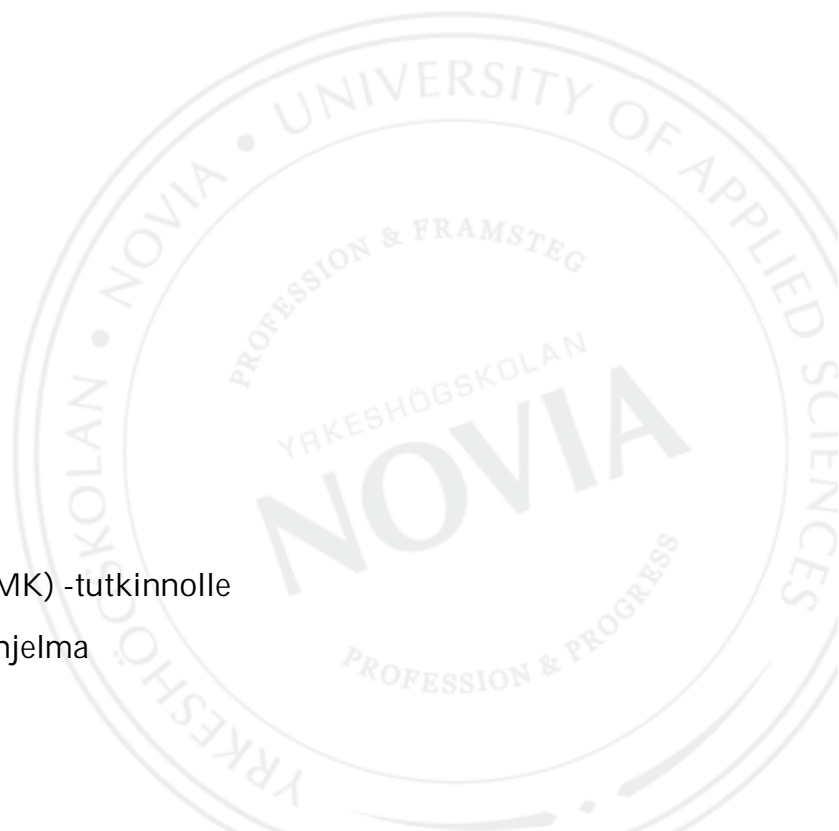




Vesivoimalaitosten generaattoreiden oikosulkulaskenta ja relesuojaus

Ville Vieri

Opinnäytetyö insinööri (AMK) -tutkinnolle
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Vaasa 2015



OPINNÄYTETYÖ

Tekijä: Ville Vierä

Koulutusohjelma ja paikkakunta: Sähkötekniikka, Vaasa

Suuntautumisvaihtoehto: Sähkövoimatekniikka

Ohjaajat: Ari Pätsi, Holger Wik, Ronnie Sundsten

Nimike: *Vesivoimalaitosten generaattoreiden oikosulkulaskenta ja relesuojaus*

Päivämäärä 2.4.2015

Sivumäärä 71

Liitteet 8

Tiivistelmä

Opinnäytetyö on jaettu kahteen osaan, joista ensimmäinen osa käsittelee generaattoreiden oikosulkulaskuja, ja toinen osa vesivoimalaitosten generaattoreiden relesuojausta.

Työssä tarkistetaan tekeekö tehtävänantajan tähän mennessä käyttämä oikosulkulaskentapohja laskut oikein, ja kehitetään tästä parempi versio. Työssä selvitetään myös vesivoimalaitosten generaattoreiden suojausvaatimukset, ja laaditaan ohje suojaustoimintojen toiminnalle ja asetuksille.

Työssä selitetään tarkasti kaksi eri tapaa laskea oikosulkuvirtoja. Nämä ovat ominaisoikosulkutehomenetelmä ja IEC-standardin määrittelemä menetelmä. Myös kaikki suureet ja oikosulun eri vaiheet sekä laskentaa varten tarvittavat tiedot on käyty läpi.

Laskentapohja on tehty Excelissä ominaisoikosulkumenetelmällä tehtävänantajan toivomuksesta. Laskentapohja laskee kaikki tarvittavat virrat vesivoimalaitosten kojeistojen, kaapelien jne. mitoitusta varten.

Relesuojausvaatimukset on koottu eri relevalmistajien suosituksista ja norjalaisen Statkraftin asettamista vaatimuksista. Työssä on selitetty kaikkien suojaustoimintojen toiminta, ja on laadittu ohjeet miten nämä toiminnot asetetaan VAMP:n ja ABB:n generaattorisuojissa.

Työ antaa hyvän tuntemuksen generaattoreiden ja sähköasemien oikosulkulaskuista, sekä hyvän käsityksen relesuojaustoimintojen ominaisuuksista ja asetuksista.

Kieli: Suomi

Avainsanat: Oikosulku, Ominaisoikosulkuteho, Relesuojaus, Generaattori, Transientti

EXAMENSARBETE

Författare: Ville Vieri

Utbildningsprogram och ort: Elektroteknik, Vasa

Inriktningsalternativ: Elkraftsteknik

Handledare: Ari Pätsi, Holger Wik, Ronnie Sundsten

Titel: *Kortslutningsberäkningar och reläskydd för generatorer i vattenkraftverk*

Datum 2.4.2015

Sidantal 71

Bilagor 8

Abstrakt

Examensarbetet är uppdelat i två delar, där den första delen behandlar kortslutningsberäkningar för generatorer och den andra delen reläskydd för generatorer i vattenkraftverk.

I examensarbetet granskas om den befintliga beräkningsbotten som uppdragsgivaren använder sig av utför beräkningarna rätt och en förbättrad version av denna skapas. I arbetet undersöks också reläskyddskraven för generatorer i vattenkraftverk och en manual på de krävda reläskyddens funktion och inställningar skapas.

I arbetet genomgås noggrant två metoder för kortslutningsberäkningar: delkortslutningseffektmetoden och metoden enligt IEC-standard. Också olika storheter och skeden av en kortslutning, samt den behövliga informationen för att utföra beräkningarna, finns förklarade.

Beräkningsbotten är gjord i Excel enligt delkortslutningseffektmetoden på önskemål av uppdragsgivare. Med beräkningsbotten räknas alla strömmar som behövs för att dimensionera ställverk, kablar etc. i vattenkraftverk.

Reläskyddskraven är sammanställda från olika relätillverkares rekommendationer och de norska kraven presenterade av Statkraft. I arbetet har alla skyddsfunktioners funktionssätt förklarats, och instruktioner har skrivits på hur dessa funktioner ställs in i VAMP- och ABB-generatorskydd.

Arbetet ger goda kunskaper om kortslutningsberäkningar för generatorer och elstationer, samt en god inblick i reläskyddsfunktionernas egenskaper och inställningar.

Språk: Finska

Nyckelord: Kortslutning, Delkortslutningseffekt, Reläskydd, Generator, Transient

BACHELOR'S THESIS

Author:

Degree Programme: Electrical Engineering

Specialization: Electrical Power Engineering

Supervisors: Ari Pätsi, Holger Wik, Ronnie Sundsten

Title: *Short circuit calculations and relay protection of hydro generators*

Date 2.4.2015

Number of pages 71

Appendices 8

Summary

This Bachelor's thesis is split up into two parts, the first part deals with short circuit calculations for generators, and the second part with relay protection of hydro generators.

The thesis includes a review of the tool, which the employer now uses for calculating short circuit currents, in order to find out if it carries out the calculations the right way. If it doesn't, a better version of this is to be made. It also contains an analysis of relay protection requirements in hydro power plants, and instructions on the functions and settings.

Two methods for short circuit calculations are thoroughly reviewed. These are the apparent short-circuit power method and the method according to the IEC-standard. All the different variables, stages and the initial information needed for calculating are explained.

The tool for calculating is made in excel, using the apparent short-circuit power method as requested by the employer. It calculates all the currents needed for dimensioning switchgear, cables etc. in hydro power plants.

The relay protection requirements are put together from the recommendations of different relay manufacturers and the Norwegian requirements presented by Statkraft. The operation of every protection function is described, and instructions for applying the settings in VAMP and ABB generator protection relays are presented.

The thesis gives very good knowledge of short circuit calculations of generators and substations, and a good insight into the operation and settings of the relay protection functions.

