liikennevirasto, 2016)

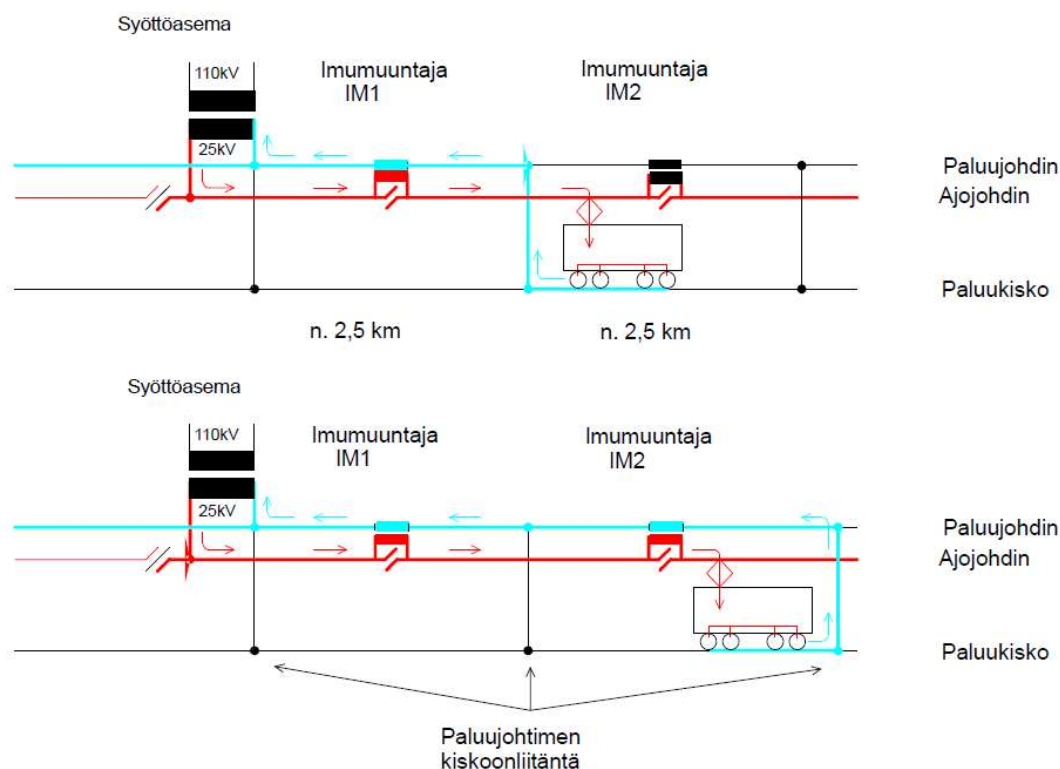
Kuten kuvasta 2.2 voimme todeta, yleisin Suomessa käytetty sähköistysjärjestelmä on 1x25 kV -järjestelmä. Säästömuuntajajärjestelmä on uudempi kuin imumuuntajajärjestelmä. Sitä ei ole niin paljon vielä käytössä kuin vanhempaa 1x25 kV -järjestelmää, mutta se on yleistymään päin. Säästömuuntajajärjestelmä on kehitetty rautatieliikenteen lisääntymisestä ja tarpeesta vähentää jännitehäviöitä. Molemmissa järjestelmissä voidaan operoida samoilla junilla.

Sähköradoilla käytetty 25 kV -järjestelmä on kehitetty erityisesti rautatieverkoston tarpeita silmällä pitäen. Suurin ero mikä erottaa ratasähköjärjestelmän perinteisestä verkkoyhtiöiden käyttämässä keskijännitejakelujärjestelmästä on se, että ratasähköjärjestelmässä on

nollajohdin, joka on maadoitettu toisin kuin jakelujärjestelmässä. Ratasähköverkoissa myös kuormituksen paikka vaihtuu koko ajan junien liikkuessa. (White, 2014)

2.1.1 Imumuuntajajärjestelmä 1 x 25 kV

Imumuuntajajärjestelmä ja sen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 2.3.



Kuva 2.3. Imumuuntajajärjestelmän periaatekaavio. (Liikennevirasto, 2016)

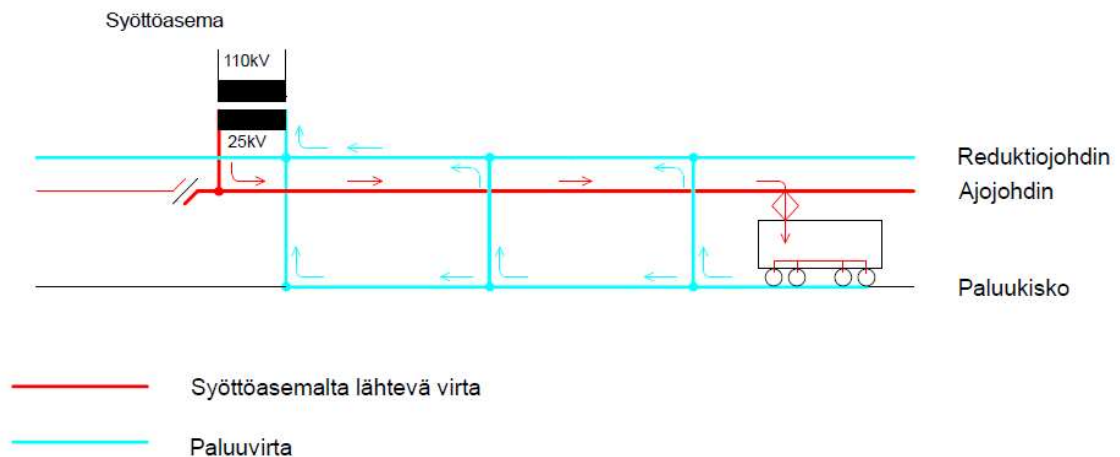
Imumuuntajajärjestelmässä käytetään ajojohdinta, paluukiskoa, paluujohdinta sekä imumuuntajia. Imumuuntajajärjestelmässä virta kulkee syöttöasemalta ajojohtimen kautta junien sähkömoottoreihin. Tämän jälkeen virta kulkee paluukiskosta imumuuntajien avulla paluujohtimien kautta syöttöasemalle. Imumuuntajajärjestelmässä käytetään imumuuntajia, joiden tarkoituksena on pakottaa paluuvirran kulkureitti paluujohtimen kiskoonliitäntäpisteestä (PKL) paluujohtimeen ja estää virran paluu paluukiskoa pitkin syöttöasemalle. Paluuvirran kiskossa kulkema matka on tämän takia korkeintaan puolet imumuuntajavälin pituudesta. Imumuuntaja on 1:1 virtamuuntaja, jonka ensiö on kytketty sarjaan ajojohtimen ja toisio paluujohtimen kanssa. (Liikennevirasto, 2018)

Imumuuntajien suurin sallittu välimatka toisistaan saa olla korkeintaan 2,6 km. (Liikennevirasto, 2018) Tällä varmistetaan se, että kiskopotentiaali ja viestintäjohtoihin

indusoituneet jännitteet eivät kasva liian suuriksi. Perustellusta syystä voidaan kuitenkin käyttää pitempääkin imumuuntaja väliä, mutta tähän tarvitaan Liikenneviraston lupa. Joiltakin rataosilta on mahdollista jättää imumuuntajat pois, jos voidaan todeta paluuvirtojen aiheuttamien haittojen olevan vähäisiä. Imumuuntajan täytyy pystyä imemään kuormitusvirta lähes kokonaan sekä suurin osa vikavirrasta. (Liikennevirasto, 2018)

2.1.2 Reduktiojärjestelmä 1 x 25 kV

Toinen Suomessa käytössä oleva 1 x 25 kV -järjestelmä on reduktiojärjestelmä, jossa käyttöjännite on sama kuin imumuuntaja järjestelmässä, mutta imumuuntajat ovat korvattu reduktiojohtimella. Reduktiojärjestelmän toimintaperiaate on esitetty kuvassa 2.4.



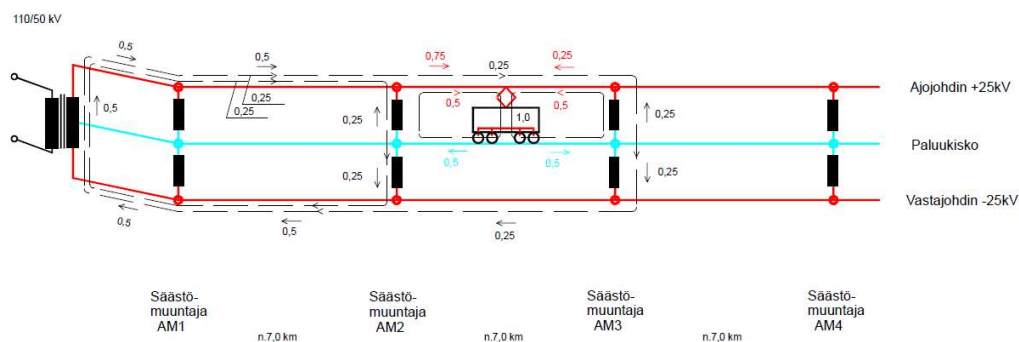
Kuva 2.4. Reduktiojärjestelmän periaatekaavio. (Liikennevirasto, 2016)

Reduktiojärjestelmässä käytetään ajojohdinta, paluukiskoa sekä reduktiojohdinta. Toisin kuin imumuuntajajärjestelmässä reduktiojärjestelmässä ei käytetä imumuuntajia. Imumuuntajien puuttuessa impedanssin pienentämiseksi paluukiskon rinnalle on asennettu reduktiojohtin. Reduktiojohtin yhdistetään tavallisesti 300-500 m välein paluukiskoon. Reduktiojohtimen tarkoituksena on vähentää paluukiskon kautta kulkevaa virtaa. Reduktiojärjestelmässä virta kulkee ajojohtimen kautta junien sähkömoottoreille. Tämän jälkeen virta kulkee paluukiskosta reduktiojohtimen kautta syöttöasemalle. (Liikennevirasto, 2018)

2.1.3 Säästömuuntajajärjestelmä 2 x 25 kV

Säästömuuntajajärjestelmässä käytetään ajojohdinta +25 kV, vastajohdinta -25 kV, paluukiskoa ja säästömuuntajia. Säästömuuntajajärjestelmässä juna ottaa virran

ajojohtimesta, jonka jälkeen virta kulkee junasta paluukiskon kautta lähimmille säästömuuntajille, joita syöttää ajojohdin-vastajohdin-piiri. (Liikennevirasto, 2018) Säästömuuntajajärjestelmän toimintaperiaate on esitetty kuvassa 2.5.



Kuva 2.5. Säästömuuntajajärjestelmän periaatekaavio. (Liikennevirasto, 2016)

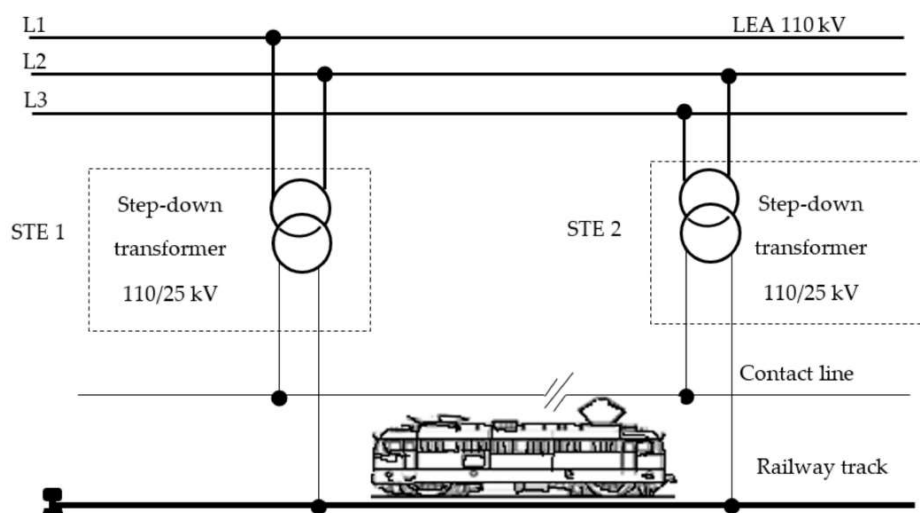
Säästömuuntajajärjestelmässä ratajohtoon kuuluu vastajohdin ja säästömuuntaja. Syöttömuuntajan 50 kV toisiokäämi kytketään ajojohtimen ja vastajohtimen väliin. Käämin keskipiste kytketään paluukiskoon. Säästömuuntajat (AM) kytketään ajojohtimen ja vastajohtimen väliin. Säästömuuntajien keskipiste kytketään paluukiskoon. Säästömuuntajajärjestelmässä teho siirretään 50 kV jännitteellä, mutta junat käyttävät kuitenkin 25 kV jännitettä. Käyttämällä suurempaa 50 kV siirtojännitettä järjestelmän tehonsiirtokyky on huomattavasti parempi kuin imumuuntajajärjestelmässä. Tämän ansiosta syöttöasemien välimatka voi olla huomattavasti suurempi. (Liikennevirasto, 2018)

Suurin osa paluuvirrasta kulkee paluukiskon ja M-johtimen kautta säästömuuntajille. Säästömuuntajien suurin sallittu välimatka on 7 km. (Liikennevirasto, 2018) Tällä varmistetaan, että kiskopotentiaali ja indusoituneet jännitteet pysyvät sallituissa rajoissa. Kuitenkin perustelluilla syillä on mahdollista käyttää pitempiäkin välimatkoja, mutta tähän tarvitaan Liikenneviraston lupa. (Liikennevirasto, 2018) Jotta mahdollisimman suuri osa kuormitusvirrasta saataisiin kulkemaan säästömuuntajien kautta, säästömuuntajien impedanssin täytyy olla mahdollisimman pieni. Tällä tavoin kauemmas kiskoja pitkin menevä paluuvirta saadaan mahdollisimman pieneksi. Säästömuuntajajärjestelmän rakennuskustannukset ovat kalliimmat kuin imumuuntajajärjestelmässä johtuen säästömuuntajien ja vastajohtimen materiaalikustannuksista (Andrusca, 2021).

2.2 Ratasähköasemat

Ratasähköasemat ovat pääpiirteiltään samanlaisia kuin jakelu- ja siirtoverkoissa käytettävät sähköasemat. Ratasähköasemat ottavat syöttönsä 110 kV verkoista. Asemilla on yleensä, joko yksi tai kaksi päämuuntajaa, jotka ovat joko 1x25 kV tai 2x25 kV -järjestelmiä. Asemilla virran ja jännitteen mittauksiin käytetään virta- ja jännitemuuntajia sekä siellä on erottimia ja katkaisijoita ohjauksia varten. Ratasähköasemilla on yliaaltojen ja loistehon takia kompensointilaitteistoja. Sähköratoja syötetään asemalla olevilla ratalähdöillä. Sähköasemien suojaus toteutetaan suojareleillä.

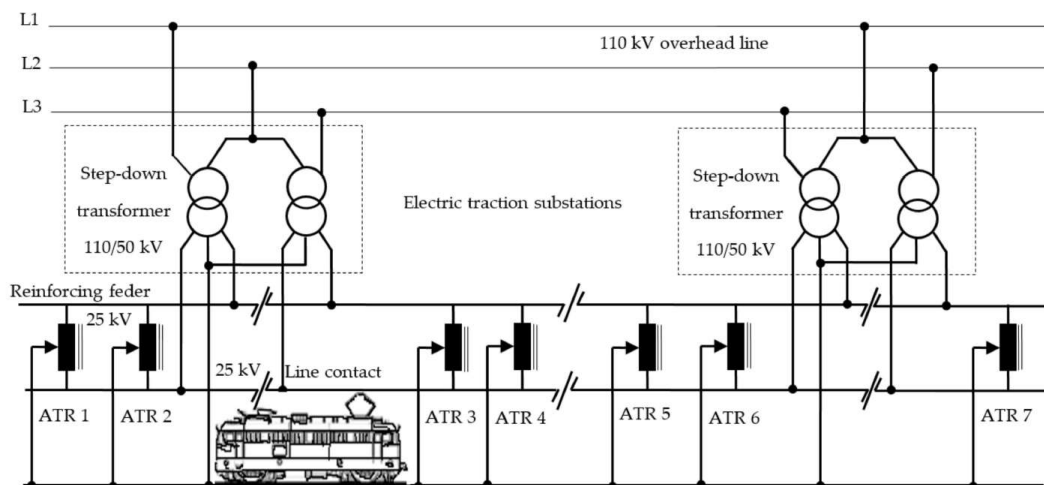
Kuvassa 2.6 on kaksi sähköasemaa. Sähköasemien päämuuntajien yläjännitepuolet on liitetty 110 kV verkkoon eri vaiheilla. Tällä tavalla yritetään varmistaa tasapaino kolmivaiheverkossa.



Kuva 2.6. Kaksi 1 x 25 kV-järjestelmän sähköasemaa. (Andrusca, 2021)

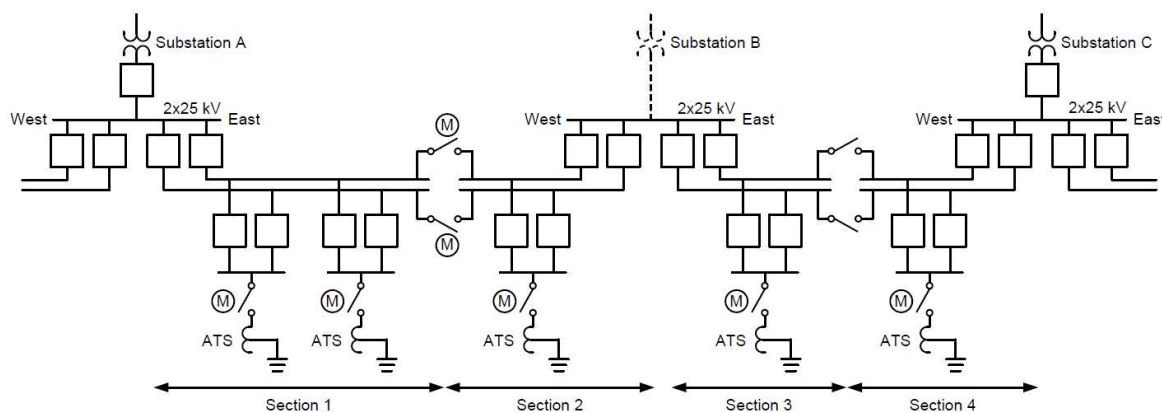
Imumuuntajajärjestelmä on yksivaiheinen sähköistysjärjestelmä ja se aiheuttaa ongelmia sitä syöttävään kolmivaiheiseen verkkoon. Häiriöitä ovat virtojen epätasapaino kolmivaihejärjestelmässä, harmoniset säröt ja jännitteiden vaihtelut. Virtojen epätasainen kuormitus johtaa eriarvoisiin jännitehäviöihin ja tämä johtaa epäsymmetriseen kuormitukseen. Näitä häiriöitä ehkäistään kytkemällä 110 kV verkosta eri vaiheet muuntajan ensiöpuolelle peräkkäisillä asemilla. Näin saadaan tasapainotettua kolmivaihejärjestelmää symmetrisemmäksi. (White, 2014)

Kuvassa 2.7 on esitetty kaksi säästömuuntajajärjestelmän sähköasemaa. Molemmilla sähköasemilla on kaksi päämuuntajaa.



Kuva 2.7. Kaksi 2 x 25 kV säästömuuntajajärjestelmän ratasähköasemaa. (Andrusca, 2021)

Myös säästömuuntajajärjestelmän päämuuntajien yläjännitepuolelle kytketään vain kaksi 110 kV vaihetta. Syyt ovat samat kuin imumuuntajajärjestelmässä. Sähköasemilla, joissa on kaksi päämuuntajaa, molempien muuntajien yläjännitepuolet kytketään eri vaiheisiin. Kuten kuvasta 2.7 näkyy, asemilla on yksi vaihe kytketty molempiin muuntajiin ja muuntajien toiset vaihteet ovat erit. Kuvassa 2.8 on esitetty ratasähköverkon sähköasemien välistä topologiaa.



Kuva 2.8. Ratasähköverkon topologiaa. (Novo, Teston, 2014)

Kuten kuvasta 2.8 voimme todeta jokainen sähköasema syöttää molempiin suuntiin. Kahden sähköaseman välissä on kytkentäraja puolessa välin sähköasemia. Kytkentärajat ovat normaali käyttötilanteessa näin, mutta vikatilanteiden tai huoltotöiden vuoksi kytkentäraja

voidaan viedä toiselle sähköasemalle asti. Kuvassa näkyy neljä syöttöaluetta, jotka on esitetty kuvan alareunassa.

2.2.1 Ratasähköaseman päämuuntajat

Ratasähköasemilla olevat päämuuntajat muuttavat 110 kV liityntäjännitteen sähköradoilla käytettäväksi 25 kV jännitteeksi. Riippuen käytössä olevasta järjestelmästä alajännitepuolella on joko yksi tai kaksi 25 kV vaihetta. Kuvassa 2.9 on erään ratasähköaseman 110/25 kV päämuuntaja.



Kuva 1.9. Erään ratasähköaseman päämuuntaja.

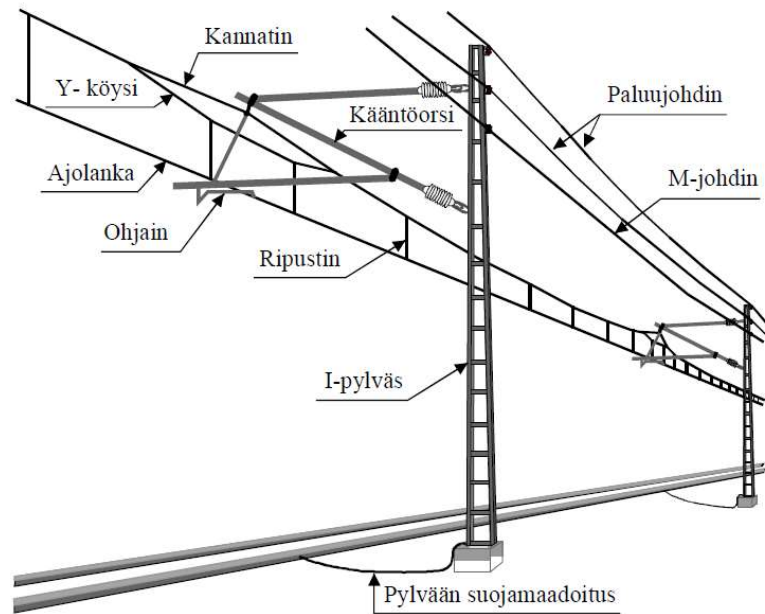
Päämuuntajissa on käämikytkin, joka automaattisesti säätää jännitettä portaittain, jos alajännitepuolen jännite on liian suuri tai pieni. Sähköradoilla käytettävät päämuuntajat ovat tyypillisesti teholtaan 7,5 MVA tai 12,5 MVA. (Liikennevirasto, 2018).

2.3 Ratajohdon komponentit

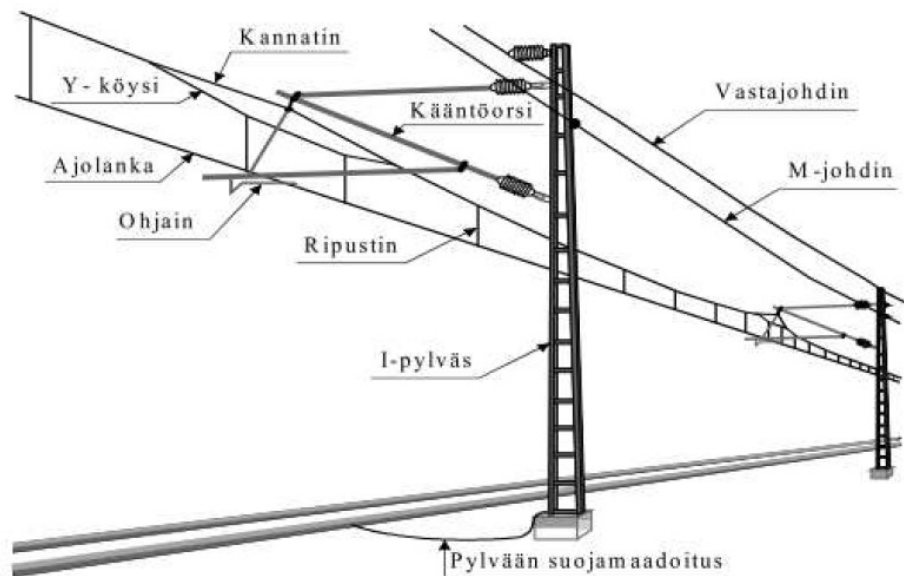
Ratajohto on järjestelmä, johon kuuluu ajojohdin ja järjestelmästä riippuen, joko paluu- tai vastajohdin sekä kannatusrakenteet ja varusteet. Ajojohdin syöttää liikkuvaan kalustoon sähkövirtaa virroitimen avulla. Ajojohdin sijaitsee liikkuvan kaluston ulottuman yläpuolella. Ajojohtimeen kuuluu ajojohdin ja sen kannatin, kääntöorren ohjain, eristimet ja erilaiset liittimet. Ajojohdin on tyypillisesti poikkipinnaltaan pääraiteilla 100 mm² ja sivuraiteilla 80 mm². Ajojohtimen materiaalina käytetään elektrolyyttikuparia.

Ajojohtimeen kuulumattomia komponentteja ovat kääntöorsi, pylväät, portaalit, perustukset muut johtimet kuin ajojohdin, kytkinlaitteet sekä eristimet, jotka eivät liity ajojohtimen rakenteeseen. (Liikennevirasto, 2018) Ratajohdon maksimi syöttökyky on 350-800 A, johon vaikuttaa junan sijainti ja muun sähköä käyttävän kaluston määrä alueella. (Väylävirasto, 2021b)

Kuvissa 2.10 ja 2.11 on esitetty 1 x 25 kV ja 2 x 25 kV -järjestelmissä käytettävät ratajohdot.



Kuva 2.10. Ratajohto ajoradalla 1x25 kV -järjestelmä. (Liikennevirasto, 2018)



Kuva 2.11. Ratajohto ajoradalla 2x25 kV -järjestelmä. (Liikennevirasto, 2018)

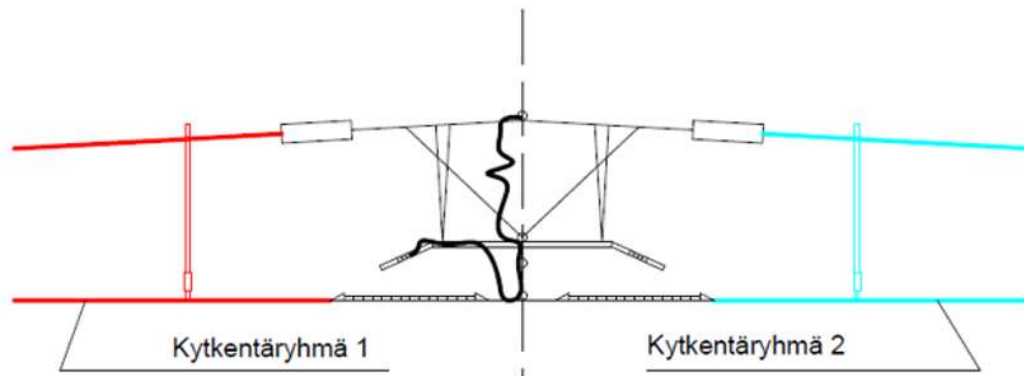
Paluujohdin muodostetaan yleensä kahdesta osajohtimesta. Osajohtimien keskimääräinen etäisyys toisistaan pitää olla vähintään 80 cm. Paluujohdin asennetaan ylemmäksi kuin ajojohdin. Paluujohdin asennetaan vastaavan ajojohtimen läheisyyteen. Kaksiraiteisilla radoilla voidaan käyttää yhtä poikkipinnaltaan suurempaa paluujohdinta tilanpuutteen vuoksi. Tähän tarvitaan kuitenkin liikenneviraston lupa. Paluujohdin on alumiinia ja poikkipinnaltaan joko 107 mm² tai 201 mm² riippuen siitä käytetäänkö yhtä vai kahta osajohdinta. Paluujohdinta käytetään 1x25 kV järjestelmässä. (Liikennevirasto, 2018)

M-johdinta käytetään pylväiden maadoitukseen ja se sijoitetaan paluu- tai vastajohtimen alapuolelle. M-johdin kytketään jokaiseen pylvääseen ja se maadoitetaan kytkemällä paluukiskoon enintään 215 m välein. M-johtimina käytetään samaa 107 mm² alumiinijohdinta kuin paluujohtimissa. Y-köyttä käytetään parantamaan kannattimellisen ajojohtimen joustavuutta. Y-köytenä käytetään 25 mm² kuparijohdinta. (Liikennevirasto, 2018)

Vastajohtimena käytetään 152/25 mm² teräsalumiinijohdinta. Turvallisuussyistä vastajohdin asennetaan aina radan puolelle pylvästä. Vastajohtimen jännite on yhtä suuri kuin ajojohtimella, mutta vastakkaisen suuntainen. Vastajohdinta käytetään 2x25 kV järjestelmässä. (Liikennevirasto, 2018)

2.4 Erotusjakso

Erotusjakso on rakenne, jossa kahden vierekkäisen syöttöalueen välissä ajojohdin on eristetty kahdesta kohtaa siten, että niiden väliin jää maadoitettu alue. (Liikennevirasto, 2016) Erotusjakson periaatteellinen rakenne on esitetty kuvassa 2.12.



Kuva 2.12. Erotusjakson rakenne ja kytkentäryhmät. (Liikennevirasto, 2016)

Sähköratojen syöttöasemien välissä käytetään erotusjaksoja, joilla erotetaan syöttöalueet toisistaan. Kun juna on erotusjakson kohdalla se ei voi ottaa virtaa ja junan pääkatkaisija on aukaistava. Juna ei myöskään saa pysähtyä erotusjakson kohdalla. (Väylävirasto, 2021b) Erotusjakson molemmilla puolilla käytetään magneetteja, jotka katkaisevat automaattisesti virranoton ajojohtimesta. Koska virransyöttö katkeaa erotusjaksojen kohdalla, täytyy erotusjaksojen sijainnit valita sen mukaan, että junat pystyvät rullaamaan sen ohi sekä valitsemaan niin, että siitä ei aiheudu muitakaan haittoja.

Erotusjaksot ovat kahden syöttöaseman välissä. Syöttöasemien muuntajien yläjännitepuolet voivat olla kytketty 110 kV verkossa eri vaiheisiin ja tästä seuraa se, että erotusjakson eri puolilla voi vaikuttaa eri vaihteiset jännitteet.

2.5 Kytkinlaitteet

Suurvoiman siirrossa käytettäviä kytkinlaitteita ovat katkaisijat, erottimet, kytkimet sekä kuormanerotimet. Kytkinlaitteilla voidaan muuttaa verkon kytkenätilanteita ja tällä tavoin ohjata sähköenergian kulkua verkoissa, niillä voidaan erottaa verkon eri osat toisistaan sekä ne erottavat verkon viallisia osia muusta verkosta vahinkojen ja vaarojen välttämiseksi.

Kytkinlaitteille on ominaista se, että niillä on normaalitila sekä käyttötila. Normaalitilassa kytkinlaitteet johtavat virtoja eivätkä ne saa silloin tuottaa suuria häviöitä tai yllilämpenemisiä. Toimintatilassa kytkinlaite muuntuu johtavasta kappaleesta eristeeksi tai päinvastoin. Kytkinlaitteille tärkeitä ominaisuuksia ovat: katkaisukyky, sulkemiskyky,

turvallisuustekniset ominaisuudet, mekaaninen luotettavuus sekä jatkuvan virran, oikosulkuvirran ja jänniterasitusten kesto. (Elovaara, Haarla,2011)

2.5.1 Katkaisijat

Kytkinlaitteista kallein ja tärkein laite on katkaisija. Katkaisijoilla toisin kuin erottimilla voidaan katkaista suuria kuormitus- ja vikavirtoja. Katkaisijoita käytetään virtapiirin avaamiseen ja sulkemiseen, nämä voivat tapahtua joko manuaalisesti tai automaattisesti. Automaattisesti katkaisijat avautuvat esimerkiksi silloin kun sähköverkossa on jokin vika ja suojarole lähettää laukaisukäskyn katkaisijalle. Nykyään on olemassa myös erottavia katkaisijoita, jotka hoitavat sekä katkaisijoille sekä erottimille tarkoitettuja tehtäviä. (Elovaara, Haarla,2011)

2.5.2 Erottimet

Erottimilla ei voi avata suuria virtoja kuten katkaisijoilla, eikä niitä ole tarkoitettukaan kuormitetun virtapiirin avaamiseen tai sulkemiseen. Erottimien tehtäviä ovat turvallisen avausvälin muodostaminen kahden osan verkon tai laitteen osan välille sekä saada verkon osa jännitteettömäksi turvallisen työskentelyn takaamiseksi. Jotta nämä tehtävät toteutuvat luotettavasti, pitää erottimen avausvälin olla selvästi silmillä todettavissa tai sen tilatieto pitää olla nähtävissä luotettavalla mekaanisella asennonosoittimella. Turvallisuuksista erotin on voitava lukita auki- tai kiinniasentoon. (Elovaara, Haarla,2011)

Maadoituserottimia käytetään silloin kun halutaan estää vikavirtojen ja induoitujen jännitteiden muodostumista, esimerkiksi silloin kun työskennellään kyseisen verkon osan alueella. Kuormanerotimilla voidaan katkaista keskisuuria kuormitusvirtoja, muttei vikavirtoja. Katkaisukyky riippuu kuormanerotimen tyypistä. (Elovaara, Haarla,2011)

2.6 Mittamuuntajat

Mittamuuntajia käytetään virtojen ja jännitteiden mittaamiseen. Mittamuuntajien tehtäviä ovat mittaussiirin galvaaninen erottaminen suurjännitepiiristä, mitta-alan muuntaminen niin että se mahdollistaa mitta- ja suojalaitteiden käytön, suojella mittareita ylikuormituksilta sekä mahdollistaa mitta- ja suojalaitteiden sijoittamisen etäämmälle varsinaisesta mittauspaikasta. (Elovaara, Haarla,2011)

Mittamuuntajien on kyettävä toistamaan mittaamansa virta tai jännite normaalilla kuormitusalueellaan mahdollisimman pienellä virhemarginaalilla. Tyhjäkäyntivirta ja käämitysten hajaimpedanssit kuitenkin väärentävät mittaustulosta hieman. Virheet näkyvät mittamuuntajien virta-, jännite- ja kulmavirheinä. (Elovaara, Haarla,2011)

Mittamuuntajien toimintaperiaate perustuu yleensä sähkömagneettiseen induktioon. Jännitemittauksessa käytetään myös kapasitiivisia jännitemuuntajia sekä virtamuuntajiin sijoitettuja kapasitiivisia ulosottoja. Virranmittauksessa käytetään nykyään myös optoelektroniikkaa. (Elovaara, Haarla,2011)

2.6.1 Virtamuuntajan perusteet

Virtamuuntajat voidaan jakaa kahteen luokkaan, joita ovat mittaustarkoituksiin valmistetut ja suojaustarkoituksiin valmistetut virtamuuntajat. Virtamuuntajissa voi olla useampia sydämiä, joista osa on tarkoitettu mittaukseen ja osa suojaukseen. Suojaus- ja mittausvirtamuuntajat poikkeavat toisistaan vaatimuksiltaan ja mitoituksiltaan. Molemmille virtamuuntajatyypeille on määritelty sallitut virta- ja kulmavirheet. Näiden lisäksi on olemassa myös yhdistettyvirhe, joka ottaa virta- ja kulmavirheen lisäksi huomioon virtamuuntajan magnetoimiskäyrän epälinearisuuden. Standardeissa virtamuuntajille on määritelty tarkkuusluokat, jotka määritellään näiden kolmen virheen avulla. (Elovaara, Haarla,2011)

Virtamuuntajien taakalla tarkoitetaan toisiopiirin impedanssia ja sen tehokerrointa. Mitoitus taakka kertoo millä taakalla virtamuuntaja pysyy vielä tarkkuusluokassaan eikä ylitä standardien asettamia vaatimuksia mittausvirheille. Yleensä mitoitustaakan arvot vaihtelevat välillä 2,5-30 VA. (Elovaara, Haarla,2011)

Mittausvirtamuuntajille määritellään mittarivarmuusvirta yhdistetyn virheen avulla. Sillä tarkoitetaan pienintä ensiövirran arvoa, jolla yhdistetty virhe on yli 10 %. Mitä pienempi mittarivarmuusvirta on, sitä pienemmällä ensiövirran arvolla se kyllästyy. Mittarivarmuuskerroin saadaan, kun mittarivarmuuskerroin jaetaan ensiön mitoitusvirralla. (Elovaara, Haarla,2011)

Suojausvirtamuuntajille määritellään mitoitus tarkkuusrajavirta, jolla tarkoitetaan ensiövirran arvoa, jolla virtamuuntaja pysyy yhdistetylle virheelle asetettujen vaatimusten, esimerkiksi 5 % tai 10 % sisällä. Mitoitus tarkkuusrajavirran ja ensiön mitoitusvirran suhdetta kutsutaan tarkkuusrajakertoimeksi. Tarkkuusrajakerrointa valittaessa täytyy ottaa huomioon verkossa olevat vikavirrat. Virtamuuntajien täytyy pystyä toistamaan verkon suurimmat oikosulkuvirrat. (Elovaara, Haarla, 2011)

Suojaustarkoituksiin olevissa virtamuuntajissa mainitaan erikseen erikoisluokka PR. Erikoisluokan PR -virtamuuntajissa kyllästystilan jälkeinen suojaussydämeen jäävä remanenssi on normaalia pienempi kolme minuuttia sen jälkeen, kun kyllästystilaan vaikuttava ensiövirta on lakannut vaikuttamasta. PX-luokan suojausvirtamuuntajille on tyypillistä pieni oikosulkureaktanssi. Oikosulkureaktanssiin vaikuttavia tekijöitä ovat virtamuuntajan kyllästysominaiskäyrä, toisiokäämin ja -taakan resistanssi sekä virtamuuntajan ensiö- ja toisiokäämien kierrosluvun suhde. Suojaustarkoituksiin tarkoitettujen virtamuuntajien tarkkuusluokkaa kuvaavan numeron jälkeen on kirjain P. (Elovaara, Haarla, 2011)

Mittaustarkoituksiin tarkoitettujen virtamuuntajien tarkkuusluokkaa kuvaavan numeron jälkeen on kirjain S. Energianmittauksissa käytettävillä virtamuuntajilla tarkkuusluokaksi suositellaan 0,5:tä silloin kun vuosittaisen energiankulutuksen enimmäismäärä on 10 GWh, tätä suuremmilla energiankulutuksilla on valittava tarkkuusluokan 0,2 -virtamuuntajat. (Elovaara, Haarla, 2011)

Virtamuuntajan tarkkuusluokitus ilmaistaan seuraavanlaisesti, ensin ilmoitetaan mitoitusarvo, sitten tarkkuusluokka ja tämän jälkeen joko mittarivarmuuskerroin (mittausvirtamuuntaja) tai tarkkuusrajakerroin (suojausvirtamuuntaja). (Elovaara, Haarla, 2011)

Virtamuuntajien ensiö- ja toisiovirroille on standardoidut mitoitusarvot. Yleisesti käytettyjä mitoitusarvoja ovat 10, 15, 20, 30, 50, 75 A sekä näiden kymmenkerrannaiset. Toisio mitoitusarvot ovat yleensä joko 1 tai 5 A. (Elovaara, Haarla, 2011)

2.6.2 Jännitemuuntajan perusteet

Jännitemuuntajat voivat olla toiminnaltaan joko induktiivisia tai kapasitiivisia. Tavallisesti ne ovat yksivaiheisia. Virtamuuntajien tavoin jännitemuuntajat voidaan jakaa mittaukseen ja suojaukseen tarkoitettuihin jännitemuuntajiin. Jännitemuuntajille on määritelty jännite- ja kulmavirheet. Mitoitusjännitekerroin kertoo suurimman käyttötaajuuden ensiöjännitteen, jonka jännitemuuntaja kestää termisesti. Suojauskäytössä olevien jännitemuuntajien pitää pysyä tarkkuusluokassaan mitoitusjännitekertoimiseen jännitteeseen asti. (Elovaara, Haarla,2011)

Jännitemuuntajien tarkkuusluokat on määritelty jännite- ja kulmavirheiden avulla. Jännitemuuntajan täytyy pysyä tarkkuusluokassaan jännitteen ollessa 80, 100 tai 120 % mitoitusjännitteestä ja taakan ollessa 25 ja 100 % nimellisestä arvosta. (Elovaara, Haarla,2011)

Jännitemuuntajan mitoitusjännite valitaan verkon nimellisjännitteen mukaan. Jos jännitemuuntajan ensiökäämi kytketään vaiheiden väliin, ilmoitetaan mitoitusjännite pääjännitteenä ja jos ensiökäämi kytketään vaiheen ja tähtipisteen tai tähtipisteen ja maan väliin, ilmoitetaan mitoitusjännite vastaavasti vaihejännitteenä. Jännitemuuntajien toisiojännite on yleensä 100 V, jos ensiökäämi on kytketty kahden vaiheen tai verkon tähtipisteen ja maan väliin. Jos ensiökäämi on kytketty vaiheen ja maan väliin suositellaan käytettävän toisiojännitteenä $100/\sqrt{3}$ V. (Elovaara, Haarla,2011)

Avokolmiokäämiä käytetään maasulkusuojaukseen ja se mittaa nollajännitettä. Avokolmiomittauksessa kolme yksittäistä vaihetta kytketään kolmioksi, jonka yksi sivu jätetään auki. Koska eri käämeillä on yhteinen sydän vaikuttaa jokaisen käämin kuormitus muiden käämien mittaussuuruuteen. Avokolmiokäämin toisiojännite on yleensä kytketty $100/3$ V. Täydellisessä yksivaiheisessa maasulussa avokolmiokäämi antaa toisiojännitteeksi 100 V, kolmen yksittäisen vaiheen takia. (ABB,2000a)

2.7 Loisteho ja yliaaltojen suodatus

Kuten muissakin sähköverkoissa niin myös ratasähköverkoissa esiintyy yliaaltoja ja loistehoa. Näitä voidaan suodattaa ja kompensoida käyttämällä erilaisia laitteita. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi kondensaattoriparisto, estokelaparisto, yliaaltosuodatin ja reaktori.

Sähköradoilla junien sähkömoottorit aiheuttavat verkkoon yliaaltoja. Harmoniset yliaallot ja loisteho heikentävät tehokerrointa ja tämä aiheuttaa ylimääräistä kuormitusta syöttävään verkkoon. Loistehon kompensoinnin avulla saadaan myös suurennettua huipputehoja ja tämän avulla pidennettyä sähköasemien etäisyyttä toisistaan (White, 2014).

Sähköradoilla loistehon kompensointi ja yliaaltojen suodatus tapahtuu sähköaseman päämuuntajan toisiopuolella. Kuvassa 2.13 on esitetty kompensointi- ja suodatuslaitteistoa ratasähköasemalta.

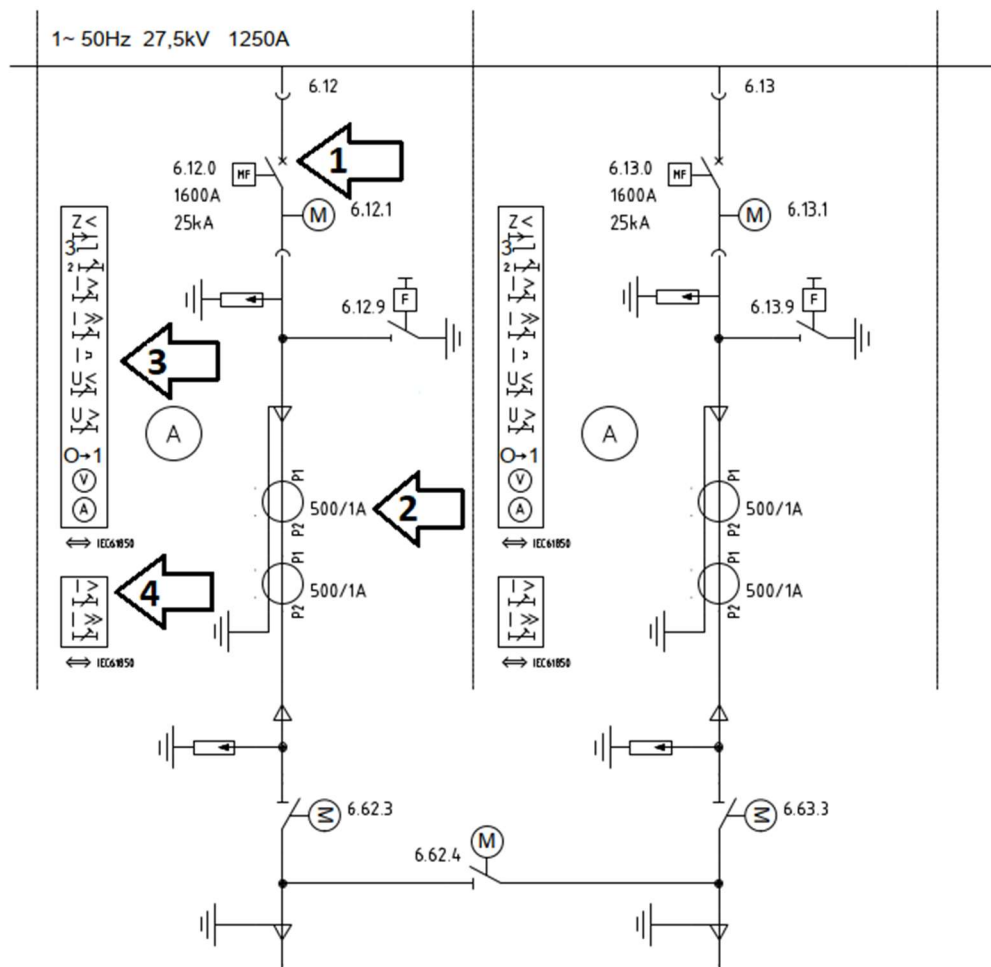


Kuva 2.13. Erään ratasähköaseman kompensointi- ja suodatinlaitteisto päämuuntajan vasemmalla puolella.

Suodatinlaitteisto koostuu kondensaattoreista ja keloista. Kuvassa 2.13 näkyy suodatinlaitteistoon kuuluvat kondensaattorit ja kelat. Sähköjunat ottavat induktiivista loistehoa kantaverkosta, jotta induktiivinen loisteho voidaan kompensoida, tarvitaan kondensaattoreita, jotka tuottavat kapasitiivista loistehoa. Suodatinlaitteistolla suodatetaan verkossa olevia tiettyjä yliaaltoja ja parannetaan näin jännitteen kokonaissäröä. Fingrid on määrännyt rajat yliaaltopitoisuuksille sekä induktiiviselle ja kapasitiiviselle loisteholle.

3 RELESUOJAUKSEN YLEISET PERIAATTEET

Sähköverkon suojausten kokonaisuuteen kuuluu suuri määrä eri laitteita esim. mittamuuntajia, suojareleitä ja katkaisijoita. Suojarele ei pysty yksinään hoitamaan sähköverkon suojausta vaan se tarvitsee aina apulaitteet, jotta suojaus voi toimia. Kuvassa 3.1 on esitetty erään sähköaseman kaksi ratalähtöä suojalaitteineen. Saman aseman sisällä tapahtuva laitteiden välinen tiedonsiirto hoidetaan johtimilla tai valokuidulla. Joskus myös eri asemien välisiä releitä voidaan yhdistää tietoliikenneyhteydellä. Eri laitteiden välinen yhteistoiminta on tärkeää, koska tällä saadaan varmistettua suojausten toimiminen ja vikaantuneet osat saadaan poistettua muusta verkosta.



Kuva 3.1. Ratasähköaseman pääkaavion ratalähdöt. (1) Katkaisija, (2) virtamuuntaja, (3) pääsuojana toimiva suojarele ja sen suojaustoiminnot sekä (4) varasuojana toimiva suojarele ja sen suojaustoiminnot.

Suojausten tarkoituksena on havaita viat tai voimajärjestelmän epänormaalit olosuhteet, jotta edellä mainitut tilanteet saadaan selvitettyä tai loppumaan. Vian sattuessa on

vikaantunut verkon osa erotettava terveestä verkon osasta, jotta vika ei aiheuta vaaraa eikä tuhoa laitteita ja verkon komponentteja. Kun vikaantunut verkon osa on irrotettu muusta verkosta, voidaan tehonsiirtoa jatkaa terveessä verkossa normaalisti. Erottaminen voidaan suorittaa esimerkiksi katkaisijalla, joka on esitetty kuvan 3.1 kohdassa 1. Oiko- ja maasuluissa vikavirrat voivat nousta niin suuriksi, että vikaantunut osa on erotettava muusta verkosta nopeasti, jotta se ei aiheuttaisi henkilö- tai laitevahinkoja.

Myös jännitteen laatuvaatimuksien ja taloudellisten seikkojen takia relesuojaus on tarpeellinen. Jännitteen laatuun vaikuttavat esimerkiksi jännitekuoppien kestot ja johtojen nopea käytönpalautus, joka voidaan toteuttaa releen automaattisilla jälleenkytkennöillä. Vikojen tapahtuessa taloudelliset vahingot jäävät vähäisiksi, kun viallinen verkon osa kytketään nopeasti irti terveestä verkosta ja mahdollisimman suuri verkon osa jää käyttöön.

Relesuojauksella voidaan siis estää erilaisia vaaratilanteita. Suuret vikavirrat voivat aiheuttaa lämpövaikutuksia, jotka voivat olla vaarallisia ihmisille tai eläimille. Lämpövaikutus voi myös tuhota laitteita ja verkon komponentteja sekä aiheuttaa tulipalovaaroja. Maasulut voivat aiheuttaa maassa kulkevia virtoja, jotka altistavat vikapaikan lähellä askel- ja kosketusjännitteille. Maasulut voivat aiheuttaa myös sähköaseman potentiaalın kasvun vaarallisen suureksi. Maasulkuvirrat voivat aiheuttaa häiriöjännitteitä muihin virtapiireihin, kuten viestiverkkoihin. Vikatilanteet aiheuttavat myös jännitekuoppia, jotka leviävät muualle verkkoon. Vikavirtoja ja -jännitteitä voidaan mitata virta- ja jännitemuuntajien avulla. Kuvan 3.1 kohdassa 2 on esitetty virtamuuntaja.

Sähköverkon kytkentätila voi vaihdella ja tästä voi seurata esimerkiksi vikavirtojen vaihtelua, myös mittauksissa voi olla virheitä. Hyvin toteutettu relesuojausjärjestelmä toimii myös poikkeuksellisissa olosuhteissa. Suojauksen oikea toiminta voidaan varmistaa tekemällä releiden asettelut seuraavien periaatteiden mukaan. Kun halutaan varmistaa releen antama laukaisukäskey, asetteluarvo valitaan kertomalla tiedetty vika-arvon suure ykköstä pienemmällä luvulla. Tällä voidaan varmistaa esimerkiksi ylivirtasuojan toiminta. Jos taas halutaan varmistaa, että rele ei lähetä laukaisukäskeyä kerrotaan vika-arvon suure ykköstä suuremmalla. Tätä voidaan käyttää esimerkiksi distanssisuojauksessa suurentamalla reaktanssin arvoa. (Elovaara, Haarla, 2011)

Hyvin toteutetussa suojausjärjestelmässä on tärkeää myös varmistaa suojauksen nopeus. Mitä nopeammin rele toimii, niin sitä nopeammin vika saadaan poistettua verkosta. Nopealla suojauksella pystytään vähentämään ihmisille ja laitteilla aiheutuneita haittoja. Suojauksessa luotettavuudella tarkoitetaan kahta asiaa. Ensimmäiseksi sillä tarkoitetaan toimintavarmuutta, millä tarkoitetaan sitä, että rele ei laukaise silloin kun sen suojausalueella ei ole vikaa. Eli rele ei anna turhia laukaisukäskyjä. Toisekseen sillä tarkoitetaan käyttövarmuutta, mikä tarkoittaa sitä, että rele lähettää laukaisukäskyn, kun sen suojausalueella on vika. Eli rele ei jätä laukaisematta silloin kun sen alueella on vika.

Suojauksessa käytetään yleensä pääsuojia ja varasuojia. Pää- ja varasuoja esitetään kuvan 3.1 kohdissa 3 ja 4. Pääsuoja on suojarele tai laite, jonka tehtävänä on ensisijaisesti poistaa verkossa olevat viat. Jos pääsuoja ei laukaise verkossa olevaa vikaa pois, niin varasuoja laukaisee vian hieman pidemmällä toiminta-ajalla. Varasuoja on yleensä saman verkon osan suojaukseen tarkoitettu suojarele tai laite, jonka laukaisuaikat tai asetteluarvot tekevät siitä hitaamman kuin pääsuojasta. Jos käy niin, että kumpikaan suoja ei toimi niin on mahdollista, että mikään suoja ei laukaise vikaa pois. Tässä tapauksessa vika voi edetä suurhäiriöksi asti. Suojattava verkko jaetaan virtamuuntajien mukaan suoja-alueisiin. Jotta suojauksesta saataisiin luotettava, jokainen suoja-alue kuuluu vähintään kahden suojareleen piiriin. Kahdennus voidaan tehdä joko kahdella eri pääsuojalla, tai käyttämällä pää- ja varasuojaa. Jos kahdennus on tehty kahdella pääsuojalla, käytetään aikaisemman suojausalueen pääsuojaa myöhemmän alueen varasuojana.

Suojauksen pitää olla niin herkkä, että suojaus toimii myös silloin kun verkon kytkentätila on muuttunut ja vikavirrat ovat pienentyneet. Asetteluarvot täytyy määrittää siten, että suojaus toimii kytkennänmuutoksista johtuvilla pienimmillä mahdollisilla vikavirroilla. (Elovaara, Haarla,2011)

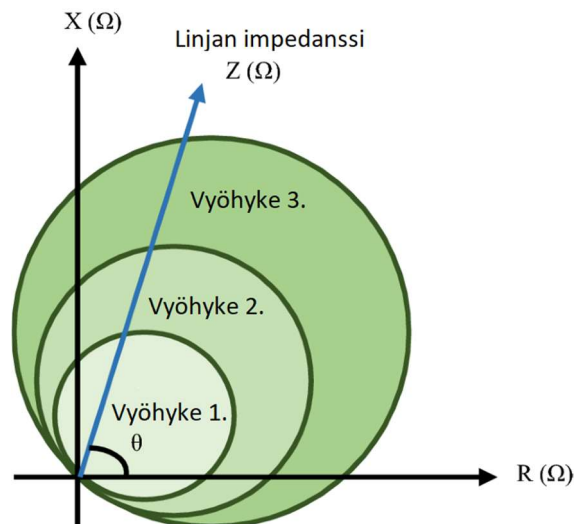
3.1 Suojarele

Suojarele on mittaava laite, jolla mitataan eri suureita. Suojarele on vain yksi laite osana suurempaa suojauskokonaisuutta. Suojareleiden toimintaan kuuluu havahtuminen, toiminta ja palautuminen. Releelle voidaan asettaa toiminta-arvo ja toiminta-aika. Rele havahtuu, kun releen mittaama arvo, joko alittaa tai ylittää releelle annetun toiminta-arvon riippuen suojan toiminnasta. Rele toimii, kun rele on havahtuneena toiminta-ajan mukaisen ajan.

Releen toimiessa eli laukaistaessa, katkaisija aukeaa, rele lähettää hälytyksen tai kummatkin asiat tapahtuvat. Rele palautuu, kun releen mittaama suure poistuu toiminta-arvon alueelta. Jos tämä tapahtuu ennen kuin toiminta-aika täyttyy, rele havahtuu mutta ei toimi. (Elovaara, Haarla,2011) Sähköasemilla releet saavat apujännitteensä yleensä 110 tai 220 VDC akustoista. Tällä varmistetaan se, että omakäyttösähköjen katketessa releet toimivat akkujen syöttäessä niitä. (Mäkinen,2008)

3.1.1 Sähkömekaaniset releet

Vanhimmat releet ovat rakenteeltaan sähkömekaanisia. Ensimmäiset sähkömekaaniset releet olivat ensioreleitä. Releet oli kytketty suoraan suojattavaan piiriin, jotka suojan laukaistaessa aukaisivat katkaisijan välitangon avulla. Myöhemmin tulivat mittamuuntajien toisiopiireihin kytkettävät sähkömekaaniset releet. Ne sisältävät paljon liikkuvia osia ja niiden toiminta perustuu virran kasvun aiheuttamaan magneetikentän kasvuun, joka saa releen liikkuvat osat liikkumaan. Vanhat sähkömekaaniset releet ovat kestäviä, mutta epätarkkoja. Sähkömekaanisia releitä pitää koestaa säännöllisin koeajoin, jotta ne eivät jäykistyisi. Jotkut releet ovat myös melko kookkaita. Nopeimmat distanssireletoimet toimivat noin 20 millisekunnissa. Distanssireleiden asettelukuvio on (R, X) -koordinaatistossa ympyrä, kuten kuvassa 3.2.



Kuva 3.2. Sähkömekaanisen releen distanssisuojauksen asettelukuvio (R, X) -koordinaatistossa.

Asettelukuvion muotoa ei pysty muuttamaan niin kuin uudemmissa releissä. Vaikka sähkömekaaniset releet ovat jo melko iäkkäitä niin niitä kuitenkin on yhä käytössä. (Elovaara, Haarla,2011) Vaihtovirralla toimivat sähkömekaaniset releet usein tasasuunnataan, koska tasavirtamagneeteilla saavutetaan vaadittu mittaustarkkuus

helpommin. Rele on silloin kiertokäämirele, eli polarisoitu rele, joka on varustettu kestopolttimella. Releen toiminta perustuu tasavirran tai jännitteen aiheuttamaan vääntömomentin suuntaan. (Mäkinen,2008)

3.1.2 Staattiset releet

Sähkömekaanisten releiden jälkeen markkinoille saapuivat staattiset releet. Staattisissa eli elektronisissa releissä ei ole mekaanisesti liikkuvia osia. Niiden toiminta perustuu puolijohdekomponentteihin ja mikropiireihin. Ne tulivat käyttöön 1960-luvulla. Staattisilla releillä on mahdollista suorittaa monimutkaisempia toimintoja kuin sähkömekaanisilla releillä. Staattiset releet ovat tarkempia ja niiden palautumisaika on lyhyempi kuin sähkömekaanisilla releillä. Staattisten releiden ongelmia ovat kuitenkin elektronisten osien vanheneminen, joten niitä täytyy huoltaa. Staattiset releet ovat myös herkkiä ylijännitteille ja ne tarvitsevat jatkuvaa käyttö sähköä pysyäkseen toiminnassa. (Elovaara, Haarla,2011)

3.1.3 Digitaaliset releet

Moderneimmat releet ovat digitaalisia releitä. Digitaaliset eli mikroprosessorireleet ilmestyivät markkinoille 1980-luvun lopulla. Digitaalisten releiden asettelu- ja ohjelmoimismahdollisuudet ovat huomattavasti suuremmat ja laajemmat kuin muilla releillä. Digitaalisilla releillä on mahdollista ohjelmoida erilaisia toimintoja suojaustoimintojen lisäksi. Suurten toiminto- ja asetelumäärien vuoksi virheasettelujen ja -ohjelmointien määrä kasvaa. Releisiin on lisätty erilaisia erikoistoimintoja kuten vikapaikan laskenta, häiriötallennin sekä itsevalvonta. Digitaalipiirien nopea kehitys tänä päivänä on johtanut siihen, että tietty reletyyppi saattaa vanheta nopeasti. (Elovaara, Haarla,2011)

Digitaalisten releiden prosessoritehoissa on eroja. Prosessoritehon kasvaessa saadaan kasvatettua releen nopeutta, mutta myös releen hinta nousee. Nopeimmat distanssireleet antavat laukaisukäskyn 10 millisekunnissa. Aina ei ole järkevää käyttää kaikista nopeinta relettä, koska näin nopeaan laukaisuun ei ole aina tarvetta. Useissa tapauksissa varaudutaan vikoihin, joiden laukaisuaika katkaisijan ja releen toiminta-ajat mukaan luettuna on noin 100 millisekuntia. Tällöin releen laukaisuajaksi riittää 20-50 millisekuntia. (Elovaara, Haarla,2011)

3.2 Suojaukseen liittyvät vaatimukset

Relesuojaukselle on olemassa yleisiä vaatimuksia, jolla pyritään varmistamaan sen oikeaoppinen toiminta. Yleisiä vaatimuksia relesuojaukselle ovat:

- vaurioiden rajoittaminen mahdollisimman pieneksi (Mäkinen,2008)
- henkilöturvallisuuden varmistaminen (Elovaara, Haarla,2011)
- selektiivisyys (Mäkinen,2008)
- yksinkertaisuus ja käyttövarmuus (Mäkinen,2008)
- koestusmahdollisuus käytön aikana (Mäkinen,2008)

3.2.1 Kosketussuojauksen vaatimukset

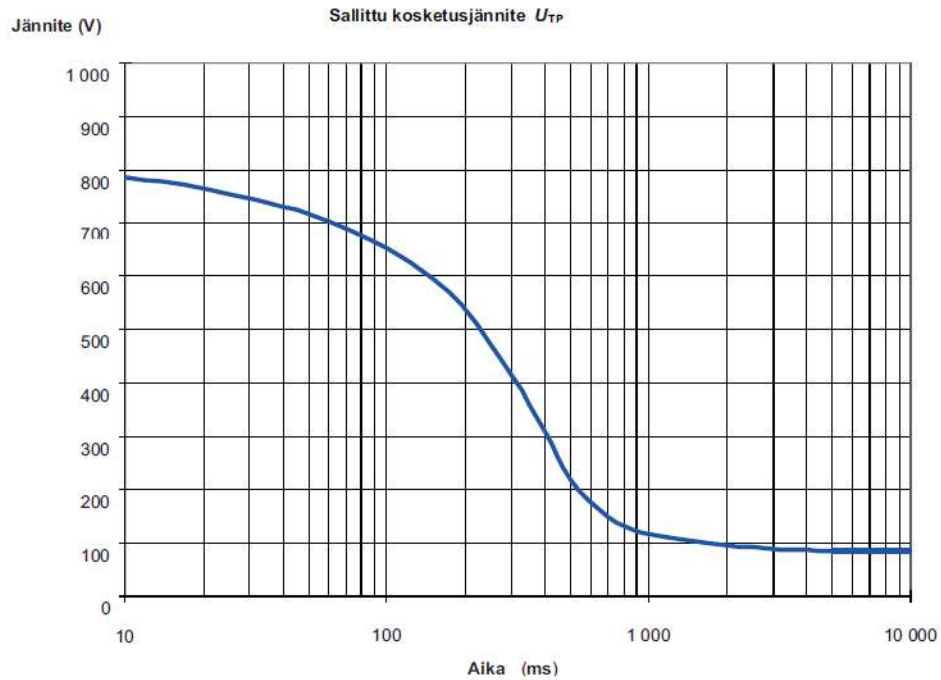
Kosketusjännite syntyy kosketustilanteessa ja sillä tarkoitetaan ihmiskehon kosketuskohdan ja maan välisen potentiaalieron välistä jännitettä. Askeljännitteellä tarkoitetaan kosketusjännitettä, joka vaikuttaa kahden jalan välillä samanaikaisesti kosketettavien pisteiden välistä potentiaaliero. Suurimmat kosketusjännitteet ovat maasulussa olevan kohteen läheisyydessä. (Elovaara, Haarla, 2011) Maadoitusjärjestelmät täytyy suunnitella siten, että vikavirtojen aiheuttamat askel- ja kosketusjännitteet pysyisivät hyväksytyillä tasoilla. Kosketusjännitteen sallitut arvot riippuvat siitä, kuinka kauan vikavirrat vaikuttavat ja siitä kuinka todennäköisiä kosketusjännitteiden aiheuttamat riskit ovat. Yleissääntönä voidaan pitää sitä, että jos kosketusjännitevaatimukset täyttyvät niin täyttyvät myös askeljännitevaatimukset (SFS 6001).