Language: Finnish

Key words: Short circuit, Initial symmetrical short circuit power, Relay protection, Generator, Transient

Sisällysluettelo

1	Johdanto	1
2	Tarkoitus	2
3	Vesivoima	3
3.1	Turbiinit	4
3.1.1	Francis	4
3.1.2	Kaplan	5
3.1.3	Pelton	6
3.2	Generaattori	7
4	Oikosulku	8
4.1	Oikosulkulaskenta	8
4.1.1	Subtransientti ja transientti	9
4.1.2	Subtransientti	10
4.1.3	Transientti	11
4.2	Oikosulkusuureet	12
4.2.1	Alkuoikosulkuvirta I_k''	12
4.2.2	Muutosoikosulkuvirta I_k'	12
4.2.3	Pysyvä oikosulkuvirta I_k	12
4.2.4	Sysäysoikosulkuvirta i_s	14
4.2.5	Terminen oikosulkuvirta I_{th}	16
4.3	Laskentamenetelmät	18
4.3.1	Laskenta ominaisoikosulkuteholla	18
4.3.2	Laskenta standardin IEC 60909-0 määrittelemällä tavalla	20
4.3.3	Komponenttien impedanssit oikosulkupiirissä	22
4.4	Oikosulkulaskentapohja	25
4.4.1	Generaattorin alkutiedot	28
5	Generaattorin suojaus	30
5.1	Selektiivisyys	31
5.2	Varasuojaus	32
5.3	Suojaustarpeet	33
5.3.1	Statkraftin suojausvaatimukset	34
5.4	Relesuojausfunktiot	38
5.4.1	Staattorin maasulku	38
5.4.2	Staattorin ylikuorma	44
5.4.3	Roottorin maasulku	46
5.4.4	Ylivirta	47
5.4.5	Ali-impedanssi	49
5.4.6	Erovirta/Differentiaali	51
5.4.7	Vinokuormitus	54
5.4.8	Alimagnetointi	55
5.4.9	Ylimagnetointi	57
5.4.10	Alijännite	58
5.4.11	Ylijännite	59
5.4.12	Taajuus	60
5.4.13	Takateho	61

5.4.14	Tahaton verkkoonkytkentä	62
5.4.15	Taajuuden muutosnopeus ROCOF	63
5.4.16	Laakerivirta	64
5.4.17	Epätahti	65
6	Tulokset	67
7	Keskustelu	68
	Lähdeluettelo	69

Kuvaluettelo

1	<i>Francis turbiini (VEO Academy, 2006, s. 12).</i>	4
2	<i>Johtosolukkeet (VEO Academy, 2006, s. 12).</i>	4
3	<i>Kaplan turbiini (VEO Academy, 2006, s. 13).</i>	5
4	<i>Kaplan koteloturbiini (VEO Academy, 2006, s. 15).</i>	6
5	<i>Kaplan kuiluturbiini (VEO Academy, 2006, s. 15).</i>	6
6	<i>Pelton turbiini (VEO Academy, 2006, s. 11).</i>	6
7	<i>Pelton turbiinin suutin (Machowski ym., 1997, s. 18).</i>	6
8	<i>Subtransientti ekvivalentti reaktanssi (Machowski ym., 1997, s. 104).</i>	10
9	<i>Transientti ekvivalentti reaktanssi (Machowski ym., 1997, s. 104).</i>	11
10	<i>Magnetointikerroin sarja 1 (IEC, 2001, s. 119).</i>	13
11	<i>Magnetointikerroin sarja 2 (IEC, 2001, s. 119).</i>	13
12	<i>Sysäyskerroin R/X (IEC, 2001, s. 101).</i>	14
13	<i>Sysäyskerroin X/R (IEC, 2001, s. 101).</i>	14
14	<i>Tasavirtakomponentti m (IEC, 2001, s. 131).</i>	17
15	<i>Vaihtovirtakomponentti n (IEC, 2001, s. 133).</i>	17
16	<i>Maasulkusuojiin tomintaalueet (VAMP, 2011a, s. 105).</i>	41
17	<i>Ympäröivän lämpötilan korjauskerroin (VAMP, 2011a, s. 71).</i>	44
18	<i>Esimerkki staattorin ylikuormasuojan toiminnasta (VAMP, 2011a, s. 72).</i>	45
19	<i>NI (VAMP, 2011a, s. 144).</i>	47
20	<i>VI (VAMP, 2011a, s. 144).</i>	47
21	<i>EI (VAMP, 2011a, s. 144).</i>	48
22	<i>LTI (VAMP, 2011a, s. 144).</i>	48
23	<i>Ali-impedanssi (VAMP, 2011a, s. 116).</i>	49
24	<i>Ali-impedanssi (ABB, 2011, s. 121).</i>	50
25	<i>Erovirran mittaus (VAMP, 2011b, s. 51).</i>	51
26	<i>Erovirtasuojan toiminta (VAMP, 2011b, s. 54).</i>	52
27	<i>Erovirtasuojan toiminta (ABB, 2011, s. 107).</i>	53
28	<i>Alimagnetointi asetusryhmä 1 (VAMP, 2011a, s. 120).</i>	55
29	<i>Alimagnetointi asetusryhmä 2 (VAMP, 2011a, s. 120).</i>	55
30	<i>Alimagnetointisuojan asetusalueet (ABB, 2011, s. 126).</i>	56
31	<i>Alijännite (VAMP, 2011a, s. 100).</i>	58
32	<i>Takateho (VAMP, 2011a, s. 127).</i>	61
33	<i>Aliteho (VAMP, 2011a, s. 128).</i>	61
34	<i>Taajuuden muutosnopeus (VAMP, 2011a, s. 111).</i>	63
35	<i>Epätahtisuoja (ABB, 2011, s. 132).</i>	65

Taulukkoluetelo

1	Jännitekerroin c (IEC 60909-0 s. 41)	20
2	Statkraft suojausvaatimukset	36
3	Eri releissä olevat suojausfunktiot	37

Symbolit ja lyhenteet

c	Jännitekerroin
CO ₂	Hiilidioksidi
DC	Tasavirta
f	Taajuus
Hz	Hertsi
I'_k	Muutostilan oikosulkuvirta
I''_k	Alkuoikosulkuvirta
I_{kmax}	Maksimi pysyvän tilan oikosulkuvirta
I_{kv}	Verkon oikosulkuvirta
I_n	Nimellisvirta
I_{peak}	Sysäysoikosulkuvirta
I_s	Sysäysoikosulkuvirta
I_{th}	Terminen oikosulkuvirta
K_G	Generaattorin impedanssin korjauskerroin
K_T	Muuntajan impedanssin korjauskerroin
kA	Kiloampeeri
kV	Kilovoltti
L1	Vaihe 1
L2	Vaihe 2
L3	Vaihe 3
m	Vaimenevan vaihtovirtakomponentin kerroin
MVA	Megavolttiampeeri
n	Vaimenevan tasavirtakomponentin kerroin
p	Napaparien määrä
P_{kn}	Muuntajan kokonaispätötehohäviöt nimellisvirralla
R	Resistanssi
R_G	Generaattorin oikosulkuresistanssi
R_{Gf}	Generaattorin fiktiivinen reaktanssi
R_k	Oikosulkuresistanssi
R_{kv}	Verkon resistanssi
R_t	Muuntajan oikosulkuresistanssi
r/min	Kierrosta minuutissa
s.	Sekuntti
SCR	Oikosulkusuhde
sin	Sini
S_k	Ominaisoikosulkuteho
S_{kv}	Verkon oikosulkuteho
S_n	Nimellisteho
T_a	Staattorikäänin oikosulkuaiakavakio
T'_d	Transientti aikavakio
T''_d	Subtransientti aikavakio
T'_{do}	Avoimen piirin pitkittäinen muutostilan aikavakio
T''_{do}	Avoimen piirin pitkittäinen alkutilan aikavakio
t_k	Oikosulun kesto aika
T_k	Oikosulun kesto aika
T'_q	Oikosulkupiirin poikittainen muutostilan aikavakio
T''_q	Oikosulkupiirin poikittainen alkutilan aikavakio
T'_{qo}	Avoimen piirin poikittainen muutostilan aikavakio

T''_{qo}	Avoimen piirin poikittainen alkutilan aikavakio
u_k	Muuntajan suhteellinen oikosulkujännite
U_{mmax}	Suurin mahdollinen magnetointijännite
U_{mn}	Nimellismagnetointijännite
U_n	Nimellisjännite
U_{nG}	Generaattorin nimellisjännite
u_r	Muuntajan suhteellinen oikosulkuresistanssi
V	Voltti
X	Reaktanssi
X_a	Ankkurireaktion reaktanssi
x_d	Suhteellinen oikosulkureaktanssi
X_d	Tahtireaktanssi
X_D	Vaimennuskäämityksen reaktanssi
X'_d	Transientti reaktanssi
x''_d	Suhteellinen alkureaktanssi
X''_d	Subtransientti reaktanssi
X_{dsat}	Generaattorin kyllästynyt tahtireaktanssi
X_f	Kenttäkäämityksen reaktanssi
X_G	Generaattorin reaktanssi
X_k	Oikosulkureaktanssi
X_{kv}	Verkon reaktanssi
X_l	Vuotoreaktanssi
X_q	Poikittainen tahtireaktanssi
X'_q	Poikittainen muutosreaktanssi
X''_q	Poikittainen alkureaktanssi
x_T	Muuntajan suhteellinen reaktanssi
X_t	Muuntajan oikosulkureaktanssi
X_T	Muuntajan reaktanssi
X_0	Nollareaktanssi
X_2	Vastareaktanssi
Z_G	Generaattorin oikosulkuimpedanssi
Z_{GK}	Generaattorin korjattu oikosulkuimpedanssi
z_k	Suhteellinen oikosulkuimpedanssi
Z_k	Oikosulkuimpedanssi
Z_{kv}	Verkon oikosulkuimpedanssi
Z_t	Muuntajan oikosulkuimpedanssi
$Z_{(1)}$	Myötäkomponentin impedanssi
$Z_{(2)}$	Vastakomponentin impedanssi
φ_{nG}	Generaattorin vaihekulma normaalikäytössä
λ_{max}	Suurinta mahdollista magnetointia vastaava kerroin
κ	Sysäyskerroin