Sallittujen kosketusjännitearvojen katsotaan täyttyvän jos

– joko jompikumpi seuraavista ehdoista toteutuu:

- ”Kyseessä oleva asennus on osa laajaa maadoitusjärjestelmää.”

- ”Mittauksin tai laskennallisesti määritetty maadoitusjännite ei ole suurempi kuin kuvan 3.3 mukaisen sallitun kosketusjännitteen arvo kaksinkertaisena.” (SFS 6001)



Kuva 3.3. Sallitut kosketusjännitteet. (SFS 6001)

Kosketusjännitteet voidaan laskea yhtälöillä 3.1 ja 3.2:

$$U_{Tp} = I_B(t_f) * \frac{1}{HF} * Z_T(U_T) * BF \quad (3.1)$$

missä

U_T = kosketusjännite

U_{Tp} = sallittu kosketusjännite

t_f = vian kesto aika

$I_B(t_f)$ = kehon kautta kulkevan virran raja-arvot

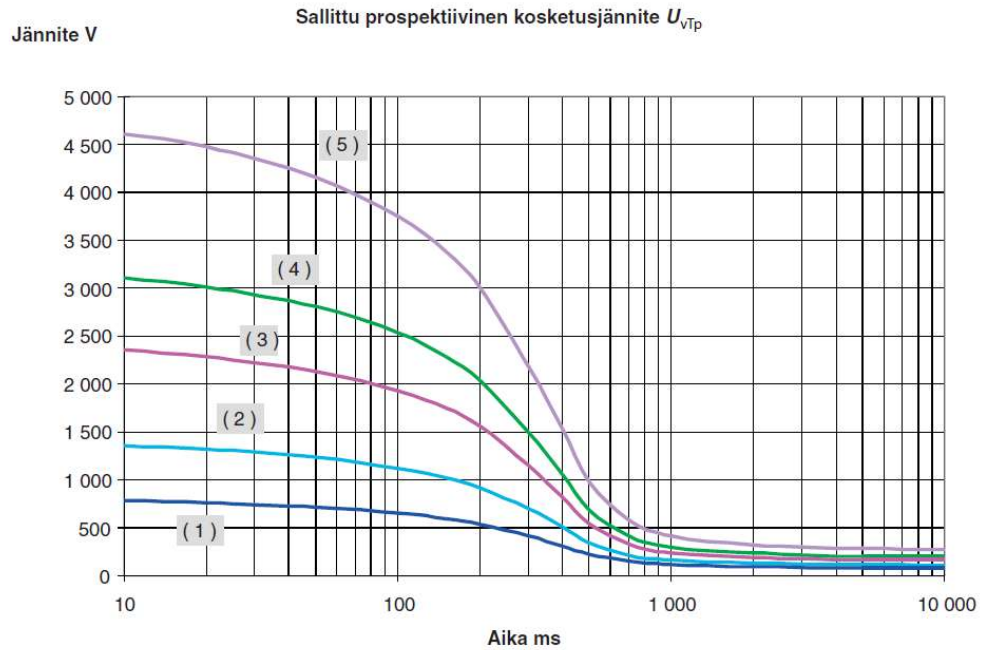
HF = sydämen virtakerroin

$Z_T(U_T)$ = kehon impedanssi

BF = kehon kerroin.

(SFS 6001)

Sallitun kosketusjännitteen suuruuteen vaikuttaa ihmisen kehon impedanssi, maaperä ja erilaiset lisäresistanssit, esimerkiksi jalkineet. Erilaisilla lisäresistansseilla saadaan vaikutettua sallittuihin kosketusjännitteisiin. Prospektiiviset kosketusjännitteet eri lisävastuksilla on esitetty kuvassa 3.4.



Kuva 3.4. Sallitut prospektiiviset kosketusjännitteet. (1) Sallittu kosketusjännite katso kuva 3.3 (2) $R_F = 750 \Omega$ ($R_{F1} = 0 \Omega$, $\rho_s = 500 \Omega m$) (3) $R_F = 1750 \Omega$ ($R_{F1} = 1000 \Omega$, $\rho_s = 500 \Omega m$) (4) $R_F = 2500 \Omega$ ($R_{F1} = 1000 \Omega$, $\rho_s = 1000 \Omega m$) (5) $R_F = 4000 \Omega$ ($R_{F1} = 1000 \Omega$, $\rho_s = 2000 \Omega m$) (SFS 6001)

Kun lisäresistanssit otetaan huomioon, saadaan yhtälöksi:

$$U_{vTp} = I_B(t_f) * \frac{1}{HF} * (Z_T(U_T) * BF + R_H + R_F) \quad (3.2)$$

missä

U_{vTp} = Sallittu prospektiivinen kosketusjännite

R_H = käden lisäresistanssi

R_F = jalan lisäresistanssi.

(SFS 6001)

Käyrä 1, joka on sama kuin kuvassa 3.3 esiintyvä käyrä kuvaa tilannetta, jossa ei ole lisäresistansseja huomioitu ollenkaan. Jännite edustaa tilannetta, jossa jännite voi vaikuttaa ihmiskehossa paljaasta kädestä paljaaseen jalkaan. On sallittua kuitenkin käyttää käyriä, joissa on huomioitu lisäresistanssit (SFS 6001). Jos voidaan kohtuudella olettaa ihmisten käyttävän jalkineita, pätevät käyrät 2-5. Näissä huomioidaan jalkineet sekä maanpinnan resistiivisyydet eri maadoitusolosuhteissa.

3.2.2 Sähköturvallisuuslaki

Sähköturvallisuuslain (STL 1135/2016 pykälän § 6) mukaan sähkölaitteita ja -laitteistoja koskevat yleiset vaatimukset:

“Sähkölaitteet ja -laitteistot on suunniteltava, rakennettava, valmistettava ja korjattava niin sekä niitä on huollettava ja käytettävä käyttötarkoituksensa mukaisesti niin, että:

- 1) niistä ei aiheudu kenenkään hengelle, terveydelle tai omaisuudelle vaaraa;*
- 2) niistä ei sähköisesti tai sähkömagneettisesti aiheudu kohtuutonta häiriötä;*
- 3) niiden toiminta ei häiriinny helposti sähköisesti tai sähkömagneettisesti.*

Jos sähkölaitte tai -laitteisto ei täytä 1 momentissa säädettyjä edellytyksiä, sitä ei saa saattaa markkinoille, luovuttaa toiselle eikä ottaa käyttöön.” (STL 1135/2016 pykälän § 6)

Sähköturvallisuuslain mukaan sähkölaitteistolle on tehtävä käyttöönottotarkastus ennen sen käyttöönottoa.

3.2.3 Standardit

Sähkoradoilla olevien sähköasennusten on täytettävä sähköasennusten turvallisuuteen liittyvät suomalaiset viranomaismääräykset. Turvallisuusvaatimukset ja EU:n rautatiedirektiivien vaatimukset täyttyvät näitä standardeja ja ohjeita noudattamalla:

- Sähköturvallisuuslaki (1135/2016 ja muutokset)
- Trafín julkaisemat rautateitä koskevat määräykset
- SFS-EN 50341-1 Vaihtosähköilmajohdot yli 45 kV jännitteellä. Osa 1: Yleiset vaatimukset, yhteiset määrittelyt.
- SFS-EN 50341-3-7 Vaihtosähköilmajohdot yli 45 kV jännitteellä Osa 3-7: Suomen kansalliset velvoittavat määrittelyt
- SFS-EN 50423-1 Vaihtosähköilmajohdot yli 1 kV ja korkeintaan 45 kV jännitteellä. Osa 1: yleiset vaatimukset, yhteiset määrittelyt.
- SFS 6000 Pienjännitesähköasennukset
- SFS 6001 Suurjännitesähköasennukset

- SFS 6002 Sähkötyöturvallisuus
 - SFS 6003 Pienjänniteilmajohdot
- (Liikennevirasto, 2018)

EU:n direktiiveissä vaaditaan Euroopan laajuisen rautatiejärjestelmän yhteentoimivuutta. Yhteentoimivuuden teknisiä eritelmiä (YTE) sovelletaan uusiin, uudistettuihin tai parannettuihin osajärjestelmiin. Rautatiesähköistykseen on olemassa kansainvälisiä EN-standardeja. Ensisijaisesti Suomessa noudatetaan kuitenkin Liikenneviraston ohjeita.

3.2.4 Fingrid liityntävaatimukset

Fingridillä on tiettyjä vaatimuksia liityntäpisteiden relesuojaukselle. Suojaus täytyy suunnitella siten, ettei se heikennä kantaverkon käyttövarmuutta. Vikojen irtikytkentäaikojen täytyy toimia yhteensopivasti kantaverkon kanssa. Lisäksi kantaverkkoon liittyvien sähkölaitteistojen on täytettävä Fingridin yleisten liittymisehtojen mukaiset taajuus- ja jännitealuevaatimukset. Liittyjän vastuulla on se, että jännite- ja taajuusvaihtelut eivät aiheuta vahinkoja asiakkaiden tai muiden tahojen sähkölaitteistoille. Tämä voidaan varmistaa yli- ja alijännitesuojilla sekä taajuussuojauksella. Jännitesuojausta ei tarvitse toteuttaa 110 kV verkon puolella. Alajännitepuolella yli- ja alijännitesuojausta voidaan tarvita sähkölaitteistojen suojelemiseksi. (Fingrid, 2022)

Asiakkaan 110 kV verkossa tapahtuvien vikojen täytyy poistua pääsuojauksella viimeistään 0,1 s kuluessa ja varasuojauksella viimeistään 0,5 s kuluessa, pois lukien suuriresistanssiset maasulut. Suuriresistanssisten maasulkujen poistamiseen käytetään suojausta, jonka toiminta-aika yleensä on 1 s tai nopeampi, suojauksen täytyy myös olla yhteensopiva kantaverkon muun suojauksen kanssa. Säteisjohtojen tapauksessa on kuitenkin syytä käyttää nopeampaa toiminta-aikaa selektiivisyyden takia sekä jännitekuoppien lyhentämiseksi. Asiakkaan asemat, jotka ovat alle 5 Ω päässä Fingridin asemista suositellaan varustettavan kiskosuojilla, koska kiskoissa tapahtuvat viat aiheuttavat jännitekuoppia. Jos asema on pieni, kiskosuojaus voidaan toteuttaa esim. muuntajan differentiaalisuojauksella. (Fingrid, 2022)

Suojaus on toteutettava kahdennettäsi asiakkaan sähköverkoissa. Suojaus voidaan toteuttaa joko kahdella pääsuojalla tai pää- sekä varasuojalla. Varasuojauksena voi toimia myös

asiakkaan viereisen sähköaseman suojaus. Yhden voimajohdon puuttuminen ei saa vaikuttaa pääsuojan toimintaan ja varasuojauksen toiminta saa taas hidastua mutta se ei saa estyä kokonaan. (Fingrid, 2022)

Asiakkaan liittyessä kantaverkon 110 kV voimajohtoon asiakkaan muuntaja suositellaan suojattavan differentiaalisuojauksella. Kantaverkon voimajohdon viiveetön suojaus ulottuu myös asiakkaan haarajohdolle. Tästä syystä myös asiakkaan suojaus täytyy olla viiveetön, jotta katkaisija ei jäisi kiinni kantaverkon katkaisijan avautuessa. Tässä tapauksessa kantaverkossa tapahtuva jälleenkytkentä tapahtuisi asiakkaan katkaisijan ollessa kiinni. Jos vika olisi asiakkaan verkossa, koko kantajohdon alueen asiakkaat jäisivät ilman sähköä jälleenkytkennän epäonnistuessa. Selektiivisyyden takia asiakkaan haarajohdossa ei saa käyttää pikajälleenkytkentää. Pikajälleenkytkennän sijasta voidaan käyttää jälleenkytkentää jonka toimintanopeus on 5-15 s, se on nopeampi kuin Fingridin verkon voimajohdon aikajälleenkytkentä. Herkkä maasulkusuojaus ei saa käynnistää jälleenkytkentää. Herkän maasulkusuojauksen (60 A) on toimittava alle 1 s. Jos asiakkaan voimajohdoille kytkettävän muuntajan oikosulkureaktanssi on yli 48 Ω , alajännitepuolen kisko-oikosuljen ja johtolähtöjen alun oikosulkujen laukaisuaika saa olla enintään 1 s. Jos muuntajan oikosulkureaktanssi on alle 48 Ω , laukaisuaika näissä tapauksissa saa olla enintään 0,2 s. (Fingrid, 2022)

3.3 Ylivirtasuojaus

Ylivirtasuojaus toimii, kun mitattu virta-arvo ylittää asetteluarvon. Ylivirtasuojaus voidaan toteuttaa joko suunnattuna tai suuntaamattomana. Ylivirtasuojauksessa käytetään tyypillisesti useampaa porrasta. Toiminta-aika voi olla vakio- tai käänteisaikainen. Oikeaoppisen ylivirta-asettelun saavuttaminen vaatii pienimmän ja suurimman oikosulkuvirran tuntemista. Releet asetellaan muutosoikosulkuvirran mukaan (Mörsky, 1993). Ylivirtasuojauksella suojaudutaan ylikuormitusta ja oikosulkuja vastaan.

3.3.1 Oikosulkusuojaus

Oikosulussa vika voi sulkea virtapiirin joko suoraan, valokaaren tai ulkoisen impedanssin kautta. Oikosulkuvirralla on tyypillistä se, että se on suurempi kuin kuormitusvirta. Vika on joko vaiheiden tai vaiheen ja maan välillä. Maasulkuvirran suuruus riippuu siitä, kuinka verkon tähtipiste on maadoitettu.

Theveninin menetelmällä voidaan laskea oikosulkuvirran suuruus. Oikosulkuvirran laskemiseksi pitää tietää vikapaikan jännite ja impedanssi. (Lakervi, Partanen, 2008)

3.3.2 Oikosulkupiirin impedanssien laskenta

Sähköverkkojen oikosulkupiirin impedansseja laskettaessa täytyy impedanssit redusoida vikapaikan jännitetasolle. Muuntajan yläjännitepuolen syöttöverkon resistanssi ja reaktanssi voidaan redusoida yläjännitepuolelta alajännitepuolelle yhtälöillä (ABB,2000c):

$$R_{toisio} = R_{ensio} * \left(\frac{U_{toisio}}{U_{ensio}}\right)^2 \quad (3.3)$$

$$X_{toisio} = X_{ensio} * \left(\frac{U_{toisio}}{U_{ensio}}\right)^2 \quad (3.4)$$

missä

R_{ensio} = Syöttöverkon resistanssi muuntajan yläjännitepuolella.

R_{toisio} = Syöttöverkon resistanssi redusoituna muuntajan alajännitepuolelle.

U_{ensio} = Muuntajan yläjännitepuolen jännite.

U_{toisio} = Muuntajan alajännitepuolen jännite.

X_{ensio} = Syöttöverkon reaktanssi muuntajan yläjännitepuolella.

X_{toisio} = Syöttöverkon reaktanssi redusoituna muuntajan alajännitepuolelle.

Muuntajan sisäinen impedanssi, resistanssi ja reaktanssi voidaan laskea yhtälöillä 3.5, 3.6 ja 3.7. Muuntajan tyyppikilvessä ilmoitetaan yhtälöissä tarvittavat muuttujat.

Muuntajan impedanssi lasketaan yhtälöllä (ABB,2000b):

$$Z_k = \frac{z_k}{100} * \frac{U_{toisio}^2}{S_n} \quad (3.5)$$

missä

Z_k = Muuntajan oikosulkuimpedanssi.

z_k = Muuntajan suhteellinen oikosulkuimpedanssi.

S_n = Muuntajan nimellisteho.

Muuntajan resistanssi lasketaan yhtälöllä (ABB,2000b):

$$R_k = \frac{P_k}{S_n} * \frac{U_{toisio}^2}{S_n} \quad (3.6)$$

missä

R_k = Muuntajan oikosulkuresistanssi.

P_{kn} = Muuntajan kuormitushäviöt.

Muuntajan reaktanssi lasketaan yhtälöllä (ABB,2000b):

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (3.7)$$

missä

X_k = Muuntajan reaktanssi.

Avojohtojen ja kaapelien reaktanssit ja resistanssit lasketaan yhtälöillä (Lakervi, Partanen, 2008):

$$R_j = r_j * l_j \quad (3.8)$$

$$X_j = x_j * l_j \quad (3.9)$$

missä

R_j = Avojohtojen tai kaapelien resistanssi

r_j = Avojohtojen tai kaapelien resistanssi kilometriä kohden

l_j = Avojohtojen tai kaapelien pituus kilometreissä

X_j = Avojohtojen tai kaapelien reaktanssi

x_j = Avojohtojen tai kaapelien reaktanssi kilometriä kohden

Oikosulkupisteen sijainnin mukaan oikosulkupiiriin vaikuttavat resistanssit ja reaktanssit lasketaan yhteen. Kolmivaiheiset oikosulkuvirrat lasketaan yhteenlaskettujen resistanssien ja reaktanssien avulla yhtälöllä (Lakervi, Partanen, 2008):

$$I_{k3} = \frac{1,1 * U_k}{\sqrt{3} * \sqrt{R_{sum}^2 + X_{sum}^2}} \quad (3.10)$$

missä

U_k = Oikosulkupisteen jännitetaso

I_{k3} = Kolmivaiheinen oikosulkuvirta

R_{sum} = Yhteenlaskettu resistanssi oikosulkupisteessä

X_{sum} = Yhteenlaskettu reaktanssi oikosulkupisteessä

Kolmivaihevirtoja laskettaessa käytetään neliöjuuri kolmea. Oikosulkuvirtoja laskettaessa käytetään keski- ja suurjännitteillä kerrointa 1,1 ja pienjännitteitä laskettaessa kerrointa 1,0. Kaksivaiheinen oikosulkuvirta voidaan laskea yhtälöllä (Lakervi, Partanen, 2008):

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} * I_{k3} \quad (3.11)$$

missä

I_{k2} = Kaksivaiheinen oikosulkuvirta

3.3.3 Terminen oikosulkukestoisuus

Oikosulkuvirrat aiheuttavat lämpenemisiä sähköverkon komponentteihin. Vakioaikaisilla ylivirtareleillä voidaan estää suojattavien laitteiden kuumeneminen asettelemalla suurille virta-arvoille lyhyet toiminta-ajat (Mörsky, 1993). Komponenttien terminen oikosulkukestoisuus ilmoitetaan yleensä virta-arvona, jonka komponentti kestää yhden sekunnin ajan. Termiseen oikosulkukestoisuuteen täytyy huomioida mahdolliset pika- (PJK) ja aikajälleenkytkennät (AJK). Jos käytössä on pelkästään PJK, johtimia lämmittäväksi ajaksi lasketaan suoraan oikosulkujen kestot PJK:n ennen ja jälkeen. Oikosulkujen kestoihin lasketaan suojareleiden asetteluarvojen lisäksi katkaisijoiden toiminta-ajat. AJK:n vaikutus ei ole niin suuri termiseen oikosulkukestoisuuteen, koska AJK:ssa jännitteetön aika on huomattavasti suurempi kuin PJK:ssa. (Lakervi, Partanen, 2008) AJK:ta edeltävänä aikana tapahtuva jäähtyminen otetaan huomioon seuraavalla yhtälöllä (Lakervi, Partanen, 2008):

$$t_{ekv} = t_1 * e^{\frac{-t_0}{\tau}} + t_2 \quad (3.12)$$

missä

t_{ekv} = ekvivalenttiaika

t_1 = oikosulun kesto aika ennen AJK:ta

t_0 = AJK:n jännitteetön aika

τ = jäähtymisaikavakio

t_2 = oikosulun kesto aika AJK:n jälkeen.

Jos komponenttiin vaikuttava ekvivalenttiaika on jotain muuta kuin 1 s, voidaan komponenttien terminen virrankesto kyseisellä ajan arvolla laskea yhtälöllä (Lakervi, Partanen, 2008):

$$I_{ekv} = \frac{I_{k1s}}{\sqrt{\frac{t_{ekv}}{s}}} \quad (3.13)$$

missä

I_{ekv} = termien virrankestoisuus ekvivalenttiajalla

I_{k1s} =virta, jolla komponentti kestää termisesti yhden sekunnin ajan

$s = 1$ s.

3.4 Maasulkusuojaus

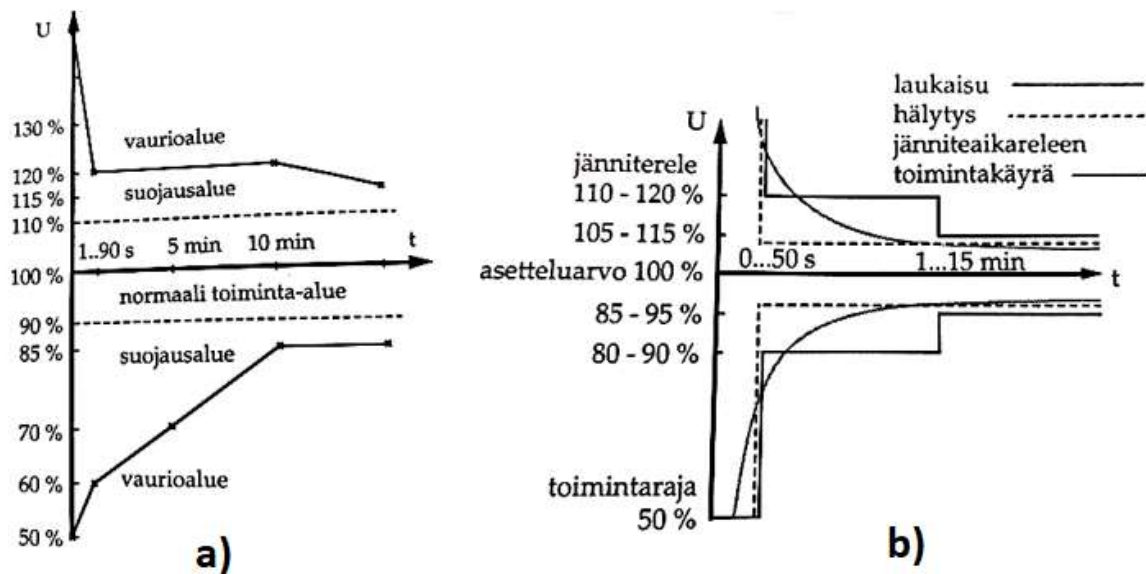
Maasulkusuojauksella suojataan vaiheen ja maan välisiä vikoja. Maasulkusuojaus voi perustua maasulkuvirtaan, nollajännitteeseen tai niihin molempiin. Maasulku syntyy eristevian tai muun ulkoisen vian aiheuttama. Maasulussa vaihe on yhteydessä maan tai maahan yhteydessä olevan johtimen kanssa. Maasulkusuojaus voidaan toteuttaa suuntaamattomana, jolloin suojauksen toteuttamiseen ei tarvita kuin nollavirran mittausta. Jos suojaus toteutetaan suunnattuna, tarvitaan myös nollajännitteen mittausta.

Sähköverkkojen maadoitustapa vaikuttaa maasulkuvian luonteeseen ja maasulkusuojauksen toteutukseen. Maadoitustavalla voidaan vaikuttaa maasulkuvirran suuruuteen tai maasulkuvian aikaisten terveiden jännitteiden suuruuteen. Suuren maasulkuvirran etuja olisi helposti toteutettava relesuojaus ja nopeat laukaisajat. Suuresta maasulkuvirrasta seuraa kuitenkin suuret askel- ja kosketusjännitteet, jotka voivat olla vaarallisia ihmisille. (Elovaara, Haarla, 2011)

Salamaniskut aiheuttavat tyypillisesti suuren määrän vikoja avojohtoverkkoihin. Salamaniskun aiheuttamissa maasuluissa syntyy valokaaria vaiheen ja maan välille. Maadoitetuissa verkoissa valokaaret eivät sammu itsestään, johtuen maasulkuvirran suuruudesta, niiden sammuttaminen tapahtuu erottamalla vikaantunut verkon osa verkosta. Maasta erotetuissa ja sammutetuissa verkoissa maasulkuvirta voi olla niin pieni, että valokaaret katkeavat itsestään ilman vikaantuneen verkon erottamista. (Elovaara, Haarla, 2011)

3.5 Jännitesuojaus

Yli- ja alijännitesuojaus toimii silloin kuin jännite laskee tai nousee yli aseteltujen arvojen. Jännitesuojauksella voidaan ehkäistä sähköverkossa olevien komponenttien sekä verkossa olevien asiakkaiden sähkölaitteiden rikkoutuminen. Kuvassa 3.5 on esitetty jännitteen vaikutus ajan suhteen laitteiden vikaantumiseen sekä jännitesuojien asettelukäyrät (Mörsky, 1993). Tyypillisesti jännitesuojissa käytetään huomattavasti pitempiä toiminta-aikoja kuin muissa suojissa. Suojaus voi olla laukaiseva tai hälyttävä. Suojaus ei saa laukaista lyhyiden jännitemuutoksien takia. Tällä estetään virheelliset laukaisut, jotka johtuvat muista vioista tai ohimenevistä ilmiöistä. Hetkellisiä ylijännitteitä voi aiheuttaa esimerkiksi ukkonen. Hetkellisiä alijännitteitä aiheuttavat oikosulut, pikajälleenkytkennät ja kuormien käynnistyminen. Jännitesuojien toiminta voidaan estää myös siinä tapauksessa, jos jännitemittauksen johdonsuojakatkaisija laukeaa.



Kuva 3.5 Jännitteen vaikutus laitevaurioihin a) sekä jännitesuojauksen toteutus b) (Mörsky, 1993. s.232-233)

Jännitteen ollessa suojausalueella vauriot ovat vähäisiä tai epätodennäköisiä. Kun jännite nousee tai tipahtaa vaurioalueelle, sähkölaitteiden viat ovat todennäköisiä ja laajamittaisia. Suojaus täytyykin toteuttaa siten, että se suojaus toimii suojausalueella. Kuvassa 3.5b on esitetty kiskojännitesuojan toimintakäyrät.

Normaalisti muuntajat pystyvät toimimaan 1,05 -kertaisella nimellisjännitteellä virran ja taajuuden ollessa nimellisiä. Jännitteen noustessa vielä tätäkin suuremmaksi ja taajuuden

pysyessä nimellisenä, ylijännite nostaa muuntajan magnetoimisvirtaa pahimmillaan se voi kasvaa kymmenen tai sata kertaa normaalia suuremmaksi. Tämä aiheuttaa muuntajan sydämen ja rakenteiden lämpenemistä, joka voi aiheuttaa vaurioita muuntajaan. (Mörsky, 1993)

Sähköverkkoa syöttävässä päämuuntajassa on tyypillisesti jännitteensäätö, jolla voidaan säätää alajännitepuolen jännitettä muuntajan käämikytkimen avulla. Muuntajan jännitteensäädön avulla ei voida kuitenkaan toteuttaa verkon jännitesuojausta, koska se ei ole riittävän nopea eikä sen säätövara ole riittävä. Jännitesuojaukseen tarvitaankin kiskojännitteiden valvoja, joka hoitaa ali- ja ylijännitesuojauksen. Jännitesuojaus laukaisee tyypillisesti muuntajakatkaisijan. (Mörsky, 1993)

Moottorisuojauksessa käytetään sekä yli- että alijännitesuojausta. Ylijännite vahingoittaa moottorin eristyksiä ja alijännite kasvattaa moottorin ottamaa virtaa ja ylikuormitusta. Moottorit suojataan ylijännitesuojalla, joka laukaisee jännitteen ollessa pysyvästi 15-20 % yli nimellisen. Alijännitesuoja laukaisee, mikäli kiskosto tulee alijännitteiseksi tai jännitteettömäksi. (Mörsky, 1993)

3.6 Päämuuntajan suojaaminen

Suuret muuntajat ovat hankintahinnaltaan kalliita, joten suojauksen on oltava toimintavarma ja nopea, tällä tavoin voidaan ehkäistä muuntajaan syntyviä vaurioita. Muuntajan vaurioitumisesta seuraa hidas ja kallis korjaus. Erilaisia syitä muuntajavikojen aiheuttajiksi ovat kytkentäylijännitteet, ulkoisten oikosulkuvikojen aiheuttamat voimavaikutukset muuntajan käämeissä, osittaispurkaukset eristyksessä, vanhentunut ja pilaantunut muuntajaöljy sekä eristyksen vanheneminen pitkäaikaisen ylläampötilan vaikutuksesta (Mörsky, 1993). Muuntajaviat ovat hyvin harvinaisia verrattuna muihin sähköverkon vikoihin.

3.6.1 Muuntajan ylivirtasuojaus

Muuntajan ylivirtasuojaus kattaa sekä muuntajan ulkoiset ja sisäiset viat. Jos muuntajaa voidaan syöttää vain yhdestä suunnasta niin tällöin riittää, että ylivirtasuojaus toteutetaan vain yläjännitepuolella. Jos muuntajaa voidaan syöttää myös alajännitepuolen kautta niin silloin ylivirtasuojaus täytyy toteuttaa muuntajan molemmin puolin. (Mörsky, 1993)

Muuntajasuojauksessa voidaan käyttää kahta ylivirtavirtaporrasta. Ensimmäisellä hitaalla ylivirtaportaalla suojataan muuntajan alajännitepuolen navoissa tapahtuvia vikoja sekä alajännitepuolen kiskossa tapahtuvia vikoja vastaan. Releen asetteluarvon täytyy olla suurempi kuin muuntajan sallittu ylikuormitettavuus on. (Mörsky, 1993) Releen asettelua määrittäessä täytyy muistaa muuntajan kytkentävirtasysäys. Asetteluarvot on hyvä määrittellä kytkentävirtasysäys huomioon ottaen. Kuten differentiaalisuojauksen yhteydessä niin, myös tämän ylivirtasuojauksen yhteydessä voidaan käyttää toisen harmonisen lukitusta.

Toisella ylivirtaportaalla suojataan muuntajan yläjännitepuolella tapahtuvia vikoja. Toinen ylivirtaportas on pikalaukaisuportas ja sen tarkoituksena on poistaa viat nopeasti. Normaalisti toisen portaan asetteluarvo on niin suuri, että kytkentävirtasysäys ei ole siihen vaikusta. Muuntajan sisäisten vikojen tapauksessa on tärkeää, että toinen ylivirtaportas poistaa vian nopeasti, jotta vauriot jäisivät mahdollisimman pieniksi.

Yleensä suuremmat muuntajat varustetaan vakavoidulla differentiaalisuojalla, jonka takia muuntajan ylivirtasuojat toimii muuntajan sisäisissä vioissa varasuojana.

3.6.2 Muuntajan maasulkusuojaus

Jos muuntajan yläjännitepuolen verkko on tehollisesti maadoitettu, voidaan kolmivaiheista ylivirtarelettä käyttää myös yläjännitepuolen maasulkujen suojaamiseen. Yleensä tämä ei riitä, vaan tarvitaan myös erillinen maasulkusuojaus, tämä johtuu maasulkuvirran suuruuden vaihteluista. Maasulkuvirran ollessa pieni pitää se pelkistää kuormitusvirrasta muuntajan ensiöpuolella. Pelkistämisen toteutustapa riippuu muuntajan kytkentäryhmästä ja verkon maadoitustavasta. Jokaisessa tavassa voidaan käyttää hyväksi suojauslaitteiden summavirtakytkentää. Muuntajasuojan maasulkusuojaukselta on aina hidastettava, jotta sähköverkossa tapahtuvat maasulut saadaan poistettua tarvittaessa aikaisemmin toisilla katkaisijoilla. (Mörsky, 1993).

3.6.3 Muuntajan primäärisuojat

Suuremmissa muuntajissa käytetään kiinteitä sisäisiä suojauslaitteita, niitä kutsutaan muuntajan primäärisuojiksi. Muuntajasuojat suojaavat muuntajan sisäisiltä vaurioilta. Muuntajasuojia

ovat kaasurele, käämin ja öljyn lämpötilamittari, öljyn korkeusmittari, virtausrele ja painerele. Muuntajasuojat laukaisevat muuntajan ylä- ja alajännitepuolen katkaisijat.

Kaasurele on tärkein muuntajan primäärisuojista. Kaasurele sijaitsee muuntaja- ja paisuntasäiliön välisessä putkessa. Kaasurele suojaa muuntajan eristysvioissa, kuten käämi-, kierros- ja runkosulkujen tapauksissa. Kaasureleessä on hälytys- ja laukaisukoskettimet. Pie-nissä eristevioissa kaasurele antaa ensin hälytyksen ja jos vika pahenee entisestään kaasurele antaa laukaisukäskyn. Pahat eristysviat aiheuttavat paineaallon ja öljy syöksyy muuntajasäiliöstä öljysäiliöön. Tällöin kaasurele antaa nopean laukaisukäskyn katkaisijalle. Kaasureleet kykenevät toisinaan ennakoimaan tulevia eristevikoja. Kaasureleen toimittua siihen kerääntynyt kaasu otetaan talteen ja kaasua analysoimalla voidaan todeta vian vakavuus sekä vika-paikka ja -tyyppi (Mörsky, 1993).

Käämin ja öljyn lämpötilamittareita käytetään, kun suojataan muuntajaa ylikuormituksia vastaan. Lämpötiloista voidaan antaa ensin hälytys ja lämpötilan edelleen noustessa laukaisukäsky katkaisijalle. Näiden lisäksi on olemassa myös öljyn korkeusmittari, joka antaa hälytyksen öljyn määrän ollessa ylä- tai alatasolla.

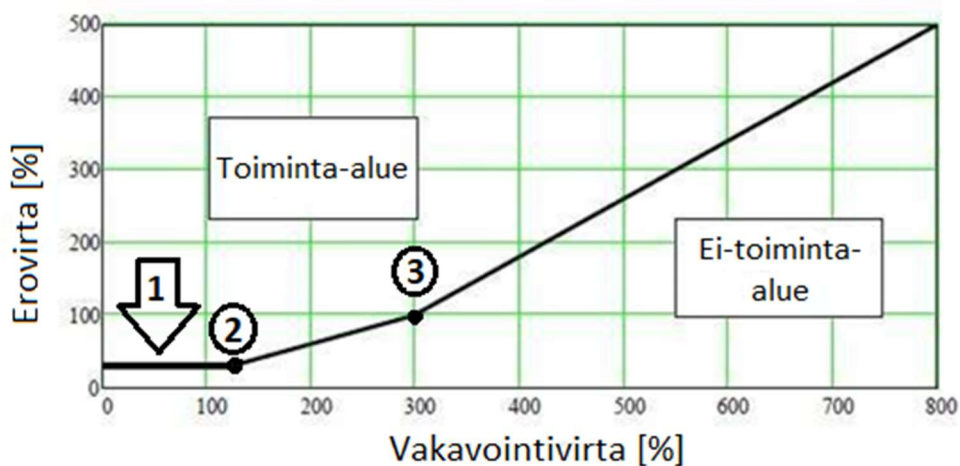
Virtaus- ja ylipainereleellä suojataan käämikytkintä. Se kumpaa relettä käytetään, riippuu käämikytkimen rakenteesta. Virtausrele sijaitsee käämikytkimen yläosan ja paisuntasäiliön välisessä putkessa. Virtausrele havahtuu, kun öljy virtaa käämikytkimen yläosasta paisuntasäiliöön. Painerele sijaitsee käämikytkimen yläosassa ja se havahtuu, kun paine nousee epänormaalin suureksi käämikytkimen tehokytkinosassa. Käämikytkintä voidaan suojalle ylivirtalukituksella. Tällöin estetään käämikytkimen toiminta liian suurilla ylivirroilla. Lukitus voidaan toteuttaa joko yläjännitepuolen ylivirtausojauksen avulla, jos asetteluarvo on sopiva tai omalla ylivirtasuojauksella. (Mörsky, 1993)

3.7 Differentiaalisuojaus

Differentiaalisuojausta voidaan käyttää esimerkiksi muuntajien, kiskostojen ja lyhyiden johtojen suojauksessa ja sen toiminta perustuu erovirtaan. Rele mittaa suojattavaan kohteeseen tulevia ja lähteviä virtoja. Jos nämä virrat eroavat toisistaan joko amplitudin tai vaihekulman perusteella yli annettujen asetteluarvojen rele antaa laukaisukäskyn. Differentiaalisuojaus on absoluuttisesti selektiivinen, koska suojaus toimii ainoastaan

omalla suojausalueellaan. Differentiaalisuojaus on todella nopea, jopa alle puolijakson pituinen. Suojausalue muodostuu tulevien ja lähtevien virtojen mittausalueen väliin jäävästä alueesta.

Suojarele laskee erovirran suojattavan kohteen molemmin puolin olevista virtamuuntajien mittauksista. Erovirta ei käytännössä kuitenkaan ole nolla edes terveessä tilanteessa. Tämä johtuu virtamuuntajien mittausvirheistä, muuntajan aiheuttamasta tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöistä, käämikytkimen asennosta sekä hetkellisestä muuntajan antamasta kytkentävirtasysäyksestä. Erovirran suuruus, joka johtuu mittausvirheistä ja käämikytkimen asennosta, on suoraan verrannollinen muuntajan läpi menevän virran suuruuteen. Näennäiserovirran kannalta mittausvirhe on ongelmallinen silloin, kun vika on juuri suojausalueen ulkopuolella. Muuntajan läpimenevä virta on tällöin suuri ja se saattaa myös sisältää DC-komponentin, joka voi aiheuttaa virtamuuntajien eriaikaisen kyllästymisen, joka kasvattaa hetkellisesti erovirtaa. Suojan virheellistä toimintaa voidaan estää käyttämällä vakavointia. Vakavointi tarkoittaa sitä, että mitä suurempi läpimenevä virta on niin sitä suurempi pitää erovirran olla, jotta rele antaa laukaisukäskyn. Kuvassa 3.6 on esitetty vakavoidun differentiaalisuojan toimintakäyrä. Toimintakäyrän muoto muodostuu perusasettelusta, havahtumissuhteesta sekä toisesta käännepisteestä.



Kuva 3.6. Vakavoidun differentiaalisuojan karakteristika, (1.) perusasettelu, (2.) havahtumissuhde, (3.) toinen käännepiste.

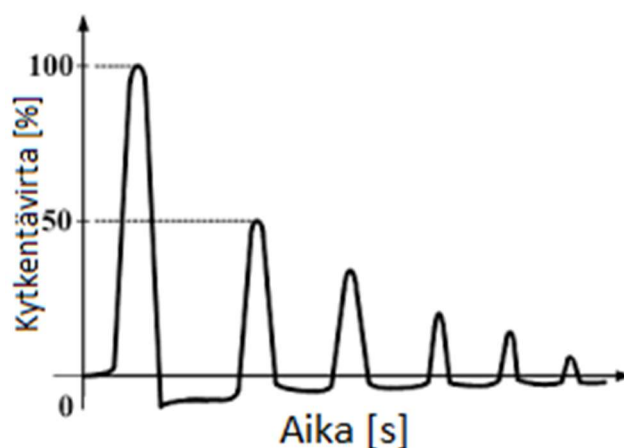
Perusasettelu kuvassa 3.6 (kohta 1) määrää suojauksen perusasattelun silloin, kun muuntaja on tyhjäkäynnissä. Jotta suojaus ei toimisi virheellisesti, pitää perusasettelu määrittellä suuremmaksi kuin muuntajan magnetointivirta tai suurimmalla käyttöjännitteellä oleva

johdon varausvirta. Perusasettelun arvo vaikuttaa koko toimintakäyrään ja siten toimintaherkkyteen suuremmilla vakavointivirran arvoilla.

Havahtumissuhde kuvassa 3.6 (kohta 2) huomioi läpimenevän virran suoraan verrannollisia erovirtoja. Suurta herkkyyttä ja toimintanopeutta suojaukselta vaativia vikoja ovat esimerkiksi käämi- ja kierrossulut sekä käämeissä ja suojausalueella tapahtuvat maasulut. Suojauksen toimintaherkkyuden muuntajien sisäisissä vioissa määrää havahtumissuhde ja toinen käänneaste.

Toinen käänneaste kuvassa 3.6 (kohta 3) vaikuttaa myös suojaukseen suojausalueen ulkopuolella olevia vikoja vastaan. Tällä on mahdollista estää suojan virheellinen laukaiseminen näissä suojausalueen ulkopuolella olevien vikojen tapauksissa. Mitä pienempi toisen käänneasteen asettelu on sitä varmemmin se estää virhelaukaisut ulkopuolisissa vioissa, mutta jos asettelu on liian pieni saattaa se heikentää suojausten toimintaherkkyttä muuntajan sisäisissä vioissa. Toisen käänneasteen asettelemisessa täytyy ottaa huomioon virtamuuntajien toistokyky, vikavirtatasot, syöttösuunnat sekä herkkyyksivaatimukset.

Kun muuntaja kytketään verkkoon, tapahtuu virtasysäys, joka näkyy melkein kokonaan erovirtana. Kuvassa 3.7 on esitetty kytkentävirtasysäys ajan funktiona.



Kuva 3.7. Muuntajan kytkentävirtasysäys ajan funktiona.

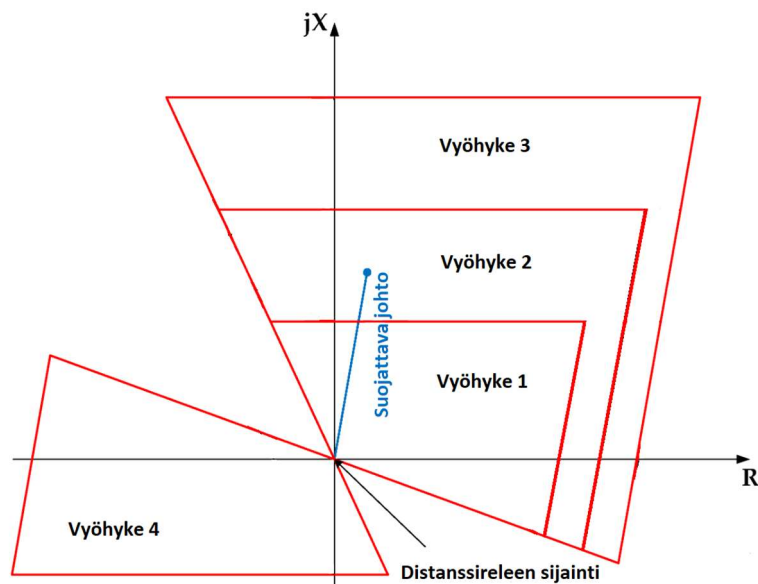
Kuvassa 3.7 näkyy, kuinka muuntajan ottama virta on kytkentävirtasysäyksen takia suuri ja laskee ajan funktiona, kunnes saavuttaa normaalin tilansa, joko tyhjäkäynti- tai kuormitusvirran mukaisen virran. Kytkentävirtasysäys aiheuttaa ongelmia myös vakavoidun

suojan toiminnalle. Suojauksen vakavointi ei riitä estämään laukaisua, vaan tämän lisäksi tarvitaan erovirran toisen harmonisen lukitustoiminta. Kytkevätvirtasysäys sisältää runsaasti toista harmonista yliaaltoa.

Toisen harmonisen yliaallon lukituksen lisäksi voidaan käyttää myös viidennen harmonisen yliaallon lukitusta. Tätä käytetään kyllästyneen muuntajan magnetointivirtaa vastaan. Magnetointivirta näkyy melkein kokonaan erovirtana. Magnetointivirta sisältää runsaasti viidettä harmonista yliaaltoa. (ABB,2000b)

3.8 Distanssisuojaus

Distanssisuojauksen periaate on, että suojarele mittaa sijoituspaikkansa ja vikapaikan välisen johtimen impedanssia. Impedanssin avulla rele pystyy määrittämään, kuinka kaukana vikapaikka on. Rele antaa laukaisukäskyn, kun mitattu impedanssi laskee alle asetellun arvon. (Mäkinen,2008) Kuvassa 3.8 on esitetty distanssisuojauksen vyöhykkeet (R, X) -koordinaatissa. Uusissa releissä vyöhykkeiden muotoihin pystyy vaikuttamaan eikä niiden enää tarvitse olla pyöreitä, kuten kuvassa 3.2.



Kuva 3.8. Distanssisuojauksen vyöhykkeet. Kuvassa vyöhykkeet 1-4 ja suojattavan johdon kulma.

Distanssisuojauksessa on tyypillisesti useita vyöhykkeitä, joista lähimpänä suojauspistettä olevalla vyöhykkeellä on lyhyin toiminta-aika ja kauimpana olevalla pisin toiminta-aika.

Tällä tavoin saadaan varmistettua suojauksen selektiivisyys. Toisin kuin ylivirtasuojauksessa distanssisuojauksen toimintaan ei vaikuta verkossa tehtävät kytkentätilanteen muutokset (Mörsky, 1993). Distanssisuojauksen eri vyöhykkeet voidaan suunnata siten, että se toimii joko eteen- tai taaksepäin olevissa vioissa. Kuvassa 3.8 vyöhykkeet 1-3 ovat suunnattu eteenpäin ja vyöhyke 4 taaksepäin. Distanssireleen sijainti on origossa.

Distanssisuojauksella voidaan suojautua vaiheiden välisiä sekä vaiheen ja maan välisiä vikoja vastaan. Suojareleissä näille vikatyypeille annetaan omat parametrinsa. Distanssireleellä voidaan suojata suurivirtaisia maasulkuvirtoja noin 20 Ω vikavastukseen saakka. Suomessa on kuitenkin tyypillisesti ollut vaatimuksena, että maasulkuviat pitäisi pystyä laukaisemaan 500 Ω vikavastukseen saakka (Elovaara, Haarla, 2011). Tämän takia distanssisuojausta ei voi käyttää ainoana maasulkusuojana vaan se tarvitsee aina rinnalleen myös jonkun muun maasulkusuojauksen.

Impedanssisuojauksella saavutetaan seuraavia etuja. Distanssisuojaus ei ole riippuvainen syöttöverkon impedanssista kuten ylivirtasuojaus. Kuormitusalueet ovat selkeästi määriteltäviä ja distanssisuojaus voidaan asettaa herkemäksi vioille kuin ylivirtasuojaus. Distanssisuojaus ei ole herkkä kuorman käynnistymisille ja näistä aiheutuville ilmiöille kuten kytkentävirtasäykselle. Distanssisuojaus antaa arvion vikapaikasta, jonka avulla sähköverkon palauttaminen normaaliin tilaan nopeutuu. (Novo, Teston, 2014)

3.9 Vikojen paikantaminen

Sähköverkoissa tapahtuvia vikoja voidaan paikantaa suojareleillä. Vikapaikan etäisyyden avulla saadaan arvio vikapaikasta ja näin vikapaikan löytyminen nopeutuu. Nopeutumisesta seuraa, se että sen avulla voidaan palauttaa nopeammin sähköt terveeseen verkon osaan ja myös vikaantuneen verkon osan korjaaminen nopeutuu. Jotta vikapaikan etäisyyden määrittäminen onnistuu, pitää olla tiedossa verkon tarkat parametrit.

Vikapaikan etäisyyttä voidaan mitata impedanssimittauksella, jonka toimintaperiaate on sama kuin distanssisuojauksella (Mörsky, 1993). Impedanssimittaukseen tarvitaan jännite- ja virtamittaukset. Vikapaikan etäisyys voidaan saada selville myös ylivirtasuojauksen avulla (Mörsky, 1993). Suojarele päättelee virta-arvon perusteella, kuinka kaukana vika on.

Jos johtolähdön perässä olevassa verkossa on useampia haaroja niin rele voi antaa useamman mahdollisen vikapaikan.

3.10 Selektiivisyys

Selektiivisyydellä tarkoitetaan sitä, että vain vikaantunut verkon osa tai komponentti erotetaan muusta verkosta. Tällä tavalla varmistetaan, että haitat sähkökäyttäjille jäävät mahdollisimman pieniksi. Selektiivisyydellä tarkoitetaan myös sitä, että kaikki verkon osat ja alueet ovat suojattu, jollain suojareleellä. Selektiivisessä verkossa mikään verkon osa ei jää suojaamatta. (Elovaara, Haarla, 2011) Suojareleen nopealla toiminnalla voidaan vaikuttaa selektiivisyyteen. Tällä tavalla lähellä olevat viat voidaan poistaa kauempana olevia vikoja nopeammin.

Sähköverkossa on useita suoja-alueita, joita rajoittavat suojareleiden ohjaamat katkaisijat. Suojaus on aukoton, jos vierekkäiset suoja-alueet peittävät osaksi toisensa. Suojaus on absoluuttisen selektiivinen silloin, kun suojaus toimii ainoastaan silloin, kun vika on sen omalla suoja-alueellaan. Suojaus on aikaselektiivinen, kun sen toiminta perustuu aikahidastukseen ja virtaselektiivinen kun sen toiminta perustuu virtaporrastukseen. (Mäkinen, 2008)

Helpoin ja yksinkertaisin tapa saavuttaa selektiivisyys on käyttää aikaselektiivistä suojausta. Aikaselektiivisessä suojauksessa porrastus toteutetaan siten, että lähimpänä vikapaikkaa oleva suojaus toimii aina ensimmäisenä. Suojan toiminta voidaan tehdä joko vakioaikaisena, jolloin suoja toimii aina samalla nopeudella riippumatta virran suuruudesta tai käänteisaikaisena, jolloin suoja toimii sitä nopeammin mitä suurempi virta on. (ABB, 2000b)

Selektiivisyyteen voidaan vaikuttaa virta- ja aikaporrastuksen lisäksi lukitustoiminnoilla. Lukitussuojauksella voidaan nopeuttaa suojauksen toimintaa. Periaatteena on käyttää suojauksessa peräkkäin olevien suojien välisiä lukituksia. Lukitussuojausta käytetään erityisesti kiskostojen, muuntajan alapuolen napojen ja kiskoston syöttöhaaran suojaukseen. Jotta lukitussuojaus saataisiin toteutettua luotettavasti, on lukittavan suojan toimintaa kuitenkin hieman hidastettava. Hidastuksen suuruus riippuu käytettävistä olevista suojareleistä, virtamuuntajien toistokyvystä sekä lukitustoiminnon toteuttamistavasta. Lukitussuojien rinnalla on aina käytettävä myös aikaselektiivistä suojausta, koska

lukitussuojien suoja-alueet eivät välttämättä peitä toisiaan tai ulotu seuraavien suojien suoja-alueelle. (ABB,2000b) Joskus voidaan joutua tinkimään selektiivisyydestä, kun halutaan varmistaa suojien nopea toiminta.

3.10.1 Porrassaika

Selektiivisyyden kannalta tärkeä asia on oikean suuruisen porrasajan valinta. Porrassaika tarkoittaa kahden peräkkäisen suojausportaan toiminta-aikojen välistä erotusta. Syöttöpisteen lähellä tapahtuvissa vioissa oikosulkuvirta on suurin. Lähivikoja suojaavissa suojissa toiminta-aika ei saa olla tarpeettoman suuri, mutta kuitenkin riittävä selektiivisyyden aikaansaamiseksi. Porrassaika voidaan laskea vakioaikaisille suojille seuraavalla yhtälöllä (ABB,2000b):

$$\Delta t_{dt} = 2 * t_e + t_r + t_{cb} + t_m \quad (3.14)$$

missä

t_e = releen toiminta-ajan toleranssi

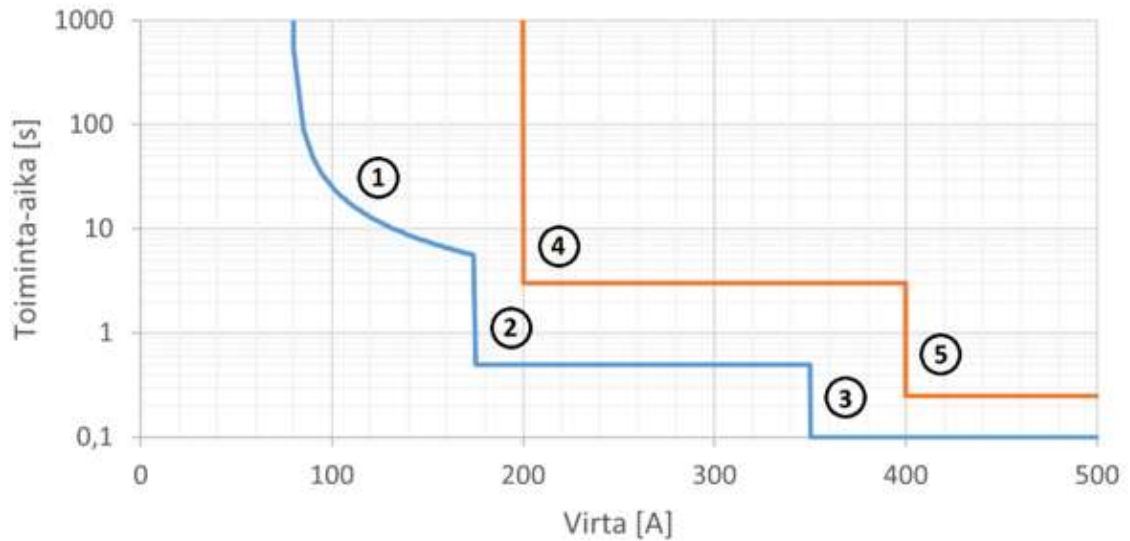
t_{cb} = katkaisijan toiminta-aika

t_r = retardaatio eli pyörtöaika

t_m = varmuusmarginaali

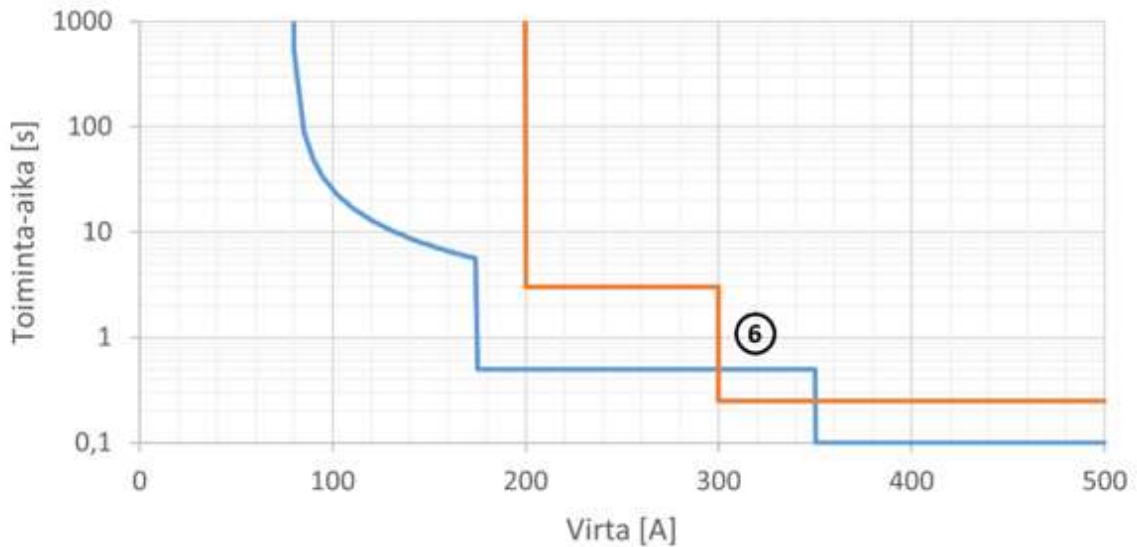
3.10.2 Selektiivisyyskäyrästä

Selektiivisyyskäyrästä voidaan tarkastella suojauksen selektiivisyyttä. Kuvassa 3.9 on esitetty esimerkkinä kahden eri suoja-alueen selektiivisyyskäyrät. Tässä esimerkissä selektiivisyyskäyrästä on tehty ylivirtasuojauksesta. Tässä luvussa käytettiin esimerkkinä suojareleitä, mutta vastaavanlainen tarkastelu voitaisiin tehdä sulakkeillakin.



Kuva 3.9. Selektiivisyyskäyrästä A. Kahden suoja-alueen ylivirtasuojauksen toimintakäyrät selektiivisessä tilanteessa.

Selektiivisyyskäyrästä pystyakselilla on suojan toiminta-aika sekunneissa ja vaak akselilla suojan toiminta-arvo ampeereissa. Oranssi käyrä kuvaa tässä tapauksessa esim. keskijännitekojeistoa syöttävän suojan toimintakäyrää ja sininen käyrä keskijännitekojeiston johtolähdön suojan toimintakäyrää. Jotta suojaus toimisi selektiivisesti, kiskosta syöttävä suoja ei saa laukaista ennen johtolähdön suojaa, jos vika on johtolähdöllä. Selektiivisyys voidaan varmistaa selektiivisyyskäyrästä silloin kun sininen ja oranssi käyrä eivät leikkaa toisiaan tai mene päällekkäin. Kuten kuvan 3.9 selektiivisyyskäyrästä A:sta huomataan, näin ei tapahdu. Kuvassa 3.10 on esitetty tilanne, jossa selektiivisyys ei toteudu. Käyrien leikkaamisen lisäksi täytyy ottaa huomioon suojien toiminta-aikojen toleranssit ja riittävät marginaalit, ettei selektiivisyys kärsi. Johtolähdön suojalla on kolme ylivirtaporrasta kuvan kohdat 1-3 ja kiskoa suojaavalla suojalla kaksi ylivirtaporrasta kuvan kohdat 4-5. Kohdan 1 tapauksessa suojaus on käänteisaikahidasteinen ja kohdat 2-5 vakioaikahidasteisia.

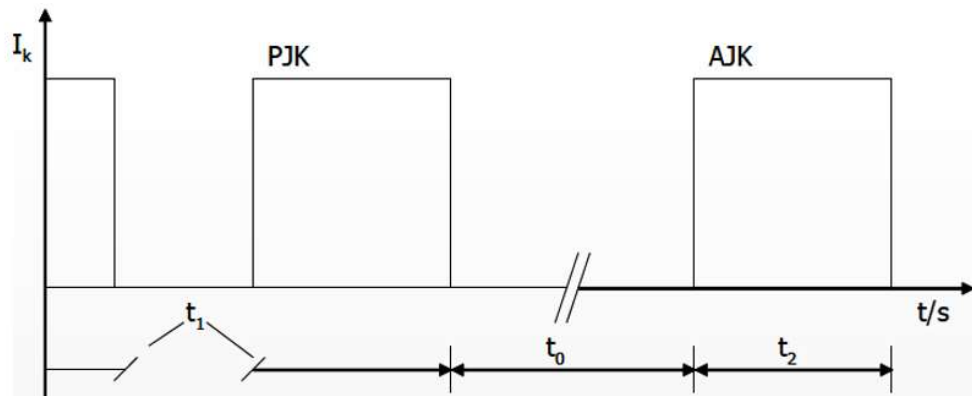


Kuva 3.10 Selektiivisyyskäyrästä B. Kahden suoja-alueen ylivirtasuojauksen toimintakäyrät epäselektiivisessä tilanteessa.