Relesuojaukseen liittyvät symbolit ja lyhtenteet

DFT	Diskreetti Fourier'n muunnos
EI	Extremely inverse
HV	Suurjännite
I_{01}	VAMP releen signaalitulo
I_{02}	VAMP releen signaalitulo
I_{0Calc}	VAMP releen laskettu virtasignaali

I_{01Peak}	Signaalitulon I_{01} huippuarvo
I_{02Peak}	Signaalitulon I_{02} huippuarvo
I_{L1}	Vaihe 1 virta
I_{L2}	Vaihe 2 virta
I_{L3}	Vaihe 3 virta
I_{MAX}	Suurin sallittu jatkuva virta
k_{Θ}	Ympäriävän lämpötilan kerroin
LTI	Long time inverse
t	Vakioaikaviive
tMin	Minimi käänteisaikaviive
LV	Pienjännite
NI	Normally inverse
RMS	Neliöllinen keskiarvo
VI	Very inverse

ANSI-koodit

21, 21G	Aliimpedanssi
24	Ylimagnetointi
27	Alijännite
32	Takateho
40	Alimagnetointi
46, 46I2	Vinokuormitus
49	Staattorin ylikuorma
50/51, 51/67	Ylivirta
50AE	Tahaton verkkoonkytkentä
50N/51N, 51N 67N	Nollavirta
59	Ylijännite
59N	Nollajännite
64F3, 59THD	Staattorin 100% maasulku
64R	Roottorin maasulku
67N	Suunnattu maasulku
78	Epätahti
81H/81L, 81	Taajuus
81R, 81	Taaajuuden muutosnopeus
87, 87G	Erovirta
F50N/51N	Laakerivirta

IEC-koodit

df/dt	Taaajuuden muutosnopeus
f<f>	Taajuus
I>	Ylivirta
$I_0 >$	Nollavirta
$I_{0\phi} >$	Suunnattu maasulku
$I_2 >$	Vinokuormitus
$\Delta I >$	Erovirta
P<	Takateho
Q<	Alimagnetointi
T>	Staattorin ylikuorma

$U <$	Alijännite
$U >$	Ylijännite
$U_0 >$	Nollajännite
$U < I >$	Tahaton verkkoonkytkentä
$U_{0f3} <$	Staattorin 100% maasulku
$U_f <$	Ylimagnetointi
$Z <$	Aliimpedanssi
$\phi <$	Epätahti

1 Johdanto

Vesivoimalaitoksen suunnittelussa on tärkeää tietää laitoksessa mahdollisten vikatilanteiden aikana esiintyvät oikosulkuvirrat. Virtojen arvoja käytetään kojeiston mitoitukseen sekä relesuojauksen asetuksiin. Työ on jaettu kahteen osaan, joista ensimmäinen käsittelee oikosulkulaskuja ja toinen relesuojausta.

Oikosulkuvirtojen laskemiseen on olemassa monta menetelmää, joista osa on todella tarkkoja mutta vaikeita käyttää, ja toiset helppoja käyttää, mutta eivät yhtä tarkkoja. Työssä käyn läpi eri menetelmiä ja annan esimerkkejä niiden käytöstä. Kun oikosulkupiiriin lisätään generaattoreita, laskemisesta tulee vaikeampaa. Generaattorin aiheuttama oikosulkuvirta vaimenee ajan myötä, joten oikosulkuvirta muuttuu koko ajan ennen kuin se saavuttaa pysyvän tilan. Työssä kehitetään laskentapohja oikosulkuvirtojen laskemista varten ja selitetään kaikki tarvittavat tiedot, jotta käyttäjä myös ymmärtää, mitä laskentapohjassa tapahtuu.

Generaattori on yksi laitoksen kalleimmista komponenteista, joten se tulee suojata hyvin mahdollisilta vikatilanteilta. Tästä huolimatta vesivoimalaitosten generaattoreille ei ole määriteltyjä suojausvaatimuksia, joten työssä on koottu ohje tarvittavista suojaustoiminnoista ja näiden toiminta on käyty läpi.

2 Tarkoitus

Työn tarkoituksena on tarkastaa olemassa oleva oikosulkulaskentapohja ja tehdä siitä parannettu versio, sekä tehdä vesivoimageneraattoreiden relesuojauksen käsikirja. Oikosulkulaskentapohja pitää tehdä käyttäjäystävällisemmäksi, koska yksittäinen suunnittelija käyttää sitä vain kerran jokaisen projektin aikana, ja käyttökertojen välinen aika voi olla pitkä. Pitkän aikavälin aikana helposti unohtuu, miten pohjaa käytetään, jos sen käyttäminen on vaikeaa.

Vanha oikosulkulaskentapohja on tehty Excelissä, ja käyttäen ominaisoikosulkutehomenetelmää sillä lasketaan alkuoikosulkuvirrat laitoksessa, jossa on kaksi generaattoria ja kolmikäämimuuntaja, joka syöttää kahta erillistä verkkoa. Uusi laskentapohja toteutetaan myös Excelillä, ja siinä tulee olla kolme eri laitostyyppiä: kaksi generaattoria ja yksi muuntaja, kolme generaattoria ja kaksi muuntajaa, jotka syöttävät eri verkkoja sekä kolme generaattoria ja kaksi rinnakkaista muuntajaa samalle verkolle. Laskentapohjissa tulee myös olla mahdollisuus jättää tietty komponentti tyhjäksi ja näin muuttaa laitoksen ulkonäköä. Ennen uuden laskentapohjan kehittämistä selvitetään millä menetelmällä oikosulkuvirrat tulisi laskea tämän tyyppisessä projektissa. Työssä käydään ominaisoikosulkutehomenetelmän lisäksi läpi kansainvälisen standardin määrittelemä menetelmä ja tehdään vertailuja näiden kahden menetelmän välillä. Vanhalla laskentapohjalla laskettiin ainoastaan alkuoikosulkuvirta, mutta uuden pohjan tulee sisältää myös termisen ja dynaamisen oikosulkuvirran laskut, koska näitä käytetään kojeistojen mitoituksessa.

Relesuojauksen käsikirja on tarpeellinen, koska suojaukselle ei ole asetettu yleisiä vaatimuksia, vaan ne määritellään projektikohtaisesti. Käsikirja on pääosin tarkoitettu uusille suunnittelijoille, jotta he saavat käsityksen relesuojauksen toiminnasta ja laajuudesta. Käsikirjasta pitää saada selkeät ohjeet tarvittaville suojaustoiminnoille ja toimintojen asetteluille yleisimmissä suojareleissä, jotka tässä tapauksessa ovat VAMP- ja ABB-generaattorisuojareleet.

3 Vesivoima

Vesivoimalaitoksilla tuotetaan sähköä veden potentiaalienergiasta. Veden virtaus ohjataan voimalaitoksen läpi, jossa sen liike-energia pyörittää turbiinia, joka puolestaan pyörittää generaattoria. (VEO Academy, 2006, s. 1).

Vesivoima on uusiutuvaa energiaa, joka ei aiheuta kasvihuonekaasuja tai muita epäpuhtauksia. Vuonna 2012 koko maailman energiatuotannosta 17 % tuli vesivoimasta (The Shift Project, 2012). Suomen energiatuotannosta vuonna 2013 18,6 % tuli vesivoimasta (Energiateollisuus, 2014).

Vesivoimalla on myös erinomaiset säätömahdollisuudet verrattuna muihin sähköntuotantotapoihin. Sähköä ei voida varastoida vaan se pitää tuottaa samanaikaisesti, kun sitä käytetään. Vesivoimaa voidaan varastoida vesialtaiden avulla ja päästämällä enemmän/vähemmän vettä laitoksen läpi saadan nopeasti säädettyä tuotantoa. (C2ES, 2011, s. 1).

Vesivoimalaitokset voidaan jaotella kolmeen kategoriaan säätömahdollisuuden perusteella. Nämä ovat säännöstelyvoimalaitos, jokivoimalaitos ja pumppuvoimalaitos. Säännöstelyvoimalaitoksessa on suuri vesiallas, jonka avulla tuotantoa voidaan säädellä jopa vuositasolla. Jokivoimalaitoksessa säätömahdollisuudet oman padon avulla ovat melko olemattomia. Pumppuvoimalaitos toimii normaalin kuormituksen aikana kuin tavallinen vesivoimalaitos, mutta pienen kuormituksen aikana se pumppaa vettä yläpuolella olevaan altaaseen, jota hyödynnetään kuormituksen ollessa korkea. (Jacobsson, 2003, s. 100).