Selektiivisyyskäyrästä B kohdassa 6 on tilanne, jossa peräkkäisten suojien käyrät leikkaavat toisensa. Tässä tapauksessa vian ollessa johtolähdöllä on mahdollista, että kiskoa suojaava suoja laukaisee ennen johtolähdön suojaa. Suojaus on kuitenkin mahdollista saada selektiiviseksi, jos johtolähdön suojauksen havahtumisesta lähetetään lukituskäsky kiskoa suojaavan suojan toiselle portaalille. Sulakkeilla ei vastaavanlaista lukitusta pysty toteuttamaan.

3.11 Jälleenkytkennät

Useat viat ilmajohtoverkoissa ovat luonteeltaan ohimeneviä ja ne voivat johtua useista syistä. Syitä näillä ohimeneville vioille voivat olla esim. salaman iskut ja oksien putoamiset läheisistä puista. Tällaiset viat poistuvat automaattisesti muutamassa sekunnissa, kun katkaisija avataan lyhyeksi aikaa, eli ilmajohto otetaan jännitteettömäksi ja tämän jälkeen katkaisija laitetaan uudelleen kiinni. Suojarele suorittaa tämän toiminnon käyttämällä toimintoa nimeltä automaattinen jälleenkytkentä. Jälleenkytkentäsekvenssi on esitetty kuvassa 3.11.



Kuva 3.11. Jälleenkytkentäsekvenssi. Pikajälleenkytkentä (PJK) ja aikajälleenkytkentä (AJK). (Lakervi, Partanen, 2008)

Tässä toiminnossa suojarele havaitsee vian sähköverkossa ja antaa laukaisukäskyn katkaisijalle. Katkaisija aukeaa ja sähkölinja on hetken jännitteetön. Jännitteettömän ajan päätyttyä seuraa pikajälleenkytkentä (PJK), jolloin katkaisija antaa kiinniohjauskäskyn katkaisijalle. Onnistuneen katkaisijan kiinniohjaamisen jälkeen suojarele valvoo, onko vika poistunut verkosta. Jos vika oli ohimenevä niin suojarele ei lähetä uutta laukaisukäskyä vaan katkaisija jää kiinniasentoon. Jos vika ei ole poistunut verkosta rele lähettää uuden laukaisukäskyn ja seuraa toinen jännitteetön aika. Toisen jännitteettömän ajan jälkeen, joka on huomattavasti pitempi kuin ensimmäinen seuraa aikajälleenkytkentä (AJK). Jos vika ei vielä ole poistunut verkosta suojarele olettaa, että vika ei ole ohimenevä ja laukaisee katkaisijan pysyvästi. Jälleenkytkentöjä käytetään yleisesti ilmajohtoverkoissa, mutta verkoissa, joissa on pelkästään maakaapelia niin ne ovat usein pois käytöstä.

3.12 Katkaisijan vikasuojaus

Katkaisijan vikasuojan toimintaperiaatteen mukaan, jos laukaisukäskyn saanut katkaisija ei jostain syystä aukea, niin laukaisu siirretään vikaantunutta katkaisijaa syöttävälle katkaisijalle. Laukaisukäsky voidaan siirtää toiselle katkaisijalle, joko suojareleiden välisen väylän kautta tai fyysisen johtimen avulla. Verkkotopologiasta riippuen, laukaisu voidaan siirtää joko yhdelle tai useammalle katkaisijalle. Periaatteena on laukaista kaikki katkaisijat, jotka voivat syöttää mahdollista vika-aluetta yhden katkaisijan vikaannuttua. Tarkoituksena on varmistaa, että vika saadaan poistettua verkosta, vaikka jokin katkaisija ei toimisikaan. Katkaisijan vikasuojaus voidaan toteuttaa niin, että se yrittää antaa vielä uuden laukaisukäskyn vikaantuneelle katkaisijalle ennen kuin lähettää laukaisukäskyn seuraavalle katkaisijalle (Mörsky, 1993). Vikasuojalle voidaan antaa virtaehto, tilaehto tai molemmat.

Virtaehto tarkoittaa sitä, että suojareleen antaessa laukaisukäskyn suojareleen näkemän vikavirran tulee katketa tietyn ajan kuluessa. Tilaehto tarkoittaa sitä, että releen täytyy saada auki-tilatieto tietyn ajan kuluessa. Katkaisijan vikasuojan toiminta voi vaihdella eri valmistajien suojareleissä. Suojareleitä ohjelmoimalla voidaan valita, mitkä suojaukset aktivoivat katkaisijan vikasuojauksen.

3.13 Valokaarisuojaus

Valokaarisuojauksella voidaan suojata kiskostoja ja kojeistoja. Valokaarisuojausta käytetään yleensä keskijännitteellä. Valokaarisuojaus on toiminnaltaan yleensä hyvin nopea, jotta välttyttäisiin suurimmilta valokaarien aiheuttamilta vaurioilta. Valokaarisuojauksessa käytetään kuitusensoreita, jotka välähdyksen havaittuaan vievät valotiedon suojalaitteelle. Valokaarisuojaus voidaan toteuttaa, joko pelkästään valotietona tai valo- ja ylivirtatiedon yhdistelmänä. Yleensä suojaus toteutetaan sekä valotiedon ja annetun ylivirtahavahtumisen yhdistelmänä. Jos käytössä olisi pelkästään valotiedon havahtumisesta seuraava laukaisu mahdollisten virhelaukaisujen määrä kasvaisi. Valokaarisuojausta voidaan käyttää vain sisätiloissa, koska auringon valo haittaa valoksensoreiden toimintaa.

4 SÄHKÖRATOJEN SUOJUKSIEN ERITYISPIIRTEITÄ

Ratasähköverkoissa käytetään samoja suojaustoimintoja kuin perinteisissä sähköjakeluverkoissa. Tässä luvussa käydään läpi suojaustoimintojen erityispiirteitä ratasähköverkkojen näkökulmasta.

Ratasähköverkkojen vaihtovirtajärjestelmät vaativat erilaisia näkökulmia suojaukseen kuin tavallisissa kolmivaiheverkoissa. Rataverkkojen käyttötavat ja kuormat poikkeavat perinteisestä kolmivaihejärjestelmästä. (Novo, Teston, 2014) Ratasähköverkkojen keskijännitejärjestelmä poikkeaa perinteisestä kolmivaihejärjestelmästä siten, että siinä on vain joko 1 tai 2 vaihetta ja toisin kuin jakeluverkoissa käytetään siinä myös paluujohdinta. Ratasähköverkoissa tapahtuvat viat voidaan jakaa kolmeen eri vikatyyppiin, joita ovat maasulkuihin, oikosulkuihin ja sähköaseman sisäisiin vikoihin. Koska vikavirrat ovat tyypillisesti isoja täytyy ne poistaa nopeasti.

4.1 Ylivirtasuojaus sähköradoilla

Ratasähköverkot ovat yleensä topologiaaltaan säteittäisiä. Säteittäiset verkot ovat yleensä suojattu vakio- ja käänteisaikaisten ylivirtasuojien avulla. Ratasähköverkoissa ylivirtaportaita käytetään yleensä varasuojina distanssisuojille. (Novo, Teston, 2014)

Ylivirtasuojauksen käyttäminen vakio- ja käänteisaikaisena mahdollistaa distanssisuojauksen toimimisen koko laajuudellaan ennen ylivirtasuojauksen toimintaa. Ylivirtasuojaus toteutetaan niin, että se suojaa ajo- sekä vastajohdinta. Ylivirtasuojauksessa täytyy ottaa huomioon, että suojausasettelu ei ole liian suuri, kun viereinen asema on korvauskytkennässä. Ylivirta-asettelut pitää olla myös suuremmat kuin suurimmat mahdollisimmat kuormat. Ylivirtasuojauksessa otetaan huomioon suurin mahdollinen kuormitustilanne, kun radalla on suurin sallittu määrä junia sekä muut mahdolliset kuormat ovat kytkettyinä. Aika-asettelu asetellaan niin suureksi, että distanssisuojauksen toinen vyöhyke kerkeää antamaan laukaisukäskyn ennen ylivirtasuojauksia. Käänteisaikaista ylivirtasuojaa käytetään päämuuntajan suojauksessa ja sen asetteluarvo asetellaan suuremmaksi kuin suurin mahdollinen kuorma. Koska ylivirtasuojaus toimii varasuojana sillä ei käynnistetä aikajälleenkytkentöjä. (Novo, Teston, 2014)

Vikavirran suuruutta laskettaessa täytyy ottaa huomioon vikapaikka ja sähköistysjärjestelmä. Huomioon otettavia asioita ovat 110 kV syöttävän verkon, syöttömuuntajan, ratasähköverkon johdinten ja järjestelmän mukaan, joko säästömuuntajien tai imumuuntajien impedanssit. (Lee, Kim, 2005)

4.2 Ratasähköaseman päämuuntajan differentiaalisuojaus

Muuntajan differentiaalisuoja ratasähköasemalla poikkeaa kolmivaihemuuntajista sillä, että käytössä on vain kaksi virtamittausta muuntajan ylä- ja alajännitepuolilla. Kolmivaihemuuntajissa näitä on kolme.

4.3 Sähköratojen distanssisuojaus

Distanssisuojaus on yleinen suojausmenetelmä ratasähköverkoissa. Toimintaperiaatteet ovat samanlaisia kuin paremmin tunnetussa kolmivaihejärjestelmässä, mutta eroavaisuuksia kuitenkin löytyy. Eroavaisuuksia ovat esimerkiksi etäisyysasetukset ja karakteristikat. Lisäksi 2x25 kV -järjestelmässä säästömuuntajien olemassaolo vaikuttaa impedanssin mittaukseen. Impedanssi ei kasva lineaarisesti etäisyyden mukaan, joka vaikuttaa etäisyysasetuksiin ja vikapaikan etäisyyden paikantamiseen. (Novo, Teston, 2014)

4.3.1 Distanssisuojaus 1x25 kV imumuuntajajärjestelmässä

1x25 kV -järjestelmässä on yksi virta ja yksi jännite mitä voidaan mitata. Järjestelmässä on ainoastaan yksi vikatyyppejä, joka on ajojohdon ja maan välinen vika. Tämä tekee asettelujen määrittämisestä yksinkertaisempaa kuin 2x25 kV -järjestelmässä. Ajojohtimen ja maan välisen vian impedanssi voidaan laskea yhtälöllä (Novo, Teston, 2014):

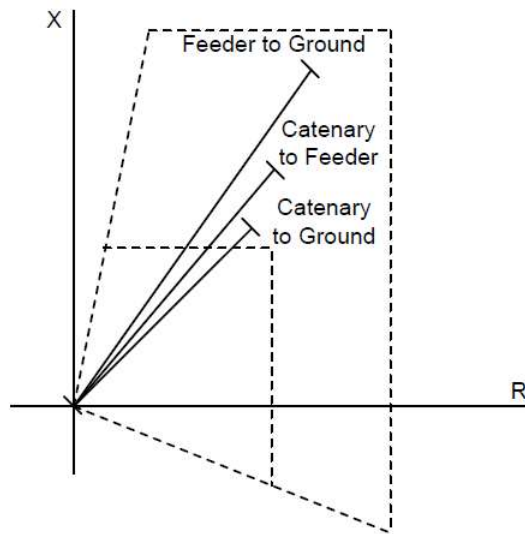
$$Z_{ajojohdin-maa} = \frac{V_{ajojohdin}}{I_{ajojohdin}} \quad (4.1)$$

4.3.2 Distanssisuojaus 2x25 kV -säästömuuntajajärjestelmässä

Säästömuuntajajärjestelmässä käytetään ajojohdinta, vastajohdinta sekä paluukiskoa. Mahdollisia vikatyyppejä on kolme: ajojohtimesta vastajohtimeen, ajojohtimesta maahan sekä vastajohtimesta maahan. Teoriassa tässä järjestelmässä voidaan mitata kolmea eri impedanssia. Viat maata vasten ovat yleisempiä kuin ajo- ja vastajohtimen väliset viat. (Novo, Teston, 2014)

4.3.3 Säästömuuntajajärjestelmän distanssisuojaus yksivaihemittauksella

Suojaus voidaan toteuttaa kuten 1x25 kV -järjestelmä siten, että käytetään vain yhtä impedanssin mittausta. Tätä mittaustapaa käytettäessä täytyy kuitenkin tehdä kompromisseja. Eri vikatyypeillä mitatut impedanssin arvot poikkeavat toisistaan, vaikka ne tapahtuisivat samassa verkon osassa. Ajatuksena on asettaa suojaus niin, että se suojaa kaikki mahdolliset vikatyypit. Kuvassa 4.1 on esitetty kolmen eri vikatyypin impedanssit.



Kuva 4.1. Kolmen eri vikatyypin aiheuttamat impedanssit. (Novo, Teston, 2014)

Ajo- ja vastajohtimille käytettävät johtimet eivät ole samanlaisia ja tämä selittää vikatyypien erot. Ajojohtimen impedanssi on yleensä pienempi kuin vastajohtimen vastaava, kulma on kuitenkin melkein sama.

Kun käytetään yhden impedanssin mittaustapaa se edellyttää, että mittaus on toteutettu asianmukaisesti. Säästömuuntajien vaikutuksen takia mittaustapa on:

$$Z = \frac{V_{ajojohdin} - V_{vastajohdi}}{I_{ajojohdin} - I_{vastajohdin}} \quad (4.2)$$

Yleensä tällä metodilla käytetään kahden vyöhykkeen suojausta. (Novo, Teston, 2014)

4.3.4 Säästömuuntajajärjestelmän distanssisuojaus kolmella impedanssimittauksella

Säästömuuntajajärjestelmässä on distanssisuojauksen näkökulmasta olemassa kolme eri vikatyyppeä. Ajojohtimen ja vastajohtimen välinen, ajojohtimen ja maan välinen sekä vastajohtimen ja maan välinen vika. Koska ajojohtimen, joka sisältää myös kannatinjohtimen ja vastajohtimen impedanssit ovat erilaiset, tarvitaan näille jokaiselle vikatyypille oma impedanssimittaus, jotta pystytään määrittelemään vikapaikan etäisyys jokaisessa eri vikatyypissä. Kolme eri impedanssimittauksia ovat:

$$Z_{ajojohdin-vastajohdin} = \frac{V_{ajojohdin} - V_{vastajohdin}}{I_{ajojohdin} - I_{vastajohdin}} \quad (4.3)$$

$$Z_{ajojohdin-maa} = \frac{V_{ajojohdin}}{I_{ajojohdin} + K0_{ajojohdin} * 2 * I0} \quad (4.4)$$

$$Z_{vastajohdin-maa} = \frac{V_{vastajohdin}}{I_{vastajohdin} + K0_{vastajohdin} * 2 * I0} \quad (4.5)$$

missä

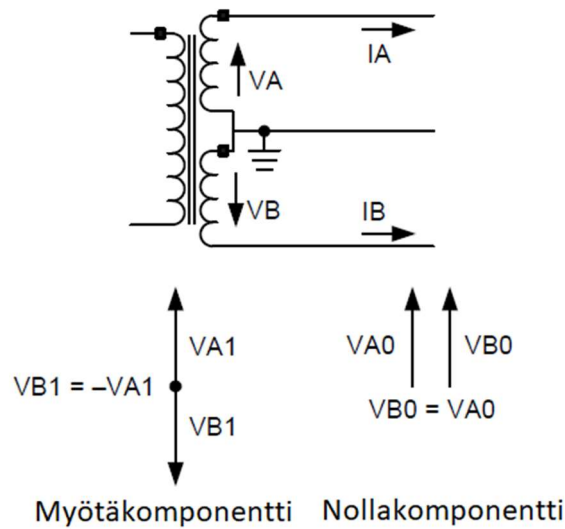
$K0_{ajojohdin}$ = ajojohtimen nollakomponentin kompensointikerroin

$K0_{vastajohdin}$ = vastajohtimen nollakomponentin kompensointikerroin

$I0$ = nollavirta

(Novo, Teston, 2014)

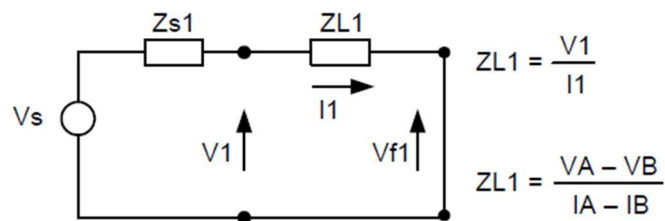
Ajo- ja vastajohtimille tarvitaan eri kompensointikertoimet, koska niiden impedanssit ovat erilaiset. Kuvassa 4.2 on esitetty jännitteen myötä- ja nollakomponentit.



Kuva 4.2. Virran ja jännitteenmittaus sekä myötä- ja nollakomponentit 2x25 kV -järjestelmässä (muokattu lähteestä Novo, Teston, 2014)

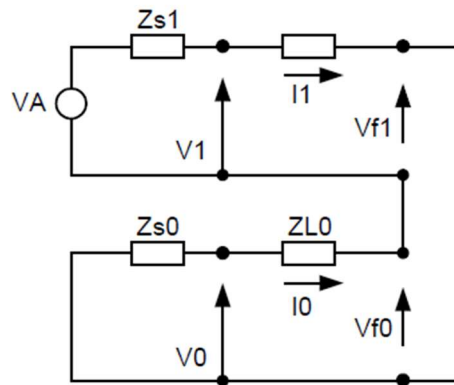
Säästömuuntajajärjestelmässä on kaksi virranmittausta I_A ja I_B , jotka ovat ajojohtimen ja vastajohtimen virranmittaukset. Sekä kaksi jännitteenmittausta V_A ja V_B . Näistä mittauksista voidaan ottaa myötä- ja nollakomponentit. Jos myötäkomponentit V_A ja V_B eivät ole samansuuruisia, niin nollakomponentti saa nolasta poikkeavan arvon. Koska ajojohtimen ja vastajohtimen impedanssit eivät ole samanlaiset seuraa epätasapaino ja nollakomponentin syntyminen kuormitustilanteissa (Novo, Teston, 2014).

Kuvissa 4.3 ja 4.4 on esitetty kahden vaiheen ja vaiheen ja maan välisen vian impedanssit.



Kuva 4.3. Kahden vaiheen välisen vian impedanssi (Novo, Teston, 2014)

Kuvan 4.3 Z_{L1} on sama kuin yhtälössä 4.3 esitetty ajojohtimen ja vastajohtimen välisessä viassa mitattu impedanssi $Z_{\text{ajojohdin-vastajohdin}}$.



Kuva 4.4. Vaiheen ja maan välisen vian impedanssi (Novo, Teston, 2014)

Kuvassa 4.4 on impedanssi $ZL0$, jota käytetään kompensointikerroimen $K0$ laskemisessa. $ZL0$ saadaan laskettua mitatun nollajännitteen ja nollavirran avulla.

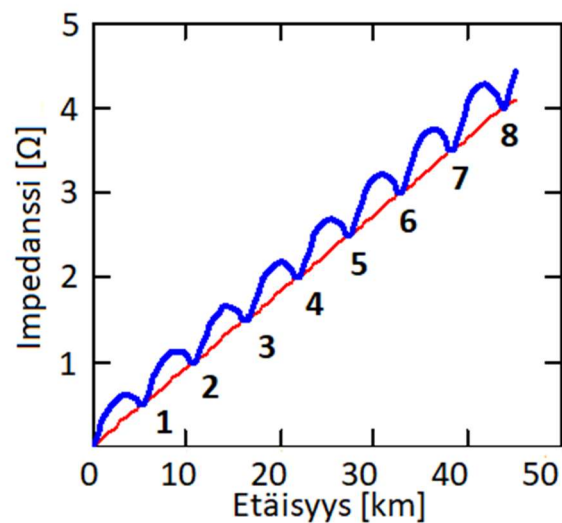
Kompensointikerroin $K0$ voidaan laskea yhtälöllä:

$$K0 = \frac{ZL0 - Z_{ajojohdin-vastajohdin}}{2 * Z_{ajojohdin-vastajohdin}} \quad (4.6)$$

missä

$ZL0$ = nollakomponentin impedanssi

Kuvassa 4.5 on esitetty vikapaikan impedanssi etäisyyden funktiona.



Kuva 4.5. Impedanssi säästömuuntajajärjestelmässä etäisyyden funktiona. (muokattu lähteestä Novo, Teston, 2014)

Kuvan 4.5 sininen käyrä kuvaa vikapaikan impedanssia ajojohtimen ja maan sekä vastajohtimen ja maan välillä. Punainen käyrä kuvaa impedanssi ajojohtimen ja vastajohtimen välisissä vioissa. Kohdat 1-8 kuvaavat säästömuuntajia sähköradan varrella. Kuten kuvasta voimme todeta ajojohtimen ja vastajohtimen välisissä vioissa impedanssi on vähintäänkin lähes lineaarinen. Tämä johtuu siitä, että ajojohtimen ja vastajohtimen välisissä vioissa säästömuuntajat eivät ole osa vikapiiriä. Kun taas ajojohtimen tai vastajohtimen ja maan välisissä vioissa impedanssi ei käyttäydy lineaarisesti vaan impedanssi on suurimmillaan noin säästömuuntajien puolivälissä, kun taas säästömuuntajien kohdalla vikapaikka näyttäisi käyttäytyvän lähes lineaarisesti (Novo, Teston, 2014). Todellisuudessa ajojohdon ja maan sekä vasta johdon ja maan välisien vikojen impedanssit eivät ole identtiset vaan kuva 4.5 näyttää esimerkinomaisesti, kuinka impedanssit käyttäytyvät. Tämän epälineaarisuuden vuoksi asettelujen määrittäminen ajojohtimen ja maan välisten tai vastajohtimen ja maan välisten vikojen tapauksissa on haastavaa.

4.4 Vikapaikan etäisyys

Kuten distanssisuojauksen tapauksessa 1x25 kV -järjestelmässä mahdollisia vikatyyppejä on vain yksi, ajojohtimen ja maan välinen vika. Vikapaikan etäisyyttä varten ei tarvitse määrittellä asetteluja kuin tämän vikatyypin tapauksessa.

Kun käytössä on 2x25 kV säästömuuntajajärjestelmä tarvitaan määrittelyt kolmelle eri vikatyypille. Säästömuuntajajärjestelmän tapauksessa vikapaikan etäisyyttä määriteltäessä haasteita asettaa se säästömuuntajajärjestelmän ominaisuus, että vikapaikan impedanssi ei ole lineaarinen säästömuuntajien välillä vaan kuten kuva 4.5 osoittaa, impedanssi on suurimmillaan säästömuuntajien puolivälissä.

4.5 Ratajohdon lämpösuojaus

Ratajohdon lämpösuojauksessa ratajohto suojataan termiseltä rasitukselta. Lämpösuojaus toteutetaan käänteisaikahidasteisella lämpösuojauksella. Ratajohdon suurin virta-arvo tietyllä kuormitusajalla voidaan laskea kappaleessa 3.3.3 esitetyllä yhtälöllä 3.13. Kyseisestä yhtälöstä voidaan johtaa yhtälö 4.7, jolla voidaan laskea suurin kuormitusaika, jollain tietyllä kuormitusvirralla:

$$t_{kv} = \left(\frac{I_{k1s}}{I_{kt}} \right)^2 \quad (4.7)$$

missä

t_{kv} = suurin terminen kuormitusaika

I_{k1s} =virta, jolla komponentti kestää termisesti yhden sekunnin ajan

I_{kt} =kuormitusvirta

4.6 Jälleenkytkennät sähköradoilla

Ratasähköverkoissa jälleenkytkentöjä käytetään kahdesta syystä. Ensimmäiseksi niillä poistetaan ohimenevät viat ja toisekseen niitä käytetään vikapaikan etsimiseen. Erityisesti 2x25 kV -järjestelmissä vikapaikka arvioidaan sen jälkeen, kun jälleenkytkentä on epäonnistunut, mikä tarkoittaa pysyvää vikaa verkossa.

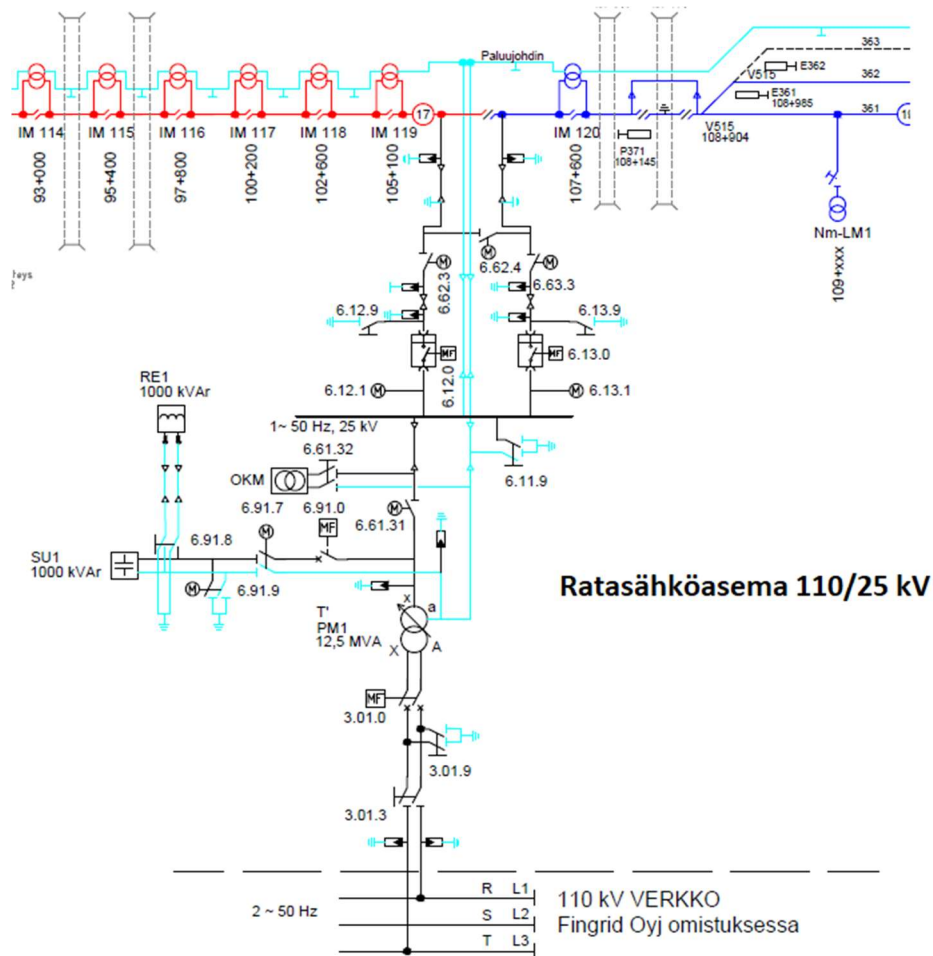
Kun distanssisuoja on antanut laukaisukäskyn, jälleenkytkentätoiminto käynnistyy. Ainoastaan distanssisuojaus käynnistää jälleenkytkennät. Pikajälleenkytkennän jännitteetön aika asetellaan noin 4 sekunnin pituiseksi minkä aikana ohimenevät viat häviävät.

5 SUOJAUSASETTELujen MÄÄRITTÄMINEN

Tässä luvussa lasketaan ja määritellään erään 110/25 kV -ratasähköaseman suojausasettelut. Sähköaseman syöttämä rataverkko on 1x25 kV -imumuuntajajärjestelmä. Asemalle tulee yhteensä kahdeksan suojarelettä, joista viisi on pääsuojia ja kolme varasuojia. Suojattaviin kohteisiin kuuluvat 110 kV verkko, syöttömuuntaja, 25 kV kiskosto, reaktori, suodatin sekä ratalähdöt. Sähköaseman ja sähköratojen suojaus on toteutettu kokonaisuudessaan ABB:n/Hitachin 600-sarjan suojareleillä.

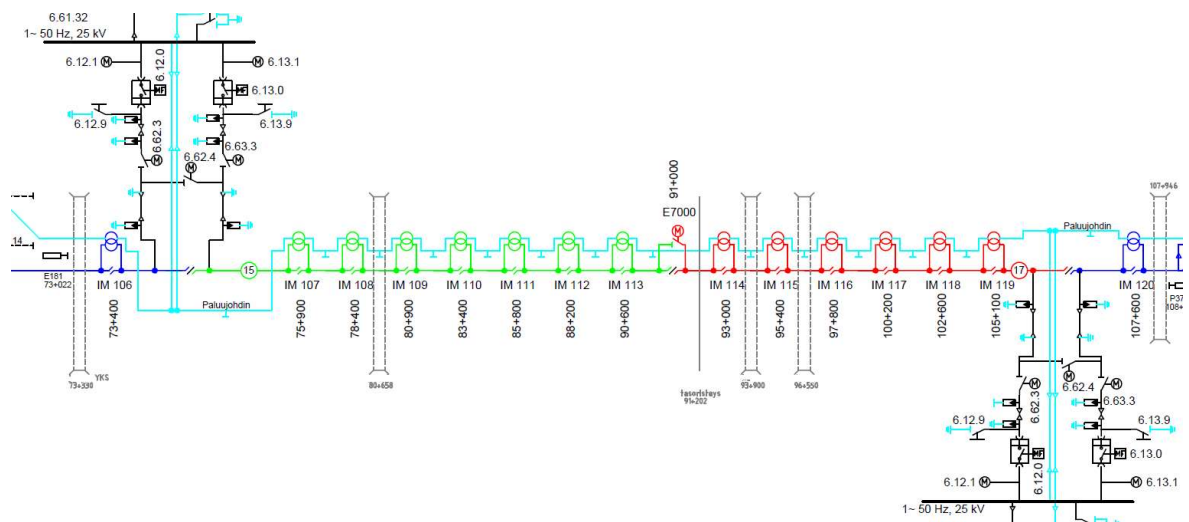
5.1 Suojausasettelujen määrittämiseen käytetty verkko

Kuvassa 5.1 on esitetty suojausasettelujen määrittelyssä käytetty ratasähköasema sekä sen kaksi ratalähtöä. Ratalähtö 6.12 on esitetty kuvassa punaisella ja ratalähtö 6.13 tummansinisellä. Sähköverkon neutraalijohdin on esitetty vaaleansinisellä.



Kuva 5.1 Sähköaseman pääkaavio ja ratalähtöjen liittynät ratajohtoihin.