Säätömahdollisuusjaottelun lisäksi vesivoimalaitokset voidaan jaotella esim. putouskorkeuden, rakennustavan, käyttötavan, koon mukaan jne. (VEO Academy, 2006, s. 8).

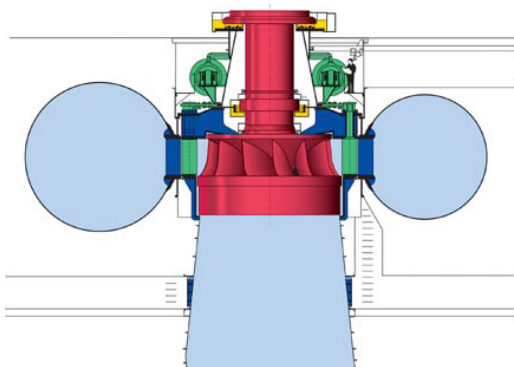
3.1 Turbiinit

3.1.1 Francis

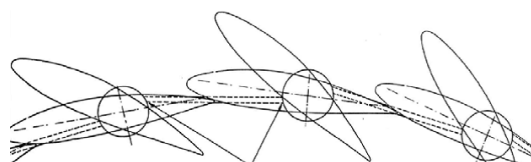
Francis turbiini on James B. Francisin vuonna 1849 tekemä parannus Howardin turbiinista. Se on reaktioturbiini, jota käytetään keskikorkeapainelaitoksissa, ja sitä käytettiin myös keskipainelaitoksissa ennen Kaplan turbiinin yleistymistä. Putoukorkeus voi olla kymmenestä metristä satoihin metreihin, ja teho muutamista kilowateista jopa yli gigawatin. Maailman suuritehoisimmat koneet ovat juuri Francis turbiineja. (VEO Academy, 2006, s. 12).

Vesi tuodaan turbiinille johtolaitteessa, jossa se kiertää turbiinia vaakatasossa ennen juoksupyörään ajautumista. Turbiini sijoitetaan ulostulon vedenpinnan alapuolelle, jonka seurauksena imuputkeen syntyy imu, joka kohentaa turbiinin tehoa. (Kuhlin).

Turbiinin tehoa säädetään johtosolukkeilla. Johtorengasta säätämällä kaikki johtosolukkeet liikkuvat samalla tavalla. Kuvassa 2 on esitettynä johtosolukkeiden toiminta, solukkeiden ollessa auki pääsee vesi virtaamaan niiden välistä, sulkemalla solukkeet ne tiivistävät toisiaan ja ainoastaan vähän vuotovettä pääsee läpi. (VEO Academy, 2006, s. 12).



Kuva 1: Francis turbiini (VEO Academy, 2006, s. 12).



Kuva 2: Johtosolukkeet (VEO Academy, 2006, s. 12).

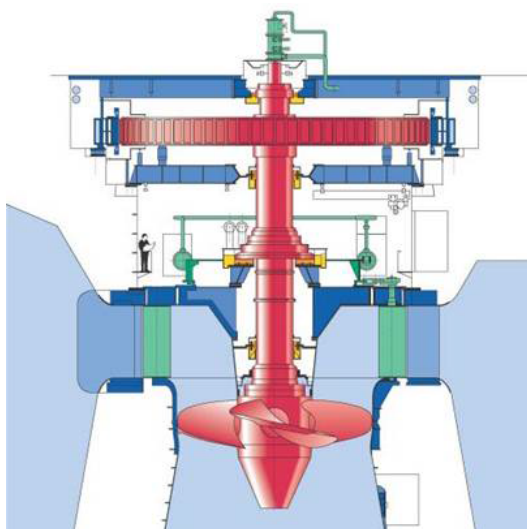
3.1.2 Kaplan

Kaplan turbiini on Viktor Kaplanin kehittämä turbiinityyppi, jota käytetään pien- ja keskipainelaitoksissa, eli pienet putouskorkeudet ja suuret vesimäärät. Putouskorkeus voi olla muutamista metreistä noin 70 metriin ja teho voi olla kymmenistä kilowateista satoihin megawatteihin. (VEO Academy, 2006, s. 13).

Kaplan turbiinin toiminta on pitkälti sama kuin Francis turbiinin, eli vesi ohjataan johtolaitteella turbiinille ja veden määrää voidaan säätää johtosolukkeilla. Erot Francis turbiinista ovat juoksupyörässä. Kuvasta 3 nähdään, että kaplan turbiinin juoksupyörä muistuttaa ulkonäöltään potkuria. (VEO Academy, 2006, s. 13).

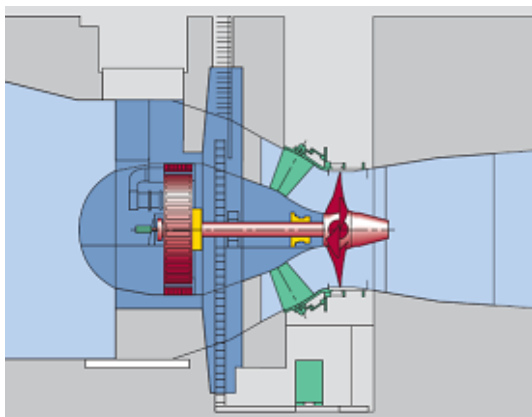
Kaplan turbiinilla on todella laaja hyötysuhdealue, koska sen tehoa säädetään sekä johtolaitteen johtosolukkeilla ja juoksupyörän lapakulmien säädöllä. Näiden kahden säätömahdollisuuden ansiosta saadaan suuri toimintaalue. (VEO Academy, 2006, s. 13).

Kaplan turbiinista on myös versioita, joissa on vain yksi säätömahdollisuus, tällöin sitä kutsutaan semi-kaplaniksi. Nämä voivat olla joko johtosolukkeilla säädettäviä tai lapakulmilla säädettäviä. (Renewables first).

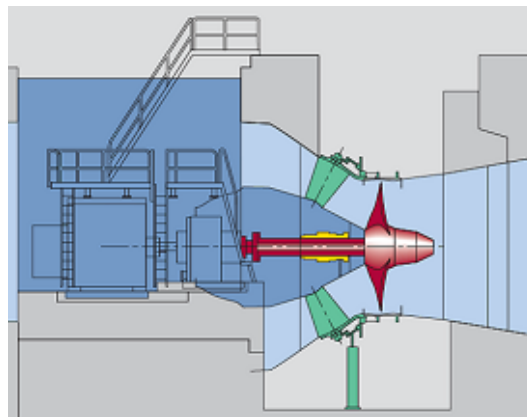


Kuva 3: Kaplan turbiini (VEO Academy, 2006, s. 13).

Putkikaplan turbiineja käytetään laitoksissa, joissa on todella pieni putouskorkeus, näissä turbiini on vaakatasossa kuvien 4 ja 5 mukaan. Kuvassa 4 on koteloturbiini, ne ovat hidaskäyntisiä ja niiden halkaisija on todella suuri. Kuvassa 5 on kuiluturbiini, jonka toiminta on samanlainen mutta se on pitempi ja kapeampi kuin koteloturbiini ja nopeakäyntisempi. Koteloturbiinilla on parempi hyötysuhde ja kuiluturbiinilla on pienemmät rakennuskustannukset. (VEO Academy, 2006, s. 15).



Kuva 4: Kaplan koteloturbiini (VEO Academy, 2006, s. 15).



Kuva 5: Kaplan kuiluturbiini (VEO Academy, 2006, s. 15).

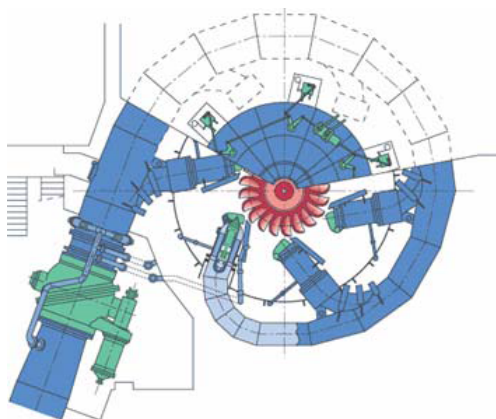
3.1.3 Pelton

Peltoniturbiini on Lester Allen Peltonin kehittämä impulssiturbiini. Peltoniturbiineja käytetään korkeapainelaitoksissa, joissa on suuret putouskorkeudet, paras toimivuus saadan yli 50 metrin putouskorkeuksilla, mutta se toimii myös matalammilla putouksilla. (Kuhlin). Turbiinilla on laaja tehoalue, teho voi olla kymmenistä kilowateista satoihin megawatteihin (VEO Academy, 2006, s. 11).

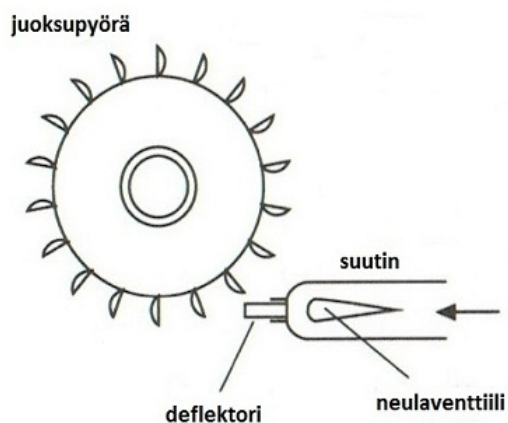
Turbiini näyttää renkaalta, jonka ulkoreunaan on kiinnitetty kulhoja. Turbiinissa korkeapaineinen vesi ohjataan putkea pitkin turbiinille, jossa vesi kuristetaan suuttimien läpi, jotka suihkuttavat vettä todella korkealla nopeudella kulhoihin, jonka seurauksena turbiini pyörii. (Machowski & Bialek & Bumby, 1997, s. 18). Suuttimia voi olla 1-6 kpl., joita avataan tietyllä sekvenssillä. (Veo Academy, 2006, s. 11)

Turbiinin tehon säätö tehdään suuttimien neulaventtiileillä, jotka säätävät suihkutuksen kokoa. Suuttimessa on myös deflektori, joka äkillisen kuormituksen putoamisen sattuessa ohjaa vesisuihkun kulhojen ohi. (Machowski ym., 1997, s. 18).

Kuvassa 6 on tyypillinen pelton turbiini kuudella suuttimella ja kuvassa 7 on lähempi kuva suuttimen osista.



Kuva 6: Pelton turbiini (VEO Academy, 2006, s. 11).



Kuva 7: Pelton turbiinin suutin (Machowski ym., 1997, s. 18).

3.2 Generaattori

Generaattori on tahtikone, ja kuten kaikki muut pyörivät sähkömoottorit se koostuu kiinteästä osasta eli staattorista, ja liikkuvasta osasta eli roottorista.

Staattori koostuu rungosta, joka on koottu urallisista rautalevyistä, näihin uriin staattorikäänitys on asennettu. Staattorissa on myös laakerikilvet, ja laakerit roottorin akselia varten. (Alfredsson, A., 2003, s. 81).

Roottori voi olla umpinapa- tai avonaparoottori. Umpinaparoottoria käytetään koneissa, joissa on nopea pyörimisnopeus, esimerkiksi höyry tai kaasuturbiinien yhteydessä (Weedy & Cory, 1998, s. 96). Näissä on yleensä kaksi tai neljä napaa joten pyörimisnopeus on 3000 tai 1500 r/min (Machowski ym., 1997, s. 10).

Vesivoimalaitoksissa käytetään avonaparoottoria, koska se soveltuu hitaaseen pyörimisnopeuteen. Nämä pyörivät yleensä hitaammin kuin 500r/min.(Machowski ym., 1997, s. 10). Pyörimisnopeuden ollessa hidas tulee roottorissa olla useampi napa toimiakseen 50 tai 60 Hz:llä. Generaattorin tuottaman sähkömotorisen voiman taajuus lasketaan kaavalla 3.1, jossa n on pyörimisnopeus r/min ja p on napaparien määrä. Täten todetaan, että hitaasti pyörivällä koneella tulee olla useampi napa, jotta taajuus on 50Hz. (Weedy & Cory, 1998, s. 96).

$$f = \frac{np}{60} \tag{3.1}$$

4 Oikosulku

Oikosulku on sähköä johtava yhteys kahden tai useamman virtajohtimen välillä, yhteydellä on matala impedanssi, joka johtaa vikakohdan jännitteen putoamiseen normaalista arvostaan nolnaan tai melkein nolnaan. (Winell, 2012, s. 124). Verkkoa eniten rasittava on kolmivaiheinen oikosulku, sen aikana oikosulkuvirran suuruus voi olla 10-40 kertainen nimelliseen kuormitusvirtaan verrattuna. (Elovaara & Laiho, 2007, s. 74)

Sähköverkko on nykyään todella vahva, osittain, koska suuret generaattoritehot ovat kytkettyinä yhteiseen verkkoon, ja osittain johtimien ja verkkojen mitoituksen suuruudesta. Tästä johtuen oikosulkuvirrat ovat todella suuria, joidenka seurauksena termiset ja dynaamiset vaikutukset ovat haastavia. Tämän takia laitoksia mitoittaessa tulee aina laskea oikosulkuvirtojen suuruudet ja määrittää niiden katkaisuaajat. Komponentit tulee mitoittaa kestävänsä oikosulkuvirran vaikutukset, jotka ovat paljon korkeammat kuin laitteen normaalin käyttövirran arvot. (Winell, 2012, s. 124).

Oikosulkuvirta koostuu tasavirtakomponentista ja vaihtovirtakomponentista. Tasavirtakomponentin suuruus määräytyy oikosulun syntyhetkestä ja sen vaimeneminen riippuu piirin resistanssin ja reaktanssin suhteesta. Vaihtovirtakomponentti vaimenee impedanssin kasvaessa kohti pysyvää tilaa. (ABB, 2000, Luku 7 s. 1).

4.1 Oikosulkulaskenta

Oikosulkuvirtoja voi laskea eri menetelmillä ja eri tarkkuuksilla, riippuen saatavissa olevista tiedoista ja tarvittavista teknisistä tarkkuuksista. Tarvittavat laskut riippuvat myös siitä, mihin tuloksia käytetään. Esimerkiksi laitteiden mitoituksessa käytetään eri arvoja, kun suojausasetteluja tehdessä.

Laskuissa pitää ottaa huomioon myös turvamarginaalien suuruus. Laskiessa maksimi virtoja turvamarginaalin pitää olla tarpeeksi suuri, kuitenkin johtamatta siihen, että laitteet mitoitetaan taloudellisesti kannattamattomasti turhan korkeille arvoille. Minimi oikosulkuvirran turvamarginaalin pitää olla niin suuri, että pystytään erottamaan korkeimman käyttövirran ja pienimmän oikosulkuvirran ero. (Schlabach, 2005, s. 3).

Laskiessa generaattoreiden oikosulkuvirtoja pitää erottaa generaattorin lähellä tapahtuva oikosulku ja kaukana generaattorista tapahtuva oikosulku. Oikosulku katsotaan tapahtuvan generaattorin lähellä silloin, kun yhden tahtigeneraattorin osuus oikosulkuvirrasta on suurempi kuin kaksi kertaa sen nimellisvirta. (Schlabach, 2005, s. 67).

Tahtigeneraattoreiden oikosulkuvirtoja laskiessa pitää huomioida reaktanssin muuttuminen oikosulun aikana. Vian alussa reaktanssin arvo putoaa pitkittäisen tahtireaktanssin alkuarvoon, josta se vian aikana suurenee kohti pysyvän tilan reaktanssia, mikäli oikosulku ei katkaista. Seuraavassa kappaleessa on käyty läpi reaktanssin muuttuminen.

4.1.1 Subtransientti ja transientti

Lähellä generaattoria tapahtuvassa oikosulussa vaimeneva vaihtovirtakomponentti esitetään subtransientin ja transientin avulla. Subtransienttia kutsutaan myös alkutilan arvoksi ja transienttia muutostilan arvoksi, nämä ovat arvoja generaattorin reaktanssille oikosulun aikana. Oikosulun aikana generaattorin reaktanssi muuttuu, oikosulun syntyhetkellä reaktanssi putoaa subtransienttiin arvoon, josta se ajan myötä kasvaa takaisin normaalin arvoonsa. (Winell, 2012, s. 125).

Reaktanssin putoaminen johtuu siitä, että äkillisen oikosulun tapahtuessa, oikosulusta syntyvä virta ei hetkellisesti pysty ajautumaan roottorin läpi roottorivirtaa kohti, roottorikäänitys pyrkii ylläpitämään muuttumatonta virtausta. Staattorikäänityksestä tuleva virtaus ei täten välittömästi tule omaksumaan oikosulkuvirtaa vastaavaa arvoa. Tästä johtuen induktanssista tulee huomattavasti pienempi kuin normaalissa tilassa. Lisäksi m.m. generaattorin napalevyjen vaimennuskäämityksistä tulee induktiota, joka vastustaa virtauksen muutoksen tapahtumista, joka entisestään alentaa reaktanssia. (Alfredsson, A., 2003, s. 113)

Alkuvaiheessa reaktanssi koostuu neljän eri vuoreitin reaktansseista, nämä ovat vuotoreaktanssi X_l , ankkurireaktion reaktanssi X_a , vaimennuskäämityksen reaktanssi X_D ja kenttäkäämityksen reaktanssi X_f . Vuotoreaktanssi vastaa reittiä, jonka vuotovuo kulkee staattorikäänien ympäri. Ankkurireaktion reaktanssi vastaa vuoreittiä ilmävälin yli, vuotoreaktanssi ja ankkurireaktion reaktanssi ovat pysyviä reaktansseja ja pysyvän tilan reaktanssi X_d koostuu näistä kahdesta. Vaimennuskäämityksen reaktanssi esiintyy vain subtransientin aikana ja se vastaa vuoreittiä vaimennuskäämien ympäri. Kenttäkäämityksen reaktanssi haihtuu transientin ajan jälkeen ja se vastaa kenttäkäämien ympäri olevaa vuoreittiä. (Machowski ym., 1997, s. 103).