Kuvan 5.1 alareunassa on Fingrid Oy:n 110 kV syöttö sähköasemalle, joka syöttää aseman 110/25 kV päämuuntajaa. Muuntajan alajännitepuolella ovat suodatinlaitteisto SU1, reaktori RE1 sekä omakäyttömuuntaja OKM. Kuvassa 5.2 on kahden ratasähköaseman välinen ratajohto. Asemien välissä on erotuskenttä E7000, joka erottaa kahden sähköaseman syöttöalueet toisistaan. Vasemmanpuoleinen sähköasema syöttää vihreää rataosuutta ja oikeanpuoleinen, punaista rataosuutta. Korvauskytkentätilanteissa voidaan kuitenkin sähköasema korvata siten, että viereinen sähköasema syöttää korvattavan sähköaseman rataosuuden. Tämän takia suojausasettelut määritellään siten, että myös viereisen sähköaseman viat voidaan poistaa.



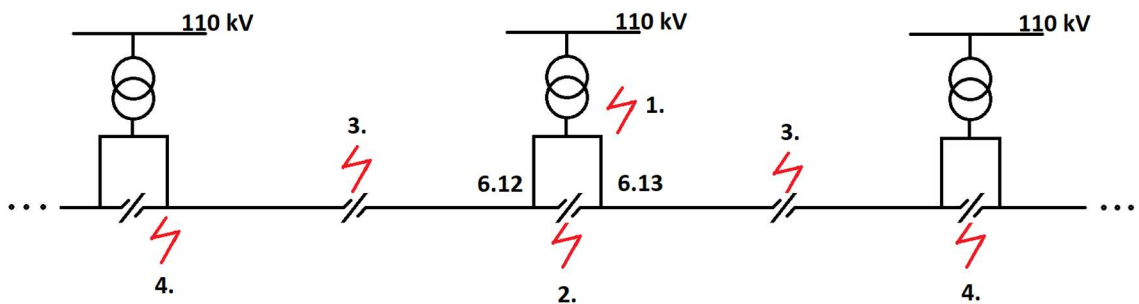
Kuva 5.2 Sähköasemien KJ-kiskostot sekä kahden aseman välinen ratajohto imumuuntajineen.

Kappaleessa 5.2 lasketut oikosulkuvirrat ja -impedanssit ovat laskettu kuvassa 5.1 olevan päämuuntajan PM1 alajännitepuolen navoista sekä ratalähtöjen aluista. Kuvassa 5.2 on esitetty erotuskenttä ja seuraava sähköasema, joiden kohdalta oikosulkuvirrat on myös laskettu.

5.2 Oikosulkuvirtojen ja -impedanssien laskeminen

Tässä kappaleessa lasketaan oikosulkuvirrat sähköasemalla ja sähköradalla, joiden avulla määritellään suojausasettelut. Excelillä laskettuja arvoja tullaan vertaamaan PowerFactory-simulointityökalulla saatuihin arvoihin. Excelillä laskettaessa on käytetty ratajohdolle summaimpedanssia, joka ottaa huomioon ratajohdon kokonaisimpedanssin per kilometri. Kokonaisimpedanssiin on huomioitu kaikki ratajohtoon kuuluvat komponentit, kuten ajojohdin, kannatinlanka, paluujohdot ja ratakiskot. Kyseisen rataverkon ratajohtoon

kuuluu 100 mm² elektrolyyttikuparista tehty ajojohdin, yksi 50 mm² pronssiseostettu kuparinen kannatinlanka, kaksi 107 mm² alumiinista paluujohdinta ja yksi 107 mm² alumiininen m-johdin. Simulointityökalussa ratajohdon komponenteille on annettu valmistajan ilmoittamat DC-resistanssit ja johtimien säteet. Näiden lisäksi ratajohto on kokonaisuudessaan mallinnettu antaen sille jokaisen johtimen x- ja y-koordinaatit, joilla simulointityökalu laskee johtimien etäisyydet toisista komponenteista ja maan pinnasta. Etäisyydet vaikuttavat sähköisiin arvoihin kuten reaktanssiin. PowerFactoryn oikosulkusimuloinneissa on käytetty vaiheen ja maan välistä vikaa sekä ”complete”-metodia, joka perustuu tiettyyn verkon toimintapisteeseen ja tarjoaa tarvittavat algoritmit ja tarkkuuden todellisten tai toiminnallisten oikosulkuvirtojen määrittämiseen ottamatta huomioon yksinkertaistuksia tai oletuksia, joita tyypillisesti tehdään vakiovika-analyysissä (DigSilent). Excelillä laskettuja oikosulkuvirtoja verrataan PowerFactoryllä simuloituihin arvoihin. Sähköaseman 110 kV liittytapisteen oikosulkuarvot on saatu 110 kV verkon haltijalta. Kuvassa 5.3 on esitetty suojattava alue sekä oikosulkupisteet.



Kuva 5.3. Sähköradan yksinkertaistettu havainnekuva oikosulkupisteistä. Oikosulku pisteet (1) muuntajan alajännitepuoli. (2) Ratalähdön alku. (3) Sähköasemien välinen erotuskenttä, jossa on normaalikytkentätilassa kytkentäraja. (4) Seuraava sähköasema, johon asti voidaan syöttää varasyöttötilanteessa.

Oikosulkuvirrat esitetään muuntajan ylä- sekä alajännitepuolella, ratalähdön alussa ja lopussa sekä erotuskentän jälkeisen korvattavan ratalähdön lopussa, joka ulottuu seuraavalla sähköasemalle asti.

Taulukossa 5.1 on laskennassa käytettyjä arvoja imumuuntajille ja ratajohdolle. Kyseinen ratasähköverkko on 1 raiteinen ja siinä käytetään 100 mm² ajojohdinta, kannatinlangan ja kahden paluujohdinten kanssa.

Taulukko 5.1. Ratajohtotyyppien ja imumuuntajien resistanssit ja reaktanssit. 1*(Skogberg), 2*(Hitachi), 3*(Prysmian)

Sähköratakomponenttien arvoja			
Ratajohtotyyppi		R (Ω)	X (Ω)
80 mm ² ajojohdin, 2 paluujohtinta, kannatinlanka	1*	0,15	0,479
100 mm ² ajojohdin, 2 paluujohtinta, kannatinlanka	1*	0,14	0,479
Imumuuntaja 1-raiteiselle radalle	2*	0,06	0,20
Imumuuntaja 2-raiteiselle radalle	2*	0,04	0,14
Maakaapeli AHXCMK 1x300	3*	0,1	0,145

Fingridin ilmoittamat liitteessä III mainitut sähköaseman liittymispisteen 110 kV oikosulkutehot ja -virrat ovat minimitalanteessa 600 MVA ja 3 kA, sekä maksimitilanteessa 2700 MVA ja 13,5 kA. Syöttöverkon 110 kV oikosulkuvirtojen arvot riippuvat kantaverkon kytkentätilanteista. Impedanssi minimitalanteessa on $4,7 + i22,2 \Omega$ ja maksimitilanteessa $1,2 + i5,0 \Omega$. Muuntajan yläjännitepuolen impedanssit voidaan redusoida alajännitepuolelle aiemmin esitetyillä yhtälöillä 3.3 ja 3.4.

Muuntajan alajännitepuolen resistanssi saadaan lisäämällä muuntajan yläjännitepuolen redusoitu resistanssi muuntajan resistanssiin ja reaktanssi lisäämällä yläjännitepuolen redusoitu reaktanssi muuntajan reaktanssiin. Muuntajan resistanssi ja reaktanssi lasketaan aiemmin esitetyillä yhtälöillä 3.6 ja 3.7. Ratalähdön alun impedansseihin lisätään ratajohtoa syöttävien maakaapelien arvot ja myöhempiin oikosulkupisteisiin ratajohdon sekä imumuuntajien arvot. Maakaapelien ja ratajohdon resistanssit ja reaktanssit lasketaan yhtälöillä 3.8 ja 3.9.

Taulukoissa 5.2 ja 5.3 on Excelillä laskettujen ja PowerFactoryllä simuloitujen oikosulkuvirtojen tulokset sähköasemalla sekä ratajohdon varrella. Yksivaiheiset oikosulkuvirrat on laskettu käyttäen apuna yhtälöä 3.10.

Taulukko 5.2. Oikosulkuvirrat minimitalanteessa. Syöttöverkon oikosulkuteho 600 MVA ja oikosulkuvirta 3 kA. Pisteet 1-4 on esitetty kuvassa 5.3.

Oikosulkuvirrat minimitalanteessa $S_k' = 600 \text{ MVA}$ $I_k' = 3 \text{ kA}$			
Oikosulkupiste	Excel (kA)	PowerFactory (kA)	Ero (%)
Muuntajan alajännitepuoli 27,5 kV (1)	4,14	4,10	-0,97
Ratalähdön 6.12 alku n. 0,1 km (2)	4,11	4,07	-0,97
Ratalähdön 6.12 loppu n. 17 km (3)	1,79	1,74	-2,79
Ratalähtö 6.12 seuraava sähköasema n. 36 km (4)	1,08	1,11	2,78
Ratalähtö 6.13 alku n. 0,1 km (2)	4,11	4,09	-0,49
Ratalähtö 6.13 loppu n. 12 km (3)	2,10	2,04	-2,86
Ratalähtö 6.13 seuraava sähköasema n. 16 km (4)	1,77	1,79	1,13

Taulukko 5.3. Oikosulkuvirrat maksimitilanteessa. Syöttöverkon oikosulkuteho 2700 MVA ja oikosulkuvirta 13,5 kA. Pisteet 1-4 on esitetty kuvassa 5.3.

Oikosulkuvirrat maksimitilanteessa $S_k' = 2700 \text{ MVA}$ $I_k' = 13,5 \text{ kA}$			
Oikosulkupiste	Excel (kA)	PowerFactory (kA)	Ero (%)
Muuntajan alajännitepuoli 27,5 kV (1)	4,78	4,24	-11,29
Ratalähdön 6.12 alku n. 0,1 km (2)	4,74	4,19	-11,6
Ratalähdön 6.12 loppu n. 17 km (3)	1,90	1,77	-6,84
Ratalähtö 6.12 seuraava sähköasema n. 36 km (4)	1,12	1,12	0,00
Ratalähtö 6.13 alku n. 0,1 km (2)	4,74	4,21	-11,18
Ratalähtö 6.13 loppu n. 12 km (3)	2,26	2,07	-8,41
Ratalähtö 6.13 seuraava sähköasema n. 16 km (4)	1,90	1,82	-4,21

Taulukon 5.2 Excelillä ja PowerFactoryllä lasketut arvot ovat hyvin lähellä toisiaan erojen ollessa 0,49 - 2,86 % välillä eri oikosulkupisteissä. Pienimmillään erot olivat muuntajan alajännitepuolen navoissa sekä ratalähtöjen alussa. Absoluuttisesti erot eivät kasvaneet juurikaan loppua kohden vaan ero johtui arvojen pienemisestä ja tästä johtuen prosentuaalinen ero kasvoi.

Taulukossa 5.3 esitetyt arvot eroavat toisistaan enemmän kuin taulukossa 5.2 esitetyt arvot. Excelillä ja PowerFactoryllä laskettujen arvojen erot ovat maksimitilanteessa 0,0 – 11,6 %. Erot ovat suurimmillaan muuntajan alajännitepuolen navoissa tapahtuvissa oikosuluissa sekä ratalähtöjen aluissa. Kauemmaksi mentäessä oikosulkuvirtojen arvojen erot kuitenkin

pienenevät. Maksimitilanteen jopa 10 % erot ovat kohtuullisen suuria, mutta kuitenkin suuntaa antavia. Maksimitilanteen erot johtuvat siitä, että muuntajan alajännitepuolelle siirtyvä oikosulkuvirta ei kasvanut suuremmalla syöttöverkon oikosulkuteholla PowerFactoryllä tehdyissä simuloinneissa yhtä paljon kuin Excelillä tehdyissä laskuissa. Tämä on seurausta mahdollisesti virheellisestä PowerFactory parametroidista.

Excelillä ja PowerFactoryllä laskettujen tulosten perusteella ratasähköverkon oikosulkuvirroissa ei kuitenkaan tapahdu radikaaleja muutoksia eri 110 kV verkon kytkentätilanteissa. Syöttöverkon ja muuntajan oikosulkuimpedanssit ovat huomattavasti pienempiä kuin pitkän ratajohdon impedanssit, joten niiden vaikutukset kauempana oleviin oikosulkuihin ovat pieniä. Tästä syystä oikosulkuvirrat tasaantuvat loppua kohden.

Taulukossa 5.4 on esitetty verkossa olevien komponenttien termisen oikosulkuvirran kestoisuuksia. Taulukon arvoja käytetään myöhemmin, kun tarkastellaan ovatko lasketut asetteluarvot termisesti kestäviä.

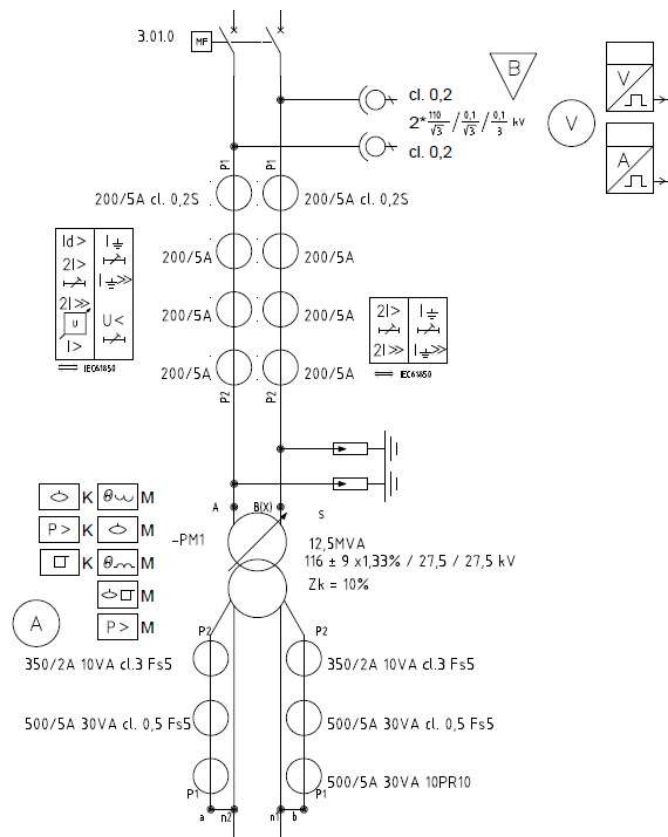
Taulukko 5.4. Komponenttien termiset oikosulkukestoisuudet. 1*(Kolektor), 2*(UTU), 3*(Lemi Trafo), 4*(Hitachi), 5*(Prysmian),

Termiset oikosulkukestoisuudet		
Komponentti		I_{k1s} (kA)
Päämuuntaja ensiö	1*	1,73
Päämuuntaja toisio	1*	4,07
KJ-kojeisto	2*	16,00
Reaktori	3*	6,79
Imumuuntaja	4*	5,66
Ajolanka TRL 100	5*	15,00
Paluujohdin AAC 107	5*	9,60
AHXCМК 1x300	5*	28,30

5.3 Syöttökenttä 3.01 suojausten määrittäminen

Kentän 3.01 suojoina ovat pääsuojana toimiva ABB:n RET630 ja varasuojana toimiva ABB:n REF615. Releet ohjaavat katkaisijaa 3.01.0. Releet toimivat 110 kV verkon,

syöttömuuntajan ja 25 kV kiskon suojoina. Pääsuojassa on käytössä differentiaalisuoja, kolme 110 kV ylivirtaporrasta, kaksi suuntaamatonta maasulkuporrasta ja kaksi 110 kV alijännite- ja ylijänniteporrasta. Muuntajan alajännitepuolella käytetään kahta 25 kV ylivirtaporrasta, jotka laukaisevat yläjännitepuolen katkaisijan.



Kuva 5.4. Muuntajasuoja sekä 110 kV suoja.

Sähköaseman syöttökentän 3.01 virtamuuntajat ovat muuntosuhteeltaan yläjännitepuolella 200/5 A ja alajännitepuolella suojaukseen käytetään 500/5 A virtamuuntajia.

5.3.1 Muuntajan yläjännitepuolen suojausten määrittelyminen

Muuntajan nimellisteho on 12,5 MVA ja ensiön nimellisjännite 116 kV. Muuntajan ensiön nimellisvirta käämikytkimen ollessa keskiasennossa 108 A ja kytkentävirtasysäys 500 A. Syöttöverkon syöttämät 110 kV oikosulkuvirrat ovat pienimmillään 3,0 kA ja suurimmillaan 13,5 kA.

Ensimmäisellä ylivirtaportaalla I> suojataan muuntajan alajännitepuolen navoissa tapahtuvia vikoja sekä alajännitepuolen kiskossa tapahtuvia vikoja vastaan. Asetteluarvon

täytyy olla suurempi kuin muuntajan suurin kuormitusvirta. Tässä esimerkissä muuntajan ylikuormitus suojaus on toteutettu päämuuntajan alajännitepuolen mittauksella, joka laukaisee 110 kV katkaisijan. Toisella ylivirtaportaalla $I_{>>}$ suojataan muuntajan alajännitepuolen vikoja vastaan ja sen asetteluarvon pitää olla suurempi kuin kytkentävirtasysäys, joka on 500 A ja pienempi kuin syöttävän verkon minimitalanteen oikosulkuvirta. $I_{>>>}$ porras toimii viiveettä muuntajan yläjännitepuolen vioissa. Releen minimiasettelu aika on 20 ms. $I_{>>}$ ja $I_{>>>}$ porras lukitaan ratalähtökenttien 6.12 ja 6.13 $I_{>}$ portaalla.

Syöttöverkon 110 kV maasulkuvirrat ovat minimitalanteessa 1,3 kA ja maksimitilanteessa 3,7 kA. Muuntajan ensiöpuolen maasulkusuojia määriteltäessä pitää ottaa huomioon muuntajan kytkentävirtasysäys, jottei turhia laukaisuja tapahdu. Ensimmäinen porras voidaan asettaa pienemmäksi kuin kytkentävirtasysäys, jos asettelu aika asetellaan tarpeeksi pitkäksi tai käytetään lukituksia. Ensimmäisellä suuntaamattomalla maasulkusuojan $I_{o>}$ portaalla suojataan suuriresistanssisia maasulkuja vastaan. Suuriresistanssiset maasulut ovat resistanssiltaan 20 – 500 Ω (Fingrid, 2022). Toisen suuntaamattoman maasulkusuojan $I_{o>>}$ portaalla suojataan tavanomaisia maasulkuja vastaan, joiden vikaresistanssi on alle 20 Ω (Fingrid, 2022). Maasulkuvirrat lasketaan yhtälöllä (Elovaara, Haarla, 2011):

$$I_{o_{110kV}} = \frac{1}{2} * \frac{110kV}{\sqrt{3} * \sqrt{(R_f + R_o)^2 + X_o^2}} \quad (5.1)$$

missä

$I_{o_{110kV}}$ = 110 kV maasulkuvirta

R_f = 110 kV vikaresistanssi

R_o = 110 kV verkon oikosulkuresistanssi

X_o = 110 kV verkon oikosulkureaktanssi

Yhtälöllä 5.1 maasulkusuojauksien asetteluarvoiksi saadaan ensimmäiselle $I_{o>}$ portaalalle 60 A ja toiselle $I_{o>>}$ portaalalle 280 A. Asetteluja laskettaessa käytetään pienintä maasulkuvirtaa, jotta suojat toimivat myös minimitalanteen maasulkuvirroilla. Koska molemmat maasulkuportaat ovat pienemmät kuin kytkentävirtasysäys 500 A, käytetään releellä toisen harmonisen lukitusta. Muuntajan kytkentävirtasysäyksen puoliintumisaika on 0,5 s, joten asettelu aikojen pitäisi olla suuret, ettei virhe laukaisuja tapahtuisi. $I_{o>>}$ on momenttiporras,

jolle annetaan tässä tapauksessa asetteluarvoksi 40 ms, koska releessä käytettävä toisen harmonisen lukituksen nopein asettelu-aika on 20 ms, jotta toinen harmoninen ehtisi lukita $I_{o>>}$ portaan käytetään tälle asettelu-arvoa 40 ms.

Kappaleessa 3.2.1 läpikäytyjä kosketussuojausvaatimuksia silmällä pitäen sähköaseman maadoitusjännite 110 kV maasulussa lasketaan yhtälöllä (Rissanen, 2021):

$$U_m = 3I_{o_{max}} * k_r * R_m \quad (5.2)$$

missä

U_m = maadoitusjännite

$3I_{o_{max}}$ = syöttöverkon maksimitilanteen maasulkuvirta

k_r = reduktiokerroin

R_m = mitattu maadoitusresistanssi

Sähköasemaa syöttävän 110 kV verkon reduktiokerroin on 0,4. Reduktiokerroin tarkoittaa sitä, paljonko maasulkuvirtaa menee maata pitkin ja loput maasulkuvirrasta kulkevat ukkosjohtimia pitkin. Reduktiokerroin määräytyy ukkosjohtimen tyypin mukaan. Reduktiokerrointa käytetään, kun määritellään sallittuja kosketusjännitteitä ja aikoja. Sallittu maadoitusjännitteen tavoitearvo on alle $2 * U_{Tp}$, mutta joissain tapauksissa sallitaan myös $4 * U_{Tp}$ (SFS 6001). Sallittuun kosketusjännitteeseen vaikuttaa vian kesto-aika eli siihen voidaan vaikuttaa suojausasettelujen laukaisuajoilla. Maadoitusjännitettä voidaan pienentää parantamalla maadoituksia.

Jos mitattu maadoitusresistanssi on esim. 1Ω maadoitusjännitteeksi saadaan $I_{o>}$ portaalla 1480 V. Tämä voidaan jakaa kahdella, jolloin saadaan sallittu kosketusjännite U_{Tp} , joka on 740 V. Katsomalla kuvaa 3.3 voidaan todeta, että 740 V on noin 40 ms kohdalla. $I_{o>>}$ portaan toiminta-aika on 40 ms, johon pitää vielä lisätä katkaisijan toiminta-aika, joka on noin 50 ms. $I_{o>>}$ portaan kokonaistoiminta-aika on tässä tapauksessa noin 90 ms ja tavoitearvo $2 * U_{Tp}$ ei täyty. Tavoitearvona oleva $2 * U_{Tp}$ toteutuu noin $0,9 \Omega$ maadoitusresistanssilla.

Muuntajan yläjännitepuoli suojataan kahdella ylijänniteportaalla. Ensimmäinen ylijänniteporras $U>$ on hälyttävä ja toinen $U>>$ laukaiseva. Alijännitesuojauksen ensimmäinen porras $U<$ on hälyttävä ja toinen $U<<$ porras laukaiseva. Ylijännitesuojauksen mittausta toteutetaan 110000/100 V jännitemuuntajilla. Laukaisevien portaiden arvot ovat

$U_{<<} < 0,75 \times U_n$ ja $0,1$ s sekä $U_{>>} > 1,4 \times U_n$ ja 600 s (Väylä). Hälyttävillä portaille annetaan lähempänä nimellistä olevat arvot, jotka on esitetty taulukossa 5.5. Hälyttävien portaiden viiveet asetellaan siten, että hälytystä ei tule hetkittäisistä ylityksistä. Jännitesuojaukset toteutetaan tässä tapauksessa pääsuojalla, mutta ei varasuojalla.

Taulukko 5.5. Kentän 3.01 yläjännitepuolen suojausasettelut. Suluissa ensiövirta tai -jännite.

Syöttökentän 3.01 asetellut				
Suoja	Pääsuoja ABB RET630		Varasuoja ABB REF615	
$I_{>}$	$1,1 \times I_n$ (220A)	1,2 s	$1,1 \times I_n$ (220 A)	1,3 s
$I_{>>}$	$3,0 \times I_n$ (600 A)	0,3 s	$3,0 \times I_n$ (600 A)	0,4 s
$I_{>>>}$	$6 \times I_n$ (1200 A)	0,02 s	$6 \times I_n$ (1200 A)	0,1 s
$I_{o>}$	$0,3 \times I_n$ (60 A)	0,5 s	$0,3 \times I_n$ (60 A)	0,6 s
$I_{o>>}$	$1,4 \times I_n$ (280 A)	0,04 s	$1,4 \times I_n$ (280 A)	0,1 s
$U_{<}$	$0,85 \times U_n$ (93,5 kV)	5,0 s	-	-
$U_{<<}$	$0,75 \times U_n$ (82,5 kV)	0,1 s	-	-
$U_{>}$	$1,2 \times U_n$ (132 kV)	5,0 s	-	-
$U_{>>}$	$1,4 \times U_n$ (154 kV)	600 s	-	-

5.3.2 Muuntajan differentiaalisuojaus

Muuntajan differentiaalisuojaus on toteutettu RET630 -releellä. Differentiaalisuojauksen erovirta lasketaan ylä- ja alajännitepuolien virtojen avulla. Yläjännitepuolen virtamuuntajien muuntosuhde on $200/5$ A ja alajännitepuolen virtamuuntajien $500/5$ A.

Differentiaalisuojauksen perusasetus lasketaan yhtälöllä (Mäkinen,2008):

$$P = 0,5 * S + P_{noload\%} \quad (5.3)$$

missä

P = perusasetus

S = havahtumissuhde

$P_{noload\%}$ = muuntajan suurimman käyttöjännitteen tyhjäkäyntikuorma prosentteina

Havahtumissuhde saadaan laskettua yhtälöllä (Mäkinen,2008):

$$S = E_{VM,YJ} + E_{VM,AJ} + E_{rele} + E_{marginaali} + E_{käämikytkin} \quad (5.4)$$

missä

$E_{VM,YJ}$ = yläjännitepuolen virtamuuntajien tarkkuus

$E_{VM,AJ}$ = alajännitepuolen virtamuuntajien tarkkuus

E_{rele} = suojareleen mittauksen tarkkuus

$E_{käämikytkin}$ = käämikytkimen säätöalue

Differentiaalisuojauksen perusasetteluksi saadaan yhtälön 5.3 mukaan: 30 % ja havahtumissuhteeksi yhtälön 5.4 mukaan: 40 %.

Toinen käänneaste on perinteisesti 150-200 %. Suurilla tehomuuntajilla käytetään 200 %, mutta pienemmillä muuntajilla 150 % riittää. Differentiaalisuojauksen yläasettelu määritellään muuntajan oikosulkutehon mukaan. Muuntajan yläasettelu asetellaan niin, että se on muuntajan sisäisen vian ulkopuolella, mutta differentiaalisuojauksen sisäisen alueen sisällä. Muuntajan yläasettelu ei ota harmonisten yliaaltojen lukitusta huomioon, koska se ei ota kytkentävirtasäyksen aiheuttamia harmonisia huomioon. Yläasettelulla suojataan yläjännitepuolen virtamuuntajien ja muuntajan yläjännitenapojen välisiä vikoja. Yläasettelusuojauksen asettelu arvo lasketaan yhtälöllä (Electricalbaba, 2018):

$$D_{ylä} = \frac{\frac{S_n \cdot Z_k}{100}}{CT_{ensio}} * CT_{korjaus} * 1,3 \quad (5.5)$$

missä

$D_{ylä}$ = differentiaalisuojauksen yläasettelu

CT_{ensio} = yläjännitepuolen virtamuuntajan ensiöarvo

$CT_{korjaus}$ = yläjännitepuolen virtamuuntajan korjauskerroin

Yhtälölle 5.5 käytetään varmuuskertoimena 1,3 tai 1,4 arvoa, jotta vika on varmasti muuntajan ulkopuolella. Tämän muuntajan suojauksessa käytettävän yläjännitepuolen virtamuuntajan ensiöarvo on 200 A ja korjauskerroin ensiöarvo/nimellisvirta = 1,856. Kaavaa käyttäen yläasettelun arvoksi saadaan 1300 %.

Toisen harmonisen esto on 12 %. Kolmivaihemuuntajien differentiaalisuojauksessa käytetään arvoa 15 %. Käytettäessä RET630 muuntajasuojaa, jota käytetään kolmivaihemuuntajien suojanakin, tiputetaan toisen harmonisen asetteluarvoa, koska suojariele laskee vaiheiden painotettuja keskiarvoja ja koska ratasähköaseman päämuuntajassa ei ole kuin kaksi mittausta käytössä täytyy asettelua laskea hieman.

Differentiaalisuojauksessa virtamuuntajien muuntosuhde pitää korjata, koska suojariele vertailee erovirtaa x_{In} suhteilla. Ensiö- ja toisiopuolilla virtamuuntajien suhteet nimellisvirtaan eivät välttämättä ole samat, joten ensiö- ja toisiopuolten virtamuuntajille täytyy antaa korjauskertoimet tai -virrat. RET630 -suojarielellä korjausvirrat annetaan antamalla ensiö- ja toisiopuolten nimellisvirrat releelle, josta ne luetaan differentiaalisuojauksen lohkolle. Taulukossa 5.6 ovat differentiaalisuojaukselle lasketut asetteluarvot.

Taulukko 5.6. Kentän 3.01 differentiaalisuojauksen suojausasettelut.

Differentiaalisuoja ABB RET630				
Perusasettelu	Havahtumissuhde	2. käänneaste	Yläasettelu	2. harm. esto
30 %	40 %	150 %	1300 %	12 %

5.3.3 Käämikytkimien ohjaus

Muuntajan käämikytkimellä pystytään säätämään muuntajan muuntosuhdetta. Tämän sähköaseman päämuuntajassa on käämikytkin, jonka keskiasento on asennossa 10. Käämikytkin pystyy säätämään jännitettä yhdeksän kertaa ylös tai alas. Yhden portaan muutos on 1,33 %. Käämikytkimien ohjauksessa käytetään 60 s viivettä ja käämikytkin pyrkii pitämään alajännitepuolen jännitteen muuntajan nimellisenä eli 27,5 kV. Jännitevirtamuuntajan ensiön nimellisarvo on kuitenkin 25 kV, joten releelle annetaan arvoksi 27,5 kV / 25 kV eli 1,1 x_{Un} . Käämikytkin lukitaan 700 A virralla valmistajan ohjeiden mukaisesti. Jännitteen sallituksi virheeksi annetaan 2,5 %. Arvossa annetaan virheprosentin yhteenlaskettu summa molempiin suuntiin, joten rele ohjaa käämikytkimä ylös tai alas aina kun toisiosion jännite poikkeaa yli 1,25 % releelle annetusta ohjearvosta, joka on 1,1 x_{Un} . Sallitun virheen ohjearvo on noin kaksi kertaa käämikytkimien yhden portaan muuntosuhde, joka on tällä muuntajalla 1,33 %. Asettelyä ei suositella laitettavan

pienemmäksi kuin käämikytkimen yhden portaan muutos on, koska muuten jännite ei pysyisi sallituissa rajoissa vaan rele ohjaisi sitä koko ajan joko ylös tai alas.