Yksinkertaisesti sanottuna kone on hidas vastaanottamaan nopeita muutoksia, jolloin edellä mainittu staattorireaktio esiintyy, joka antaa koneelle reaktanssiominaisuudet. (Winell, 2012, s. 125).

Reaktanssit nousevassa järjestyksessä $X_d'' < X_d' < X_d$.

Suurissa generaattoreissa X_d' on suunnilleen kaksinkertainen ja X_d on suunnilleen kymmenkertainen X_d'' :n arvoon verrattuna.

4.1.2 Subtransientti

Subtransientit eli alkutilan arvot, merkitään yleensä kahdella indeksointipilkulla, esim. X_d'' . Generaattorin subtransientti komponentti määräytyy staattorin ja vaimennuskäämityksen välisestä impedanssista. Tätä komponenttia kutsutaan subtransientiksi reaktanssiksi. (Schlabach, 2005, s. 67).

Generaattorin tuottama oikosulkuvirta on suhteessa subtransientin reaktanssin suuruuteen, eli korkeampi subtransientti reaktanssi johtaa pienempään oikosulkuvirtaan. Tästä huolimatta ei subtransienttia reaktanssia haluta kovin korkeaksi, koska silloin sillä on negatiivinen vaikutus generaattorin dynaamisen stabiilisuuden suorituskykyyn. (Schlabach, 2005, s. 240).

Subtransienttia reaktanssia käytetään laskettaessa alkutilan arvoja, laskuihin käytetään pitkittäistä alkureaktanssia X_d'' . Subtransientti reaktanssi haihtuu subtransientilla aikavakiolla T_d'' , joka on muutaman jakson pituinen. (Schlabach, 2005, s. 67).

Subtransientti reaktanssi on reaktansseista pienin, joten sen aikana virrat ovat suurimpia ja dynaamiset sekä termiset rasitukset ovat täten myös suurimpia.

Subtransientin reaktanssin arvolla lasketaan alkuoikosulkuvirta I_k'' , jonka arvosta lasketaan sysäyoikosulkuvirta I_s ja terminen oikosulkuvirta I_{th} .

Subtransientin reaktanssin arvo saadaan generaattorin toimittajalta, sen voi myös laskea kaavalla 4.1. Kuva 8 kuvastaa tahtigeneraattorin ekvivalenttia subtransienttia reaktanssia.

$$X_d'' = X_l + \frac{1}{\frac{1}{X_a} + \frac{1}{X_D} + \frac{1}{X_f}} \quad (4.1)$$

missä

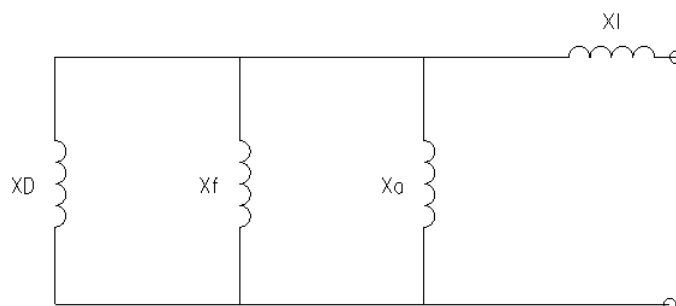
$X_d'' =$ Subtransientin reaktanssin ekvivalentti arvo

$X_l =$ Vuotoreaktanssi

$X_a =$ Ankkurireaktion reaktanssi

$X_D =$ Vaimennuskäämityksen reaktanssi

$X_f =$ Kenttäkäämityksen reaktanssi.



Kuva 8: Subtransientti ekvivalentti reaktanssi (Machowski ym., 1997, s. 104).

4.1.3 Transientti

Transientit, eli muutostilan arvot, merkitään yleensä yhdellä indeksointipilkulla, esim. X'_d . Generaattorin transienttikomponentti määräytyy staattorin ja magnetointikäämityksen välisestä reaktanssista. Tätä komponenttia kutsutaan transientiksi reaktanssiksi. Transienttia reaktanssia käytetään laskettaessa muutostilan arvoja, laskuihin käytetään pitkittäistä muutostilan reaktanssia X'_d . Transientti reaktanssi haihtuu transientilla aikavakiolla T'_d , joka voi kestää muutamia sekunteja. (Schlabach, 2005, s. 67). Transientin reaktanssin arvoa käytetään muutostilan oikosulkuvirran I'_k laskemiseen, jonka avulla mitoitetaan suojareleiden asetteluja (Elovaara & Laiho, 2007, s. 75).

Kuten subtransientti, myös transientti reaktanssin arvo saadaan generaattorin toimittajalta, mutta se voidaan myös laskea kaavalla 4.2. Kaava on muutoin sama kuin subtransientin reaktanssin, mutta vaimennuskäämityksen reaktanssi on haihtunut. (Machowski ym., 1997, s. 104). Kuva 9 kuvastaa tahtigeneraattorin ekvivalenttia transienttia reaktanssia.

$$X'_d = X_l + \frac{1}{\frac{1}{X_a} + \frac{1}{X_f}} \quad (4.2)$$

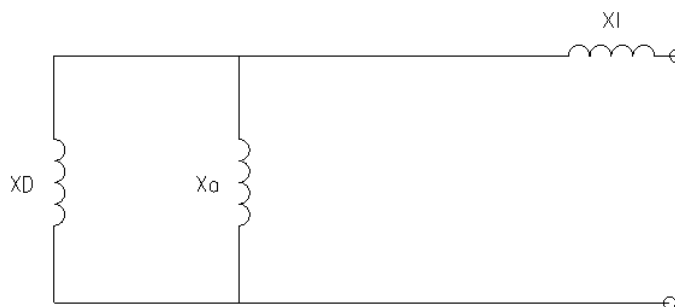
missä

$X'_d =$ Transientin reaktanssin ekvivalentti arvo

$X_l =$ Vuotoreaktanssi

$X_a =$ Ankkurireaktion reaktanssi

$X_f =$ Kenttäkäämityksen reaktanssi.



Kuva 9: Transientti ekvivalentti reaktanssi (Machowski ym., 1997, s. 104).

4.2 Oikosulkusuureet

4.2.1 Alkuoikosulkuvirta I_k''

Alkuoikosulkuvirta on symmetrisen oikosulkuvirran tehollisarvo vian alkuhetkellä. Alkuoikosulkuvirtaa ei tule käyttää suojausasetteluihin tai mitoituksiin vaan sen avulla määritetään muita oikosulkuvirtoja, kuten sysäsoikosulkuvirta ja terminen oikosulkuvirta. (Huotari & Partanen, 1998, s. 23).

Alkuoikosulkuvirran laskemiseen käytetään pitkittäistä alkureaktanssia X_d'' , joka vaimenee aikavakiolla T_d'' , jonka pituus on 0,1s. luokkaa (Elovaara & Laiho, 2007, s. 75). Alkuoikosulkuvirran voi laskea ominaisoikosulkuteho menetelmällä tai IEC:n määrittelemällä menetelmällä.

4.2.2 Muutosoikosulkuvirta I_k'

Muutostilan oikosulkuvirta esiintyy alkuoikosulkuvirran vaimennettua. Muutostilan oikosulkuvirroilla määritellään suojausasetteluja. Muutostilasta lasketaan sekä maksimi, että minimi oikosulkuvirta. Generaattorin reaktanssin arvona käytetään muutostilan arvoa X_d' . (Huotari & Partanen, 1998, s. 69). Muutosoikosulkuvirta vaimenee aikavakiolla T_d' , joka on muutamien sekunttien luokkaa joten oikosulkutilanteessa katkaisijat katkaisevat I_k' suuruisia virtoja. (Elovaara & Laiho, 2007, s. 75). IEC standardissa ei käsitellä muutostilan oikosulkuvirtaa.