5.3.4 Muuntajan alajännitepuolen suojausten määrittäminen

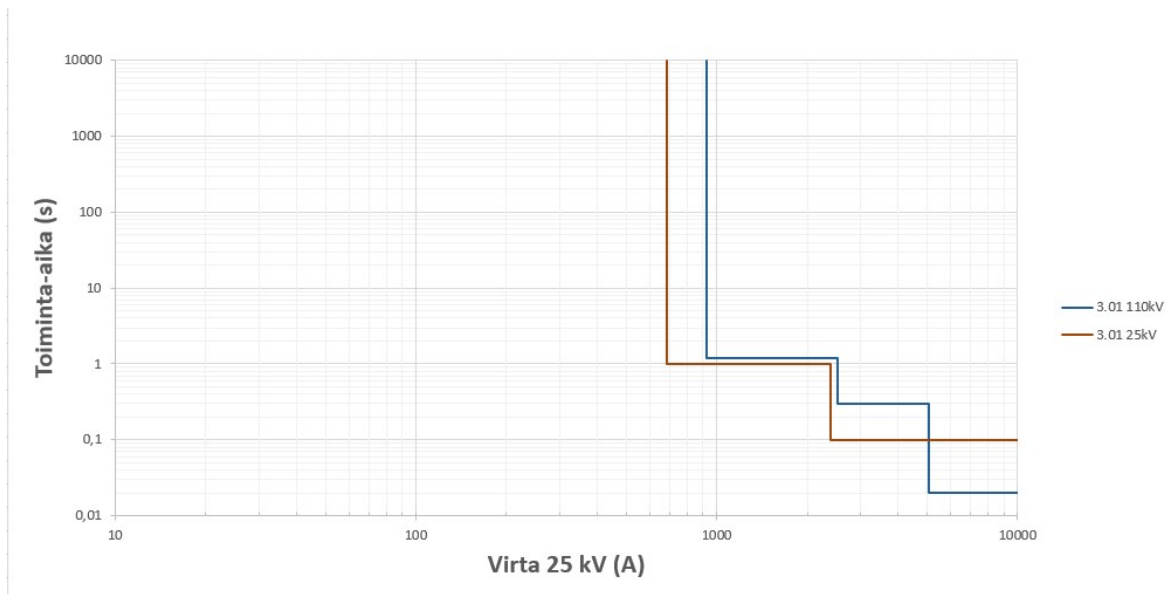
Alajännitepuolen kiskon nimellisjännite on 27,5 kV. Kisko suojataan kahdella ylivirtaportaalla. Ensimmäisen ylivirtaportaan $I>$ asetteluarvona käytetään 1,6 -kertaa päämuuntajan nimellisvirran suuruista arvoa. Tämä sallii muuntajan pienen ylikuormituksen. Toinen ylivirtaportas $I>>$ on kisko-oikosulkuja varten. Oikosulkuvirrat ratalähtöjen alussa ovat 4,07-4,47 kA. $I>>$ asetteluna käytetään pienempää arvoa kuin oikosulkuvirta kerrottuna 0,7:llä ja selektiivisyyden saamiseksi pienempää arvoa kuin muuntajan yläjännitepuolen $I>>$ portas. Ratalähtöjen 6.12 ja 6.13 $I>$ ylivirtaportaiden havahtumiset lukitsevat muuntajan alajännitepuolen $I>>$ portaan. Muuntajan alajännitepuolen ylivirta-asettelut esitetään taulukossa 5.7.

Taulukko 5.7. Kentän 3.01 alajännitepuolen suojausasettelut.

Syöttökentän 3.01 25kV asettelut				
Suoja	Pääsuoja ABB RET630		Varasuoja ABB REF615	
$I>$	1,46 xIn (730 A)	1,0 s	-	-
$I>>$	4,8 xIn (2400 A)	0,1 s	-	-

Taulukossa 5.4 esitetty muuntajan toision yhden sekunnin terminen kestävyys on 4,07 kA. Releen hitaampi portas laukaisee 1,0 s 2,4 kA asti, joten muuntajan toisio kestää termisesti vikavirran $I>$ portaalla. $I>>$ laukaisee 2,4 kA vikavirran 0,1 s. Suurin mahdollinen vikavirta muuntajan toisiossa on taulukossa 5.3 esitetty 4,78 kA. Käyttämällä yhtälöä 4.7 voidaan laskea muuntajan kestävän sitä 0,72 s verran. Myös $I>>$ portas suojaaa muuntajaa termisesti.

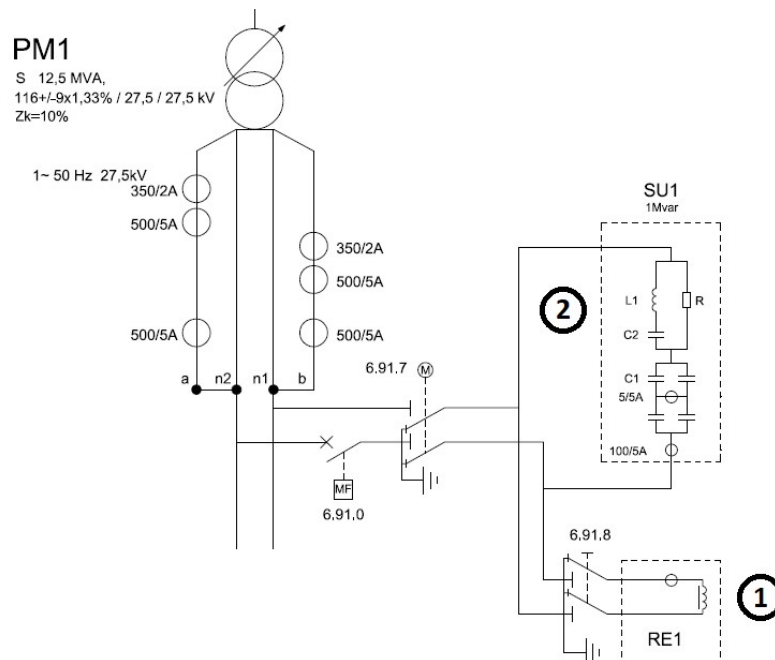
Kuvassa 5.5 on esitetty 110 kV ja 25 kV ylivirtasuojauksien toimintakäyrät. Suojaukset ovat toteutettu selektiivisesti siten, että 25 kV suoja laukaisee aina ennen 110 kV suoja, jos vika on 25 kV suojauksen alueella. Muuntajan yläjännitepuolen $I>>>$ momenttiportaan asetteluarvo on 1200 A, joka on redusoituna 25 kV virraksi 5,06 kA. Muuntajan alajännitepuolen oikosulkuvirrat eivät ole näin suuria, joten 25 kV puolella sattuvat viat eivät laukaise $I>>>$ porrasta.



Kuva 5.5 Kentän 3.01 ylivirtasuojauksien toimintakäyrät. Sinisellä 110 kV suojaukset ja ruskealla 25 kV suojaukset.

5.4 Suodatin- ja reaktorikentän 6.91.0 suojauksien määrittäminen

Kuvassa 5.6 on esitetty suodattimen ja reaktorin pääkaaviokuva. Suodatin on suojattu ABB:n REV615 -releellä ja reaktorin ABB:n REF615 -releellä.



Kuva 5.6. Sähköaseman kompensointilaitteisto. (1) reaktori, (2) suodatin.

Kompensointilaitteisto on kytketty päämuuntajan PM1 alajännitepuolelle. Suodattimen ja reaktorin vikatilanteessa laukaistaan katkaisija 6.91.0. Reaktori on esitetty kuvassa 5.6

kohdalla 1 ja suodatin kohdalla 2. Reaktorin virtamuuntajat ovat muuntosuhteeltaan 40/1 A. Suodattimen ylivirtasuojauksessa käytettävät virtamuuntajat ovat muuntosuhteeltaan 100/5A ja epäsymmetriasuojauksessa käytettävät 5/5 A.

5.4.1 Suodattimen suojaus

Suodatin suojataan ylivirta- ja epäsymmetriasuojilla. Ylivirtasuojauksessa on kaksi porrasta, joista molemmat ovat laukaisevia. Epäsymmetriasuojauksella ensimmäinen porras on hälyttävä ja toinen porras laukaiseva.

Ensimmäisen ylivirtaportaan $I >$ suositeltava asetteluarvo on $1,3 \times I_N$, mutta pariston kapasitanssi saattaa olla, joskus 10 % suurempi mitä ilmoitettu nimellisarvo on, jolloin asettelu arvo on $1,43 \times I_N$. Toisella ylivirtaportaalla $I >>$ asetteluarvon on oltava pienempi kuin oikosulkuvirta, mutta suurempi kuin kytkentävirta. $I >>$ portaalla laukaisuaika on hyvin lyhyt tai välitön. (Mörsky, 1993)

Pariston yksiköissä tapahtuvat sulakekäämien sisäisten sulakkeiden palamiset aiheuttavat impedanssien muutoksia suojattavaan laitteeseen. Epäsymmetriasuojan asetteluarvo asetellaan sen perusteella, että minkään kondensaattoriryhmän yli vaikuttava jännite ei ole yli 10 % suurempi kuin verkon nimellisjännite. Suuremmissa paristoissa suositellaan käytettäväksi kaksiportaista epäsymmetriasuojaa, jossa ensimmäinen porras on hälyttävä ja toinen laukaiseva. Ensimmäinen porras antaa hälytyksen, kun sen jännite- tai virta 50–60 % toisen portaan asetteluarvosta. Epäsymmetriasuojauksen asetteluarvot kannattaa kysyä laitteen toimittajalta, koska laskentaan tarvitaan laitteen sisäiset kytkentätiedot sekä nimellisjännite ja -teho. (Mörsky, 1993)

Suodatinkondensaattoripariston nimellisvirta on 87 A. Ylivirtasuojauksen $I >$ portaan asetteluksi saadaan $1,43 \times I_N$ eli 124,4 A. $I >>$ portaan asetteluarvona käytetään kytkentävirtasysäystä suurempaa arvoa ja pienempää kuin oikosulkuvirta-arvoa. Suodattimen ja reaktorin ollessa muuntajan alajännitepuolen välittömässä läheisyydessä oikosulkuvirrat ovat minimi- ja maksimitilanteessa yli 4 kA.

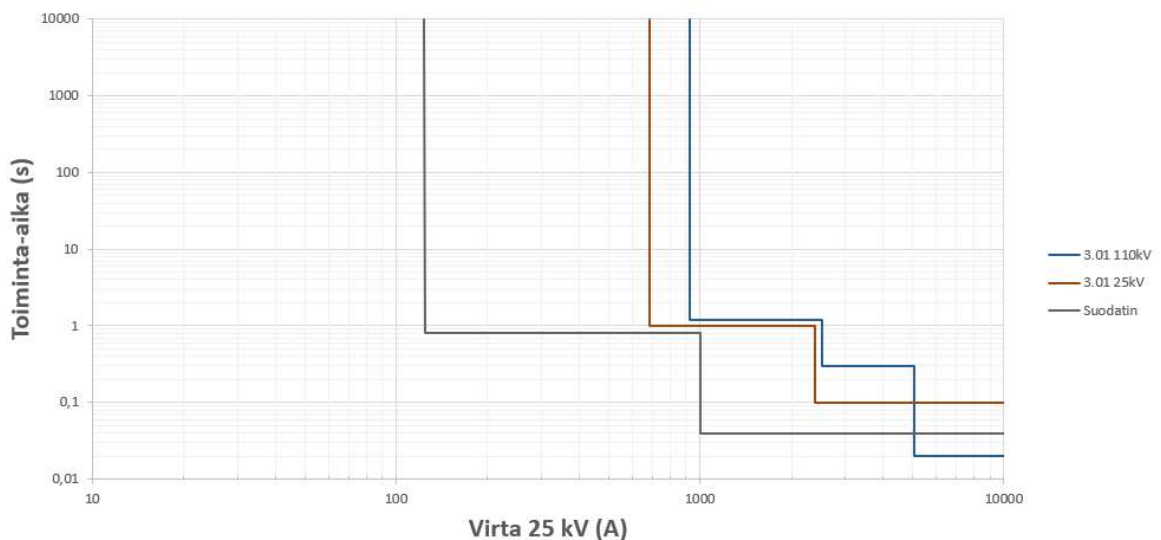
Toimittajan suosittelemat asetellut epäbalanssisuojan ensimmäiselle hälyttävälle portaalalle on 0,3 A ja viive 5 s. Toisen laukaisevan portaan asettelu on 0,65 A ja 0,1 s. Virta-arvot ovat

toisiovirtoja. Yli 1 A toisiovirrat on estetty suojausasetteluin ja suodattimen sisäisin sulakkein. Suodattimen asetteluarvot esitetään taulukossa 5.8.

Taulukko 5.8. Kentän 6.91.0 suodattimen suojausasettelut. Suluissa ensiövirta.

Suodatin- ja reaktorikentän 6.91.0 asettelut		
Suodattimen suoja ABB REV615		
$I>$	1,24 xIn (124 A)	0,8 s
$I>>$	10 xIn (1000 A)	0,04 s
$dI>C$	0,3 xIn (0,3 A)	5 s
$dI>>C$	0,65 xIn (0,65 A)	0,1 s

Kuvassa 5.7 on esitetty reaktorikentän ylivirtasuojauksen selektiivisyyskäyrästä. Reaktorikenttä on selektiivinen syöttökentän kanssa. Reaktorikentän oikosulkuvirta ei yllä 110 kV $I>>>$ portaan suuruiseksi, joka on redusoituna toisiopuolelle 5,06 kA.



Kuva 5.7 Suodatinkentän ylivirtasuojauksen selektiivisyyskäyrästä. Sinisellä kentän 3.01 110 kV suojat, ruskealla kentän 3.01 25 kV suojat ja harmaalla suodatinkentän ylivirtasuojat.

5.4.2 Reaktorin suojaus

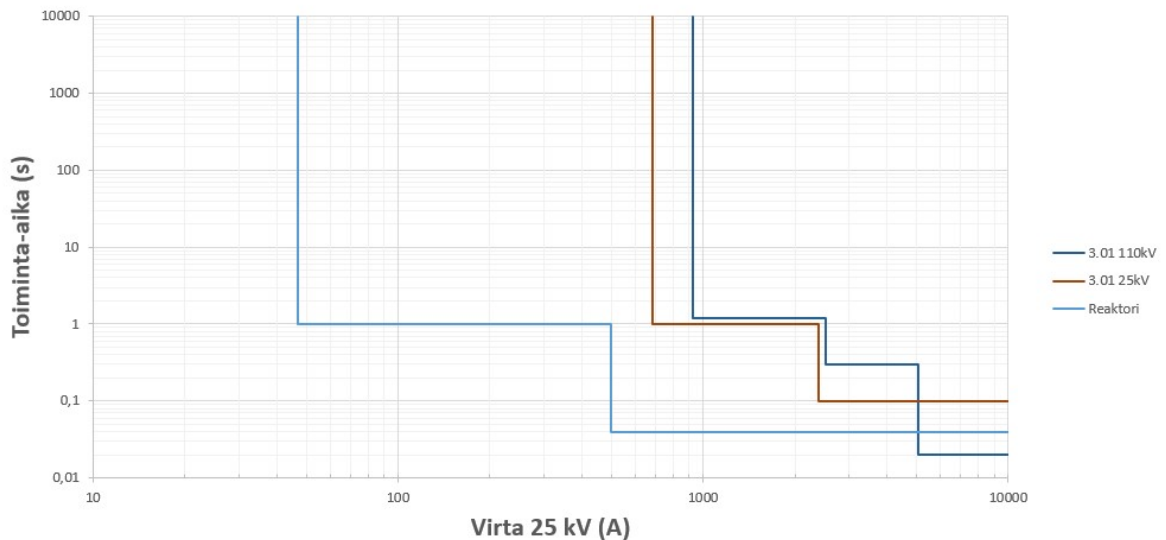
Reaktori suojataan pelkästään kahdella ylivirtaportaalla. Molemmat ylivirtaportaavat ovat laukaisevia. Reaktorin vikaantuessa laukaistaan sama katkaisija kuin suodattimen tapauksessa eli katkaisija 6.91.0.

Reaktorin nimellisvirta on 36,4 A. $I >$ ylivirtaportaan asetteluarvoksi saadaan $1,3 \times I_n$ eli 47,3 A. $I >>$ porras on suurempi kuin kytkentävirtasysäys, mutta pienempi kuin oikosulkuvirta. Reaktorin kytkentävirtasysäys on valmistajan ilmoittama 380 A. Muuntajan alajännitepuolen oikosulkuvirta on yli 4 kA. Reaktorin asetteluarvot esitetään taulukossa 5.9.

Taulukko 5.9. Kentän 6.91.0 reaktorin suojausasettelut.

Suodatin- ja reaktorikentän 6.91.0 asettelut		
Reaktorin suoja ABB REF615		
$I >$	$1,18 \times I_n$ (47 A)	1,0 s
$I >>$	$12,5 \times I_n$ (500 A)	0,04 s

Reaktorin yhden sekunnin terminen kestävyys on taulukossa 5.4 esitetty 6,70 kA. Muuntajan alajännitepuolen maksimioikosulkuvirta on 4,78 kA. Rele laukaisee vikavirrat 500 A jälkeen 40 ms ja sen ennen tätä 1 s. Suojaus on siis termisesti kestävä. Kuvassa 5.8 on esitetty reaktorikentän selektiivisyyskäyrästä.

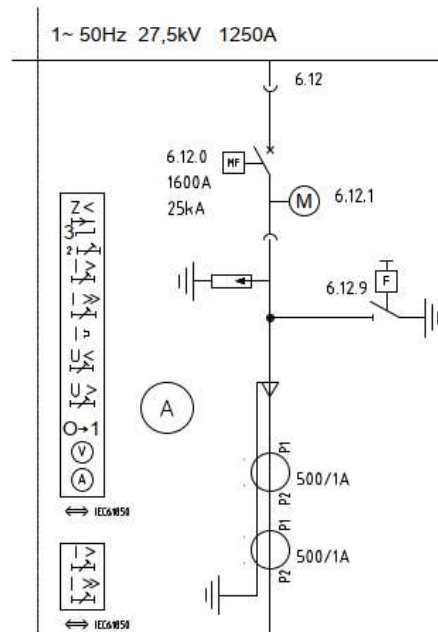


Kuva 5.8 Reaktorikentän ylivirtasuojauksen selektiivisyyskäyrästä. Tummansinisellä kentän 3.01 110 kV suojat, ruskealla kentän 3.01 25 kV suojat ja vaaleansinisellä reaktorikentän ylivirtasuojat.

Kuvasta 5.8 voidaan todeta, että suojaus on selektiivinen, koska kuten suodatinkentän tapauksessa myöskään tässä oikosulkuvirrat eivät yllä niin suuriksi, että 110 kV suoja laukeaisi muuntajan alajännitepuolen vioissa.

5.5 Ratalähdön 6.12 suojausten määrittely

Ratalähdön 6.12 pääsuojana toimii Hitachin:n RER 670 -suojarele ja varasuojana toimii ABB:n REF615 -suojarele. Kuvassa 5.9 on pääkaaviossa esitetty ratalähtö 6.12.



Kuva 5.9 Ratalähdön 6.12 pääkaaviokuva.

Ratalähtö on suojattu distanssi-, lämpö-, ylivirta- ja jännitesuojilla. Distanssisuojaus käynnistää pikajälleenkytkennän, aikajälleenkytkentää ei käytetä. PJK:n ajaksi asetellaan 4 s. JK ohjelmoidaan releelle siten, että sen voi ohjata kaukokäytön avulla tai releen mimiikalta päälle ja pois käytöstä. Releet ohjaavat katkaisijaa 6.12.0. Yli- ja alijännitesuojien ensimmäisiä portaita käytetään hälyttävänä ja toisia laukaisevina. Ratalähdön 6.12 virtamuuntajien muuntosuhde on 500/1 A. Ratalähdöillä käytetään katkaisijan vikasuojaa. Jos katkaisija 6.12.0 ei aukea laukaisukäskystä huolimatta lähetetään laukaisukäsky 110 kV katkaisijalle 3.01.0.

5.5.1 Distanssisuojauksen määrittely

Koska aseman järjestelmänä on imumuuntajajärjestelmä, on mahdollisia vikatyyppejä vain yksi, joka on ajojohtimen ja maan välinen vika. Tämän takia distanssisuojaukselle ei tarvitse laskea parametrejä kuin tälle vikatyypille.

Distanssisuojaus on toteutettu pääsuojana toimivalla RER670 -releellä. Distanssisuojauksessa käytetään kolmea vyöhykettä. Vain ensimmäinen ja toinen vyöhyke käynnistävät pikajälleenkytkennän. Pikajälleenkytkennän jännitteetön aika on 4 sekuntia.

Distanssisuojauksen vyöhykkeiden impedansseja määrittäessä ei käytetä oikosulkuvirtoja laskettaessa käytettyjä impedansseja, koska distanssirele ei huomioi releen syöttöverkon puolen impedansseja. Distanssirele sijaitsee origossa ja impedanssit lasketaan vain releen jälkeen olevasta verkosta. Syöttöverkon oikosulkuteholla ei myöskään ole merkitystä distanssisuojauksen toimintaan, koska distanssisuojaus laskee impedansseja releen jälkeisestä verkosta eikä vikavirtojen suuruutta. Releen jälkeen olevaan verkkoon kuuluu ratalähdön katkaisijalta radan varteen asti menevä maakaapeli ja sen jälkeinen ratajohto sekä imumuuntajat. Distanssisuojausta varten lasketaan maakaapelin, ratajohdon sekä imumuuntajien resistanssit ja reaktanssit. Resistanssien ja reaktanssien käytetyt arvot löytyvät taulukosta 5.1. Distanssisuojauksen ensimmäinen vyöhyke suojaa ratalähdön loppuun eli erotuskenttään asti. Koska ratasähköverkon kytkentätopologia ei ole kuten siirtoverkoissa eli sähköradoilla ei ole perättäisiä katkaisijoita ja suojia distanssireleen jälkeen niin ensimmäisen vyöhykkeen impedanssin arvot kerrotaan kertoimella 1,2, jotta ensimmäinen vyöhyke toimii varmasti erotuskentän ennen tapahtuvissa vioissa. Toisella vyöhykkeellä suojataan korvattavan rataosuuden loppuun eli seuraavalle sähköasemalle asti. Impedanssin arvot lasketaan seuraavalle asemalle asti ja impedanssin arvo kerrotaan arvolla 1,2. Kolmas vyöhyke suojaa yli seuraavan sähköaseman, asettelu täytyy laskea huomioiden, että ratajohdolle jää tarpeeksi kuormitusvaraa. Kaikki vyöhykkeet asetellaan toimimaan eteenpäin. Kolmas vyöhyke sallii 25 MVA kuormituksen, joka on 2 kertaa päämuuntajan nimellistehon verran. Ratalähdön 6.12 distanssisuojauksen asetteluarvot esitetään taulukossa 5.10.

Taulukko 5.10. Ratalähdön 6.12 distanssisuojanasettelut.

Distanssisuoja Hitachi RER670					
Vyöhyke	Suunta	$R (\Omega)$	$X (\Omega)$	$Z (\Omega)$	$t (s)$
Z1	Eteen	3,25	11,07	11,53	0,0 s
Z2	Eteen	6,64	24,08	24,98	0,2 s
Z3	Eteen	27,23	101,61	105,19	0,5 s

5.5.2 Vikapaikan etäisyyden määrittely

Vikapaikan etäisyyden määrittelyssä suojareleelle annetaan verkon komponenttien impedanssit, jotta rele osaa verrata niitä mitattuun impedanssiin. Mitatun impedanssin ja verkon komponenttien avulla rele osaa antaa arvion vikapaikan etäisyydestä. Annetaan releelle distanssisuojauksessa käytetyn toisen vyöhykkeen resistanssi ja reaktanssi ilman varmuuskerrointa 1,2 sekä taulukossa 5.2 esitetyt matkat seuraavalle sähköasemalle.

5.5.3 Ylivirtasuojauksen ja jännitesuojauksien määrittely

Ylivirtasuojaus toteutetaan sekä pääsuoja RER670- ja varasuoja REF615 -releillä. Molemmissa on käytössä kaksi laukaisevaa ylivirtaporrasta. Ensimmäinen ylivirtaporras suojaa seuraavalle sähköasemalle asti ja toinen ylivirtaporras erotuskentälle asti. Seuraavalla sähköasemalla oikosulkuvirrat ovat 1,08-1,12 kA. Ensimmäisen ylivirtaportaan asetteluarvo ei saa olla pienempi kuin mahdollinen kuormitusvirta. Kiskosuojan I> portaan asetteluarvona on aikaisemmin määritelty 680 A, joten valitaan asetteluarvoksi tätä pienempi arvo. Käytetään I> portaalla asetteluarvoa 500 A. Sähköasemien välissä olevan erotuskentän kohdalla oikosulkuvirrat ovat 1,74-1,90 kA. Käytetään I>> portaalla erotuskentän pisteen oikosulkuvirran arvoa. Ylivirtasuojaus toimii varasuojana distanssisuojaukselle. Tästä johtuen asetellaan I>> portaan asetteluarvo siten, että se ei laukaise toisen distanssivyöhykkeen vioissa, koska I>> porrast toimii nopeammin kuin toinen distanssivyöhyke. I> portaan havahtuminen lähettää lukituskäskyn syöttökentän 110kV I>> suojalle sekä syöttökentän 25 kV I>> suojalle.

Yli- ja alijännitesuojissa on molemmissa käytössä kaksi porrasta, joista ensimmäiset ovat hälyttäviä ja toiset laukaisevia (VÄYLÄ). Hälyttävät portaat antavat hälytyksen arvolla, joka on lähempänä nimellistä kuin laukaiseva porrast. Muuntajan alajännitepuolen jännitesuojauksella suojataan sähköasemalla ja sähköradoilla olevia laitteita ja komponentteja. Junissa on omat katkaisijansa ja jännitesuojansa, jotka suojaavat junan sähkömoottoreita ja -laitteita. Ratalähtöjen jännitesuojaus toteutetaan pelkästään pääsuojalla. Ratalähdön 6.12 ylivirta- ja jänniteasettelut esitetään taulukossa 5.11.

Taulukko 5.11. Ratalähdön 6.12 Ylivirta- ja jännitesuojien asettelut.

Ratalähdön 6.12 asettelut				
Suoja	Pääsuoja Hitachi RER670		Varasuoja ABB REF615	
I>	1,0 xIn (500 A)	0,3 s	1,0 xIn (500 A)	0,4 s
I>>	3,8 xIn (1900 A)	0,1 s	3,8 xIn (1900 A)	0,2 s
U<	0,9 xUn (22,5 kV)	5,0 s	-	-
U<<	0,8 xUn (20 kV)	5,0 s	-	-
U>	1,15xUn (28,75 kV)	5,0 s	-	-
U>>	1,18xUn (29,5 kV)	5,0 s	-	-

Taulukossa 5.4 esitetyistä ratajohdon komponenteista huonoin terminen kestävyys oli imumuuntajalla, jonka terminen yhden sekunnin kestävyys on 5,66 kA. I>> porras laukaisee 1,9 kA oikosulun 0,1 sekunnissa ja tätä pienemmät viat 0,3 s. Johtolähdön alun maksimivikavirta on 4,74 kA, jota imumuuntaja kestää 1,42 s ajan. Vikavirrat pienenevät kauemmaksi mentäessä, joten ratalähdön alun tarkastelu riittää. Ratalähdön ylivirtasuojaus toimii varasuojana distanssisuojalle, joten todellisuudessa distanssisuojaus poistaa viat nopeampaa kuin ylivirtasuojaus.

5.5.4 Lämpösuojauksen määrittely

Lämpösuojaus suojaa ratajohtoa termiseltä rasitukselta. Lämpösuojaus on toteutettu RER670 -releellä. Lämpösuojauksen asettelut lasketaan verkon heikoimman komponentin mukaan. Lämpösuojaukselta varten on käytössä yksiporras, joka viiveeltään käänteisaikakäyräinen. Mitä suurempi virta kulkee, sitä nopeammin suoja laukaisee. Rele laskee myös johdon jäähtymistä, joka asetellaan releeseen komponentin lämpenemisaikavakion mukaan. Suojaa varten pystytään antamaan virta-arvo, jolla määritetään maksimikuormitusvirta, hälytys- ja laukaisulämpötilat sekä jälleenkytkennän eston palautuslämpötila. Lämpösuojauksen asettelut esitetään taulukossa 5.12.

Taulukko 5.12. Lämpösuojan asettelut.

Lämpösuoja Hitachi RER670						
τ	Tref	Iref	Tamb	Talarm	Ttrip	ReclTemp
6,7 min	75 °C	200 A	40 °C	105 °C	115 °C	100 °C

Lämpösuojan toiminta-aika voidaan laskea relemanuaalista (RER670 TM) saadulla yhtälöllä:

$$t = \tau * \ln\left(\frac{I^2 - I_p^2}{I^2 - \frac{T_{trip} - T_{amb}}{T_{ref}} * I_{ref}^2}\right) \quad (5.6)$$

Missä

T_{trip} = aseteltu laukaisulämpötila

T_{amb} = ulkolämpötila

T_{ref} = lämpötilan nousu ulkolämpötilan yläpuolelle I_{ref} arvolla

I_{ref} = asettelu virta-arvo

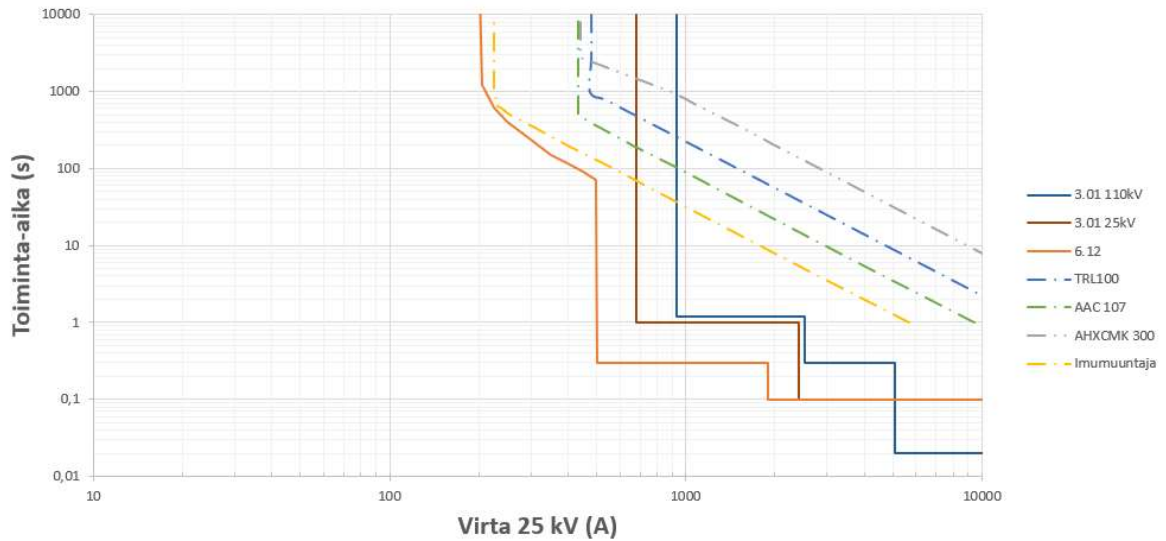
I = mitattu virta

I_p = kuormitusvirta ennen kuin ylikuormitus alkaa

Taulukko 5.13. Lämpösuojauksen lasketut ja yhtälön 5.6. perusteella saadut toiminta-ajat.

Ratalähdön 6.12 lämpösuojauksen toiminta-ajat		
Virta (A)	Terminen kestävyys (s)	Yhtälöllä 5.6 saadut ajat (s)
225	630	625
250	510	410
300	355	235
350	260	150
400	200	115
450	160	90
500	130	70

Kuvassa 5.10 on esitetty ratalähdön 6.12 lämpö- ja ylivirtasuojauksen selektiivisyyskäyrästä. Ratalähdön käyrässä oleva käänteisaikainen suoja on yllä mainittu lämpösuoja.

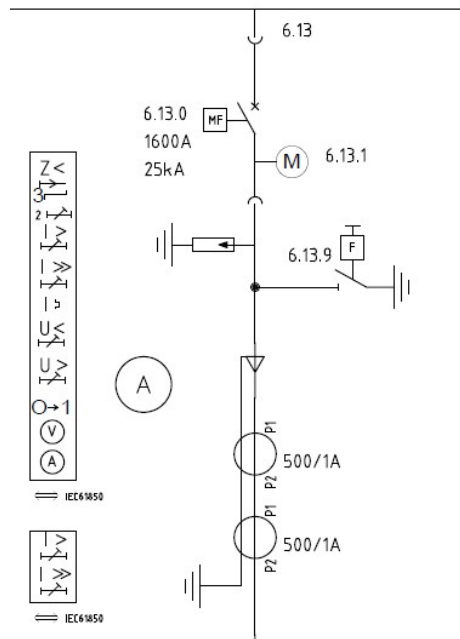


Kuva 5.10 Ratalähdön 6.12 selektiivisyyskäyrästä. Katkoviivalla imumuuntajan, kaapelin, ajolangan ja paluujohtimen kuormitettavuudet sekä termiset kestävyudet, oranssilla ratalähtö 6.12, sinisellä syöttökentän 110 kV ylivirtasuojat sekä ruskealla syöttökentän 25 kV ylivirtasuojat.

Kuvasta 5.10 voimme todeta, että oranssilla kuvattu ratalähtö ei ylitä ikinä katkoviivalla kuvattuja imumuuntajien, kaapelien ja ratajohtojen kuormitettavuuksia ja termisiä kestävyksiä. Ratalähdön 6.12 I> porras lukitsee syöttökentän 25 kV I>> portaan, joten voimme todeta, että suojaus on selektiivinen, vaikka ratalähdön I>> porras ja syöttökentän I>> porras menevätkin päällekkäin.

5.6 Ratalähdön 6.13 suojausten määrittelyminen

Kuvassa 5.11 on esitetty ratalähdön 6.13 pääkaaviokuva, joka on samanlainen kuin ratalähdöllä 6.12.



Kuva 5.11. Ratalähdön 6.13 pääkaaviokuva.

Käytetään ratalähdön 6.13 distanssi- ja ylivirtasuojauksen määrittelyihin samoja periaatteita kuin aikaisemmin määritellyssä ratalähdössä 6.12. Lämpösuojauksen asetteluarvot ovat samat kuin ratalähdössä 6.12, koska lähtöjen perässä olevat johdot ja kaapelit ovat samanlaisia. Jännitesuojaukset ovat myös identtiset radan 6.12 kanssa, ensimmäiset yli- ja alijänniteportaavat ovat hälyttäviä ja toiset laukaisevia. Jälleenkytkentätoiminto ohjelmoidaan releelle, joka käynnistyy distanssisuojauksen kahdesta ensimmäisestä vyöhykkeestä, mutta se jätetään pois käytöstä. Ratalähdöillä käytetään katkaisijan vikasuojaa. Jos katkaisija 6.13.0 ei aukea laukaisukäskystä huolimatta lähetetään laukaisukäsky 110 kV katkaisijalle 3.01.0. Taulukoissa 5.14 ja 5.15 on esitetty ratalähdön 6.13 suojausasettelut.

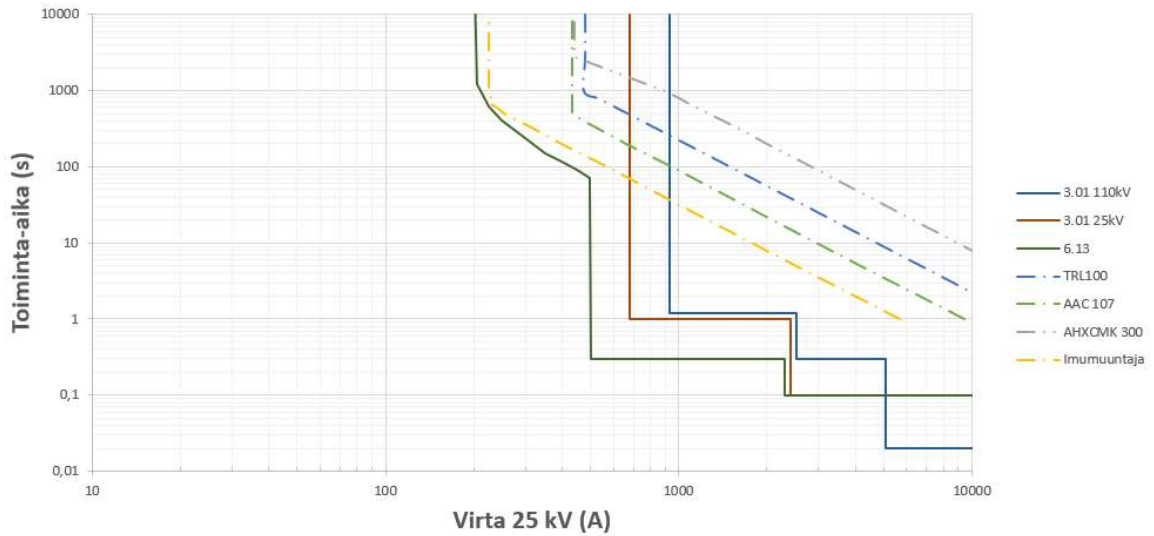
Taulukko 5.14. Ratalähdön 6.13 suojausasettelut. Suluissa olevat arvot ovat ensiövirtoja ja -jännitteitä.

Ratalähdön 6.13 asettelut						
Suoja	Pääsuoja Hitachi RER670			Varasuoja ABB REF615		
I>	1,0 xIn (500 A)	0,3 s		1,0 xIn (500 A)	0,4 s	
I>>	4,6 xIn (2300 A)	0,1 s		4,6 xIn (2300 A)	0,2 s	
U<	0,9 xUn (22,5 kV)	5,0 s		-	-	
U<<	0,8 xUn (20 kV)	5,0 s		-	-	
U>	1,15xUn (28,75 kV)	5,0 s		-	-	
U>>	1,18xUn (29,5 kV)	5,0 s		-	-	
Lämpösuoja Hitachi RER670						
τ	Tref	Iref	Tamb	Talarm	Ttrip	ReclTemp
6,7 min	75 °C	200 A	40 °C	105°C	115 °C	100°C

Taulukko 5.15. Ratalähdön 6.13 distanssisuojanasettelut.

Distanssisuoja Hitachi RER670					
Vyöhyke	Suunta	R (Ω)	X (Ω)	Z (Ω)	t (s)
Z1	Eteen	2,41	8,19	8,54	0,0 s
Z2	Eteen	6,64	24,08	24,98	0,2 s
Z3	Eteen	27,23	101,61	105,19	0,5 s

Ratalähdön 6.13 perässä oleva rataverkko on lyhyempi kuin verkon 6.12 perässä oleva rataosuus. Koska ratalähdöllä 6.13 voidaan syöttää ratalähtöä 6.12 korvaustilanteessa käytetään ylivirtasuojauksessa samoja asetteluja kuin ratalähdössä 6.13.



Kuva 5.12 Ratalähdön 6.13 selektiivisyyskäyrästä. Katkoviivalla imumuuntajan, kaapelin, ajolangan ja paluujohtimen kuormitettavuudet sekä termiset kestävyudet, vihreällä ratalähtö 6.13, sinisellä syöttökentän 110 kV ylivirtasuojat sekä ruskealla syöttökentän 25 kV ylivirtasuojat.

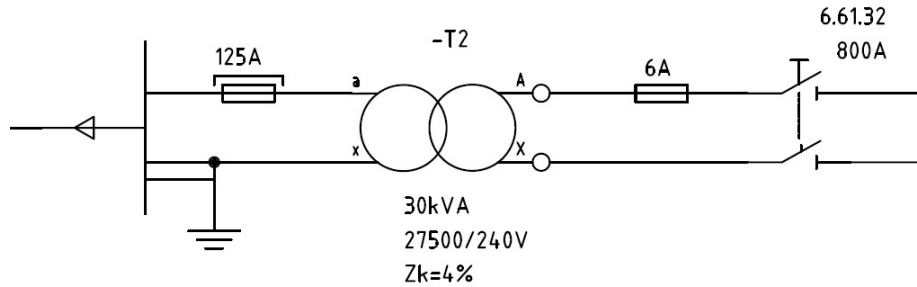
Kuvasta 5.12 voimme todeta, että vihreällä kuvattu ratalähtö ei ylitä ikinä katkoviivalla kuvattuja imumuuntajien, kaapelien ja ratajohtojen kuormitettavuuksia ja termisiä kestävyksiä. Ratalähdön 6.12 I>> porras lukitsee syöttökentän 25 kV I>> portaan, joten voimme todeta, että suojaus on selektiivinen, vaikka ratalähdön I>> porras ja syöttökentän I>> porras menevätkin päällekkäin.

Ratalähdöt 6.12 ja 6.13 voivat korvaustilanteissa syöttää toistensa rataosuudet. Näissä tilanteissa distanssisuojauksen vyöhykkeet eivät laukaise välttämättä oikean alueen vioissa, koska ratalähtöjen pituudet ovat erilaisia. Kuitenkin distanssi- ja ylivirtasuojaus suojaavat verkon komponentteja siten, ettei vaaratilanteita synny. Vikapaikan etäisyyden mittauksen pitäisi toimia vähintäänkin suuntaa antavasti myös korvaustilanteissa, koska ratajohtot ovat samanlaisia.

5.7 Omakäyttömuuntajan suojaus

Omakäyttömuuntajalla syötetään sähköaseman pienjännitteellä toimivia laitteistoja. Omakäyttömuuntaja syöttää vaihtosähkölaitteistoja sekä tasasuuntaajaa, joka suuntaa sähkön tasajännitteeksi. Tasajännitelaitteistot on varustettu akustoilla, jotta sähkökatkon ilmaantuessa sähköaseman laitteistot eivät lakkaisi toimimasta. Omakäyttömuuntajan

suojauksessa ei käytetä suojarelettä tai katkaisijaa vaan sulakkeita. Omakäyttömuuntaja on esitetty kuvassa 5.13.



Kuva 5.13 Sähköaseman omakäyttömuuntaja.

Omakäyttömuuntajan nimellisteho on 30 kVA ja sen muuntosuhde on 27500/240 V. Ensiöpuoli on suojattu 6 A sulakkeella, joka toimii oikosulkusuojana. Toisiopuoli on suojattu 125 A sulakkeella, joka toimii omakäyttömuuntajan ylikuormitussuojana.

5.8 Porrasajat

Ylivirtasuojauksille käytetyt porrasajat ovat laskettu aiemmin diplomityössä esitetyllä yhtälöllä 3.8. Porrasajaksi kyseisellä yhtälöllä saatiin: $2 \cdot 25 \text{ ms} + 35 \text{ ms} + 50 \text{ ms} + 20 \text{ ms} = 155 \text{ ms}$. Pyöristämällä kyseinen tulos ylöspäin 200 ms, varmistetaan porrastus varmasti riittäväksi. Asemalla on eri mallin releitä ja 110 kV ja 25 kV katkaisijoita, joiden ajat poikkeavat hieman toisistaan, joten porrastusajan laskemisessa käytetyissä arvoissa on käytetty suurimpia arvoja mitä aseman komponenteilla on. Käytetään 200 ms porrastusta jokaisella releellä, joissa ei ole käytössä lukituksia.

6 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli luoda laskentamenetelmät, joiden avulla voidaan määritellä suojausasetteluja ratasähköverkkoihin. Työn tuloksia tullaan hyödyntämään tulevaisuudessa Despro Engineering Oy:n ratasähköasemaprojekteissa. Laskentamenetelmien avulla luotiin Excel-työkalu laskentojen avuksi. Excel-työkalusta voidaan jalostaa laskentatyökalu myös muille sähköistysjärjestelmille ja verkkotyypeille. Työssä verrattiin Excelillä ja PowerFactoryllä laskettuja oikosulkuvirtoja toisiinsa. Excelin ja PowerFactoryn antamat oikosulkuvirrat olivat hyvin lähellä toisiaan pienimmällä oikosulkuteholla laskettaessa. Ero oli tällöin suurimmillaan vain 2 % luokkaa mitä voidaan pitää tarkkana tuloksena. Suurimmalla oikosulkuteholla oikosulkuvirrat poikkesivat toisistaan suurimmillaan 11 % verran, tässä tapauksessa tulokset eivät olleet tarkkoja toisiinsa nähden, mutta suuntaa antavia. Työn aikana tarkasteltiin sähköradan komponenttien termisiä kestävyyskäsitteitä suojausasetteluiden avulla sekä eri suojauskeinojen välistä selektiivistä toimintaa. Työssä lähestyttiin keskijännitetaso oikosulkuvirtoja 110 kV syöttöverkon maksimi- ja minimioikosulkutehokien kautta. Laskennan teoriaan käytettiin lähteinä kirjallisuutta, tieteellisiä julkaisuja ja koulujen materiaaleja. Komponenttien eri arvot olivat valmistajien ilmoittamia. Muut verkon rakenteen tiedot olivat projektin lähtötietoja. Diplomityön viidennessä luvussa käytetyt laskentaesimerkit ovat tehty imumuuntajajärjestelmälle, koska esimerkkitapauksen sähköistysjärjestelmä on imumuuntajajärjestelmä. Tässä työssä ei ole esitetty laskentaesimerkkejä säästömuuntajajärjestelmälle.

Toisin kuin julkisessa 20 kV sähköjakeluverkossa, sähköradoilla ei ole käytössä samanlaisia maasulkusuojia kuten julkisella jakelupuolella. Ratasähköjärjestelmän maasulkutilanne poikkeaa maasta erotetun ja sammutetun keskijänniteverkon maasuluista, koska ratasähköjärjestelmissä on käytössä paluujohdin toisin kuin maasta erotetussa ja sammutetussa verkossa. Suurimmat erot perinteiseen KJ-verkkoon ovatkin ratasähköjärjestelmässä käytettävä paluujohdin ja se, että kyseessä ei ole kolmivaihejärjestelmä. Ratasähköjärjestelmän maasulkuvirrat suojataan distanssi- ja ylivirtasuojauksella. Tärkein suoja onkin distanssisuoja, joka toimii pääsuojana. Perinteisessä KJ-verkossa distanssisuojausta ei käytetä. Sähköradoilla ei myöskään ole käytössä jälleenkytkentöjä.

Ratasähköjärjestelmässä käytettyjä suojaustoimintoja ovat ylivirtasuoja, distanssisuoja, lämpösuoja sekä ali- ja ylijännitesuoja. Suodatinlaitteisto suojataan ylivirtasuojan lisäksi epäbalanssisuojalla. Muuntajan suojauksessa käytetään differentiaalisuojaa ja 110 kV verkon puolella on käytössä myös maasulkusuoja. Suojien laskennoissa täytyy huomioida, että virrat eivät ole kolmivaihevirtoja. Differentiaalisuojauksen laskenta ei poikkea kovin paljoa kolmivaihemuuntajan laskennasta. Differentiaalisuojauksen yläasettelua laskettaessa täytyy huomioida, että kyseessä ei ole kolmivaihejärjestelmä. Suurin ero tulee sähkösuunnittelupuolelle, jossa virtamuuntajat täytyy kytkeä releelle eri tavalla, jotta differentiaalisuojaus voidaan toteuttaa.

Työssä esitetyt ratkaisut suojausasetteluille täyttävät komponenttien ja johtimien termisen keston vaatimukset sekä luo selektiivisen suojauksen. Sähköaseman kosketusjännitysvaatimuksia on myös tarkasteltu, mutta niiden täytyminen vaatii vielä sähköaseman maadoitusresistanssin mittaamisen, jotta niistä voidaan varmistua.

LÄHDELUETTELO

- (ABB,2000a) ABB:n TTT-käsikirja, 2000, Luku 10: Mittaus-, ohjaus- ja suojauslaitteistot, [Viitattu: 20.8.2022] Saatavilla: https://heikkilaakso.com/opetus/abb/101_0007.pdf
- (ABB,2000b) ABB:n TTT-käsikirja, 2000, Luku 7: Oikosulkusuojaus, [Viitattu: 20.8.2022] Saatavilla: https://heikkilaakso.com/opetus/abb/071_0007.pdf
- (ABB,2000a) ABB:n TTT-käsikirja, 2000, Luku 10: Mittaus-, ohjaus- ja suojauslaitteistot, [Viitattu: 20.8.2022] Saatavilla: https://heikkilaakso.com/opetus/abb/101_0007.pdf
- (ABB,2000c) ABB:n TTT-käsikirja, 2000, Luku 11: Tehomuuntajat, [Viitattu: 22.1.2023] Saatavilla: https://heikkilaakso.com/opetus/abb/110_0007.pdf
- (ABB 630 AM) ABB, Feeder Protection and Control REF630 Application Manual, 2011, Saatavilla: https://library.e.abb.com/public/510f6468f70b32acc1257b130056cc15/REF630_appl_756510_ENb.pdf
- (ABB 630 TM) ABB, 630 series Technical Manual, 2011, Saatavilla: https://library.e.abb.com/public/c0a0a5145c74dc8bc1257b0c0055ff0d/RE_630_tech_756508_ENb.pdf
- (Andrusca, 2021) Innovative Integrated Solution for Monitoring and Protection of Power Supply System from Railway Infrastructure, 2021 [Viitattu: 20.7.2022] Saatavilla: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/23/7858>
- (DigSilent) Short-Circuit Analysis [Viitattu: 31.12.2022] Saatavilla: <https://www.digsilent.de/en/short-circuit-analysis.html#top>
- (Elovaara, Haarla, 2011) Elovaara Jarmo, Haarla Liisa, Sähköverkot II, Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011, s.161, s.162, s.90, s.198,

- s.215, s.335, s.337, s.339, s.342, s.344, s.345, s.354, 428, ISNM 978-951-672-363-4
- (Fingrid, 2022) Kantaverkon ja asiakasliityntöjen relesuojaus, 2022, s.2, s.3, s.4 [Viitattu: 4.10.2022] Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkkoon/kantaverkon-ja-asiakasliityntojen-relesuojausohje.pdf>
- (Hitachi) Hitachi Energy Finland Oy, 1-raiteisen imumuuntajan tekninen erittely, 2-raiteisen imumuuntajan tekninen erittely.
- (Kamaraj, Ravishankar, Jeevananthan, 2021) Kamaraj V, Ravishankar Jayashri, Jeevananthan S, Emerging Solutions for e-Mobility and Smart Grids, 2021, s.58, ISBN 978-981-16-0719-6
- (Kolektor) Kolektor Oy, Muuntajatyypit ERT 12500-116, valmistajan dokumentti
- (Lakervi, Partanen, 2008) Lakervi Erkki, Partanen Jarmo, Sähköjakeluteknikka, 2008, s.28, s.177, s.178, s.180, s.181, s.187, ISBN 978-951-672-357-3
- (Lee, Kim, 2005) Fault analysis of Korean AC electric railway system, 2005 [Viitattu: 20.7.2022]
- (Lemi Trafo) Lemi Trafo JSC, Traction line reactor 27.5 kV, Technical Information
- (Liikennevirasto, 2016) Sähkörataohjeet, Sähköistetty rata, 2016, s.9, Liitteet 1, 2, 4 ja 5, [Viitattu: 17.8.2022] Saatavilla: https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Liikennevirasto/lo_2016-07_sahkorataohjeet_web.pdf
- (Liikennevirasto, 2018) Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 5, Sähköistetty rata, 2018, s.4, s.17, s.21, s.22, s.23, s.34, s.31, s.35, s.66, s.67, s.73 [Viitattu: 17.8.2022] Saatavilla: https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Liikennevirasto/lo_2018-23_rato5_web.pdf
- (Mäkinen,2008) Mäkinen Olavi, Relesuojaus, s.8, s.11, s.53, s.107

- (Mörsky, 1993) Mörsky Jorma, Relesuojaustekniikka, 1993, s.36, s.37, s.177, s.189, s.190, s.191, s.201, s.202, s.228, s.232, s.236, s.239, s.365, s.401, ISBN 951-672-175-3
- (Novo, Teston, 2014) Protective Relaying for Railway Feeders, 2014 [Viitattu: 10.7.2022] Saatavilla: <https://selinc.com/api/download/106182/>
- (Prysmian) Prysmian Group Oy, Railway Main Line Cables Finland, Saatavilla: https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/Railway%20FI_180118_web.pdf
- (Rissanen,2021) Rissanen Tomi, Sähköjaketuverkon nykytilanne ja tulevaisuus, 2021, s.80, Saatavilla: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/163191/Diplomity%C3%B6_Rissanen_Tomi.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- (RER670 TM) Hitachi, Railway Application RER670 Technical Manual, 2022, Saatavilla: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1MRK506376-UEN&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- (SFS 6001) Suomen Standardisoimisliitto SFS, SFS 6001 Suurjännitesähköasennukset, 2018, s.88, s.91, s.93, s.94, s.99, s.101, s.102, s.107
- (Skogberg) Ronny Skogberg, Railway power supply system models for static calculation in a modular design implementation, 2013, s.68.
- (STL 1135/2016) Sähköturvallisuuslaki 1135/2016, § 6, § 41, § 43, § 44, § 45, § 46. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20161135>
- (UTU) UTU Oy, Kojeistomallin C24 tyyppikilpi.
- (Väylä) Haastattelu väylävirasto, 4.11.2022.
- (Väylävirasto, 2020) Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 21, Liikkuva kalusto,2020, s.7 [Viitattu: 25.8.2022] Saatavilla:

- https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2020-42_rato21_web.pdf
- (Väylävirasto, 2021) Sähkön toimitus ratasähköverkkoon – Kuvaus energian myyjälle, 2021, s.7 [Viitattu: 17.8.2022] Saatavilla: https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2021-17_sahkon_toimitus_web.pdf
- (Väylävirasto, 2021b) Rautateiden verkkoselostus 2021, s.31 [Viitattu: 17.8.2022] Saatavilla: https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/173530/vj_2019-46_vs2021_978-952-317-725-3.pdf?sequence=5&isAllowed=y
- (White, 2014) AC/DC Railway electrification and protection, 2014 [Viitattu: 14.8.2022] Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/288773712_AC_DC_Railway_Electrification_and_Protection
- (Electricalbaba, 2018) High Set 1 & High Set 2 and Its Calculation, 2018 [Viitattu: 29.12.2022] Saatavilla: <https://electricalbaba.com/high-set1-differential-calculation/>

LIITTEET

LIITE I. Sähköradoilla käytettävät johtimet.

JOHDIN, KÖYSI JA LANKA	Koko mm ²	Standardi	Aine	Tunnus
Ajolanka	100 80	EN 50149 EN 50149	Kupari Kupari	
Kannatin	50 70	DIN 48201-2 DIN 48201-2	Pronssi Pronssi	50 Bz 70 Bz
Y- köysi	25	SFS-EN 13602	Kupari	25 Cu
Ripustin - köysi - lanka 16 mm ²	10 16	DIN 43138 SFS-EN 13602	Tinapronssi Kupari	
25 kV virtaliitännät	120 (95) 120	DIN 43138 SFS-EN 13602	Kupari Kupari	120 (95) CuF 120 Cu
25 kV potentiaali-liitännät	25	DIN 43138	Kupari	25 CuF
Teräsköydet - harusköysi - ankkurointiköysi	25 52 52	SFS 5701 SFS 5701 SFS 5701	Sinkitty teräs Sinkitty teräs Sinkitty teräs	St 25 St 52 St 52
Kiristyspyörästäön köysi - Ø8 mm - Ø9 mm	26,5 50	BS 2 W 11 DIN 3051 Osa 1	Ruostumaton teräs Sinkitty teräs	56 PNC
Paluu- ja M-johdin sekä liitännät	107 201	SFS 5701 SFS 5701	Alumiini Alumiini	AAC 107 AAC 201
Syöttö- ja ohitusjohdin.	234	SFS 5701	Alumiini/Teräs	ACSR 201/33
Vastajohdin	177	SFS 5701	Alumiini/Teräs	ACSR 152/25
Ajolangan ja kannattimen välinen keskiankkurointiköysi	50 70	DIN 48201-2 DIN 48201-2	Pronssi Pronssi	50 Bz 70 Bz

LIITE II. Fingridin ilmoittamat sähköasemaa syöttävän 110 kV sähköverkon oikosulkuvirrat.

Minimi:	$S_{k'} = 0,6 \text{ GVA}; I_{k'} = 3,0 \text{ kA}; Z_{k'} = (4,7+j22,2) \text{ ohm}; 3I_0 = 1,3 \text{ kA}; Z_0 = (25+j103) \text{ ohm}$
Normaali minimi:	$S_{k'} = 2,3 \text{ GVA}; I_{k'} = 11,2 \text{ kA}; Z_{k'} = (1,4+j5,8) \text{ ohm}; 3I_0 = 3,0 \text{ kA}; Z_0 = (11+j55) \text{ ohm}$
Maksimi:	$S_{k''} = 2,6 \text{ GVA}; I_{k''} = 12,7 \text{ kA}; Z_{k''} = (1,3+j5,3) \text{ ohm}; 3I_0 = 3,1 \text{ kA}; Z_0 = (11+j54) \text{ ohm}$
Erään ennusteen maksimi:	$S_{k''} = 2,7 \text{ GVA}; I_{k''} = 13,5 \text{ kA}; Z_{k''} = (1,2+j5,0) \text{ ohm}; 3I_0 = 3,7 \text{ kA}; Z_0 = (8+j45) \text{ ohm}$

LIITE III. Ratasähköverkon lasketut oikosulkuvirrat.**Minimitilanne:**

Oikosulkusuojaus virrat		
Syöttöverkon oikosulkuteho	600	MVA
Oikosulkuvirta 110 kV 2-vaiheinen	3000	A
Oikosulkuvirta muuntajan alajännitepuoli	4138	A
Oikosulkuvirta ratalähdön alku	4108	A
Ratalähtö 6.12		
Oikosulkuvirta ratalähdön loppu	1792	A
Oikosulkuvirta korvattavan lähdön loppu	1077	A
Ratalähtö 6.13		
Oikosulkuvirta ratalähdön loppu	2101	A
Oikosulkuvirta korvattavan lähdön loppu	1790	A

Maksimitilanne:

Oikosulkusuojaus virrat		
Syöttöverkon oikosulkuteho	2700	MVA
Oikosulkuvirta 110 kV 2-vaiheinen	13500	A
Oikosulkuvirta muuntajan alajännitepuoli	4776	A
Oikosulkuvirta ratalähdön alku	4736	A
Ratalähtö 6.12		
Oikosulkuvirta ratalähdön loppu	1903	A
Oikosulkuvirta korvattavan lähdön loppu	1117	A
Ratalähtö 6.13		
Oikosulkuvirta ratalähdön loppu	2255	A
Oikosulkuvirta korvattavan lähdön loppu	1901	A

LIITE IV. Differentiaalisuojauksen määrittäminen.

Differentiaalisuojaus		
Virtamuuntajan luokka yläpuoli	10	%
Virtamuuntajan luokka alapuoli	10	%
Releen tarkkuus (2x dl)	3	%
Marginaalivaatimus	5	%
Käämikytkimen säätöalue +/-	9	1,33
Havahtumissuhde S	39,97	%
PNoLoad%	10,00	%
Perusasetus P	29,99	%
Toinen käänneaste	150	%
High operate	1300	%
Korjauskertoimen yläjännite	1,86	
Korjauskertoimen alajännite	1,10	

LIITE V. Distanssisuojauksien määrittäminen.

Distanssisuojaus 6.12		
Linjan resistanssi	2,71	Ω
Linjan reaktanssi	9,22	Ω
Linjan impedanssi	9,61	Ω
Linja impedanssin kulma	73,66	astetta
Vyöhyke 1. resistanssi	2,71	Ω
Vyöhyke 1. reaktanssi	9,22	Ω
Vyöhyke 1. impedanssi	9,61	Ω
Vyöhyke 1. impedanssin kulma	73,66	astetta
Vyöhyke 2. resistanssi	5,89	Ω
Vyöhyke 2. reaktanssi	20,07	Ω
Vyöhyke 2. impedanssi	20,92	Ω
Vyöhyke 2. impedanssin kulma	73,65	astetta
Vyöhyke 3. resistanssi	27,23	Ω
Vyöhyke 3. reaktanssi	101,61	Ω
Vyöhyke 3. impedanssi	105,19	Ω
Vyöhyke 3. impedanssin kulma	75,00	astetta

Distanssisuojaus 6.13		
Linjan resistanssi	2,01	Ω
Linjan reaktanssi	6,83	Ω
Linjan impedanssi	7,12	Ω
Linja impedanssin kulma	73,64	astetta
Vyöhyke 1. resistanssi	2,01	Ω
Vyöhyke 1. reaktanssi	6,83	Ω
Vyöhyke 1. impedanssi	7,12	Ω
Vyöhyke 1. impedanssin kulma	73,64	astetta
Vyöhyke 2. resistanssi	2,71	Ω
Vyöhyke 2. reaktanssi	9,24	Ω
Vyöhyke 2. impedanssi	9,63	Ω
Vyöhyke 2. impedanssin kulma	73,64	astetta
Vyöhyke 3. resistanssi	27,23	Ω
Vyöhyke 3. reaktanssi	101,61	Ω
Vyöhyke 3. impedanssi	105,19	Ω
Vyöhyke 3. impedanssin kulma	75,00	astetta