4.2.3 Pysyvä oikosulkuvirta I_k

Pysyvän, tai jatkuvan, tilan oikosulkuvirta esiintyy muutostilan virran vaimennettua. Oikosulkuvirta saavuttaa todella harvoin pysyvän tilan arvonsa, koska suojauksen tulee toimia paljon nopeammin kuin se aika, joka oikosulkuvirralla kestää saavutta pysyvä tila. (Elovaara & Laiho, 2007, s. 75). Pysyvän tilan oikosulkuvirran laskenta ei ole yhtä tarkka kuin alkutilan oikosulkuvirran laskenta (IEC, 2001, s. 117). Tahtikoneiden maksimi pysyvän tilan oikosulkuvirta lasketaan kaavalla 4.3

$$I_{kmax} = \lambda_{max} \cdot I_n \quad (4.3)$$

missä

I_{kmax} = Maksimi pysyvän tilan oikosulkuvirta

λ_{max} = Suurinta mahdollista magnetointia vastaava kerroin

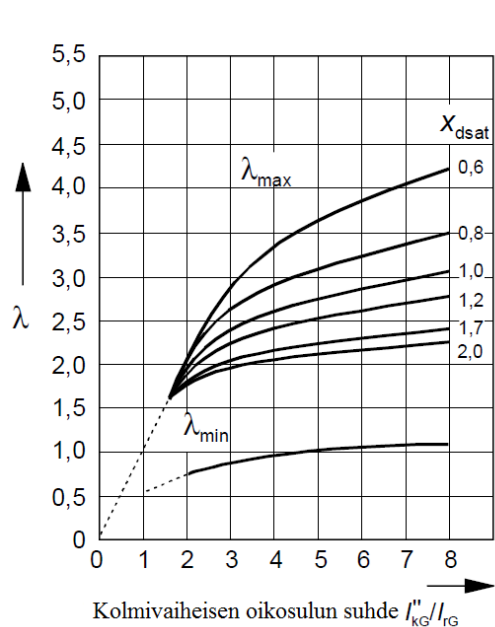
I_n = Koneen nimellisvirta

Kerroin λ_{max} saadaan kuvista 10 ja 11.

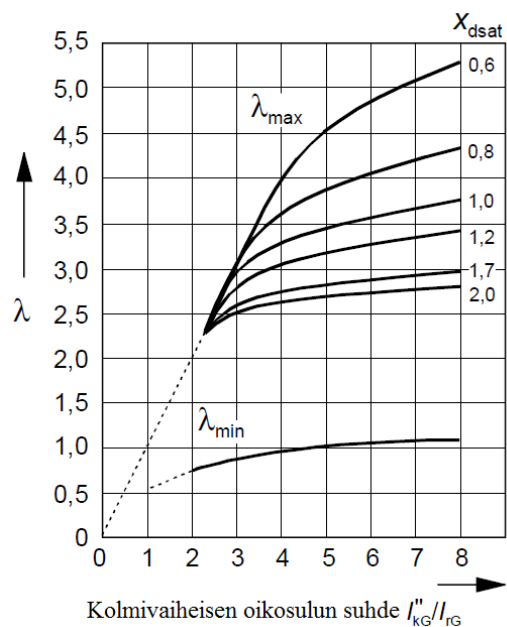
Ensimmäinen sarjan käyrä jos $U_{mmax}/U_{mn} = 1,6$, toisen sarjan käyrä jos $U_{mmax}/U_{mn} = 2,0$.

U_{mmax} =Suurin mahdollinen magnetointijännite.

U_{mn} =Nimellismagnetointijännite.



Kuva 10: Magnetointikerroin sarja 1 (IEC, 2001, s. 119).



Kuva 11: Magnetointikerroin sarja 2 (IEC, 2001, s. 119).

4.2.4 Sysäysoikosulkuvirta i_s

Sysäysoikosulkuvirta on oikosulkuvirran suurin hetkellisarvo ja se esiintyy yhden puolijakson kuluttua oikosulun syntyhetkestä olettaen, että oikosulku on syntynyt sinä hetkenä, kun virta on huippuarvossaan jolloin tasakomponentti saa suurimman arvonsa. Sysäysoikosulkuvirtaa käytetään laitteiden mekaanisten rakenteiden mitoittamiseen ja se on laitteen dynaaminen rasitusarvo. (Elovaara & Laiho, 2007, s. 75). Sysäysoikosulkuvirta lasketaan standardin IEC (2001, s. 101) mukaan kaavalla 4.4.

$$i_s = \kappa\sqrt{2} * I_k'' \quad (4.4)$$

missä

i_s = Sysäysoikosulkuvirta

κ = Sysäyskerroin

I_k'' = Alkuoikosulkuvirta

(IEC 60909-0, s. 101)

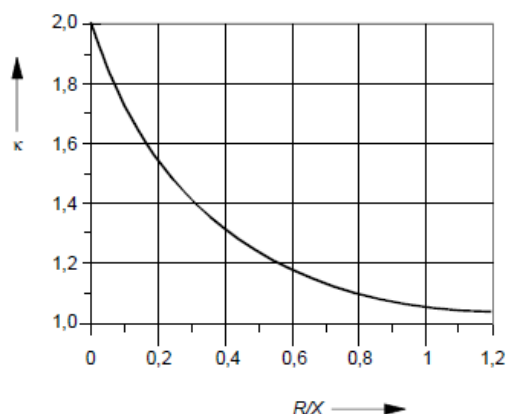
Sysäyskerroin κ saadaan piirin resistanssin ja reaktanssin välisestä suhteesta. Sen voi laskea kaavalla 4.5 tai lukea kuvista 12 ja 13.

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} \quad (4.5)$$

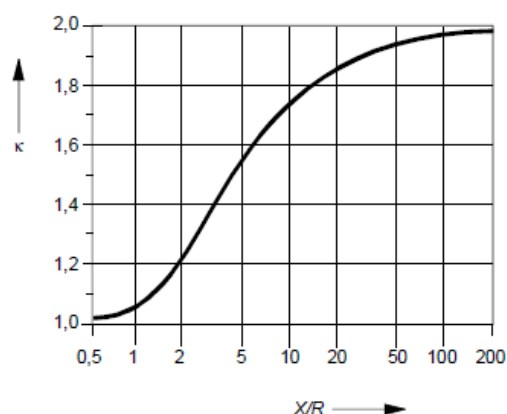
missä

R = Resistanssin arvo

X = Reaktanssin arvo



Kuva 12: Sysäyskerroin R/X (IEC, 2001, s. 101).



Kuva 13: Sysäyskerroin X/R (IEC, 2001, s. 101).

Laskiessa tahtigeneraattorin sysäyskerrointa tulee resistanssin arvona käyttää R_{Gf} arvoa (IEC, 2001, s. 103).

R_{Gf} lasketaan kaavoilla 4.6, 4.7 ja 4.8, riippuen jännitteen ja tehon arvoista.

$$R_{Gf} = 0,05 \cdot X_d'' \text{ jos } U_n > 1kV \text{ ja } S_n > 100MVA \quad (4.6)$$

$$R_{Gf} = 0,07 \cdot X_d'' \text{ jos } U_n > 1kV \text{ ja } S_n < 100MVA \quad (4.7)$$

$$R_{Gf} = 0,15 \cdot X_d'' \text{ jos } U_n \leq 1kV \quad (4.8)$$

joissa

R_{Gf} = Generaattorin fiktiivinen resistanssi

0,05/0,07/0,15 = Standardin määräämät kertoimet

X_d'' = Generaattorin alkureaktanssi

U_n = Generaattorin nimellisjännite

S_n = Generaattorin nimellisteho

On myös olemassa laskentatapoja, joilla saadaan suurin piirtein sama tulos ilman sysäyskerrointa. Näitä ei standardissa käytetä. Kaavassa 4.9 on esitetty tämä laskentatapa. (Elovaara & Laiho, 2007, s. 75).

$$i_s < 2\sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (4.9)$$

Kaavassa sysäyskerroin on korvattu luvulla 2, koska taulukoista kuvissa 12 ja 13 voidaan todeta, että sysäyskerroin κ ei voi olla suurempi kuin 2. Todellinen sysäysoikosulkuvirta on pienempi kuin tällä kaavalla saatu arvo. Jotta päästäisiin lähemmäksi oikeaa arvoa kaavassa 4.10 luku 2 korvataan luvulla 1,8.

$$I_s = 1,8\sqrt{2} \cdot I_k' \quad (4.10)$$

Koska $1,8\sqrt{2} \approx 2,5$ voidaan esittää kaava 4.11.

$$I_s \cong 2,5 \cdot I_k'' \quad (4.11)$$

4.2.5 Terminen oikosulkuvirta I_{th}

Oikosulun sattuessa lämpötila nousee ja laitteiden tulee dynaamisen kestävyysden lisäksi olla myös termisesti kestäviä. Laitteiden terminen kestävyys on yleensä ilmoitettu yhden sekunnin arvona. (ABB, 2000, Luku 7 s. 9).

Ekvivalentti terminen oikosulkuvirta lasketaan kaavalla 4.12 (IEC, 2001, s. 129).

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{(m+n)} \quad (4.12)$$

missä

I_{th} = Ekvivalentti terminen oikosulkuvirta

I_k'' = Alkuoikosulkuvirta

m = Vaimenevan vaihotvirakomponentin kerroin

n = Vaimenevan tasavirtakomponentin kerroin

Kertoimet m ja n saadaan kaavoilla 4.13 ja 4.14 tai kuvista 14 ja 15. Tasavirtakomponentin m koko riippuu sysäyskerroimesta ja oikosulun kestoajasta, ja vaihtovirtakomponentin n koko riippuu suhteesta oikosulkuvirran alkuarvon ja pysyvän arvon välillä I_k''/I_k sekä oikosulun kestoajasta. (IEC, 2001, s. 131).

$$\frac{1}{2fT_k \ln(\kappa - 1)} [e^{4fT_k \ln(\kappa - 1)} - 1] \quad (4.13)$$

missä

f = Taaajuus

T_k = Oikosulkuaika

κ = Sysäyskerroin

$$\begin{aligned} \frac{1}{(I_k''/I_k)^2} \left[1 + \frac{T_d'}{20T_k} (1 - e^{-20T_k/T_d'}) \left(\frac{I_k''}{I_k} - \frac{I_k'}{I_k} \right)^2 + \frac{T_d'}{2T_k} (1 - e^{-2T_k/T_d'}) \left(\frac{I_k'}{I_k} - 1 \right)^2 \right. \\ \left. + \frac{T_d'}{5T_k} (1 - e^{-10T_k/T_d'}) \left(\frac{I_k''}{I_k} - \frac{I_k'}{I_k} \right) + \frac{2T_d'}{T_k} (1 - e^{-T_k/T_d'}) \left(\frac{I_k'}{I_k} - 1 \right) \right. \\ \left. + \frac{T_d'}{5,5T_k} (1 - e^{-11T_k/T_d'}) \left(\frac{I_k''}{I_k} - \frac{I_k'}{I_k} \right) \left(\frac{I_k'}{I_k} - 1 \right) \right] \quad (4.14) \end{aligned}$$

missä

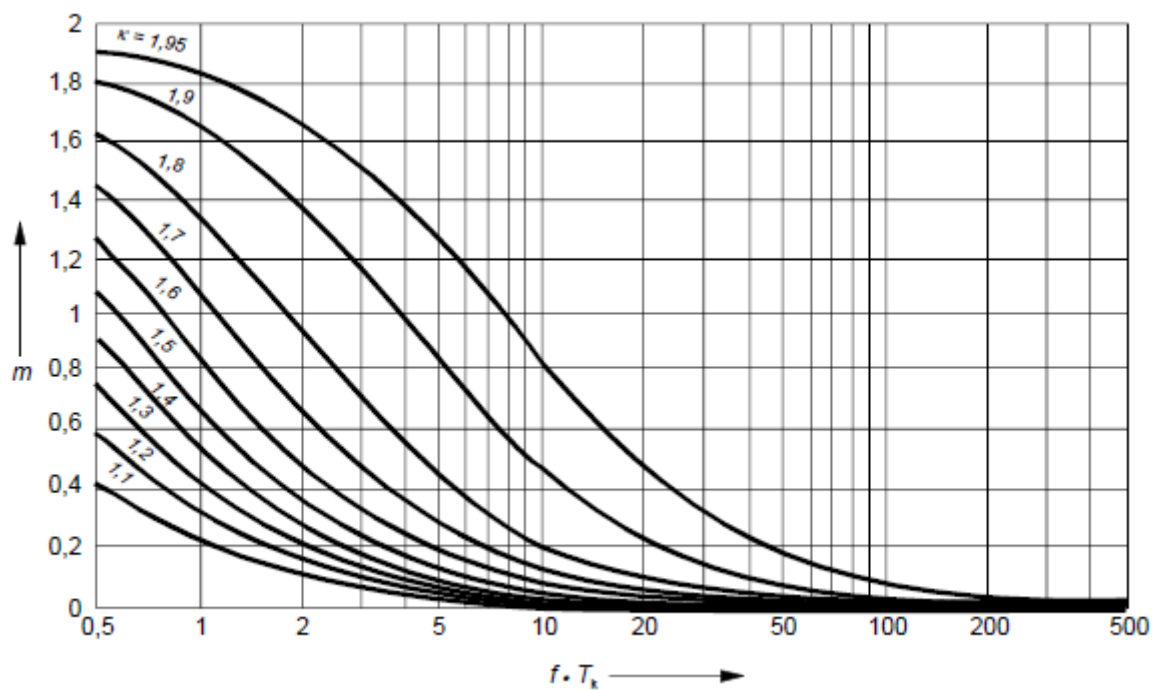
I_k'' = Alkuoikosulkuvirta

I_k = Pysyvä oikosulkuvirta

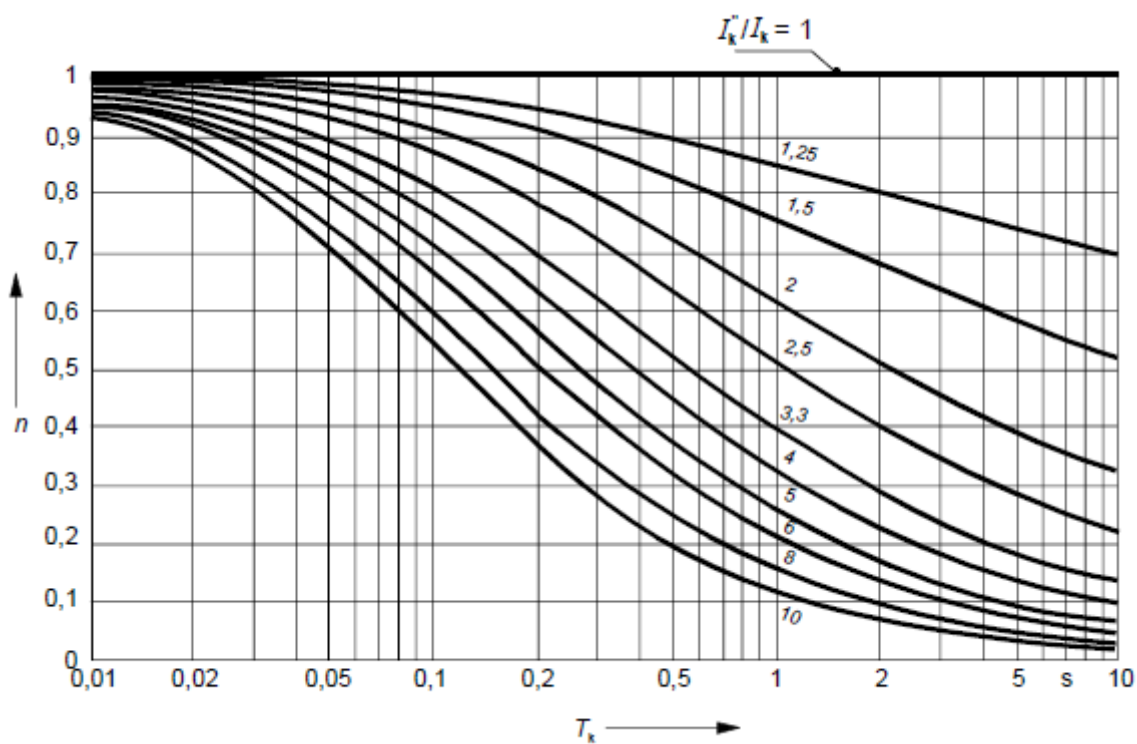
T_k = Oikosulkuaika

$I_k'/I_k = \frac{I_k''/I_k}{0,88+0,17I_k''/I_k}$

$T_d' = \frac{3,1s}{I_k''/I_k}$



Kuva 14: Tasavirtakomponentti m (IEC, 2001, s. 131).



Kuva 15: Vaihtovirtakomponentti n (IEC, 2001, s. 133).

4.3 Laskentamenetelmät

Oikosulkuvirtojen laskemista varten on olemassa eri menetelmiä riippuen vaadittavasta tarkkuudesta. Tässä työssä verrataan ominaisoikosulkutehomenetelmää sekä IEC-standardin määrittelemää menetelmää. Ominaisoikosulkutehomenetelmä on valittu, koska menetelmää käytetään olemassa olevassa laskentapohjassa. Työssä verrataan kyseistä menetelmää standardin menetelmään ja verrataan näillä menetelmillä saatuja tuloksia. Jos menetelmien tuloksissa ei ole suurta eroa voidaan uusi laskentapohja myös toteuttaa ominaisoikosulkutehomenetelmällä.

4.3.1 Laskenta ominaisoikosulkuteholla

Oikosulkuvirran laskeminen ominaisoikosulkutehojen avulla on nopea tapa laskea oikosulkuvirta, mutta sillä on myös suurin epätarkkuus. Lasketut arvot ovat kuitenkin niin lähellä oikeita arvoja, että useimmissa tapauksissa voidaan hyvin käyttää kyseistä menetelmää. IEC standardi ei käytä ominaisoikosulkutehoa.

Piirissä olevan komponentin ominaisoikosulkuteho on laskennallinen teho, jossa täysi oikosulkuvirta ja nimellisjännite vaikuttavat yhtä aikaa ja ominaisoikosulkuteho esiintyisi komponentin jälkeen, mikäli eivät muut verkon osat rajoittaisi sitä. (ABB, 2000, Luku 7 s. 9).

Kyseisellä menetelmällä lasketaan yleensä vain alkuoikosulkuvirta I_k'' ja laskettaessa huomioidaan vain reaktanssit. Koska resistansseja ei huomioida, ei myöskään sysäyskerrointa saada tarkasti laskettua, vaan sysäyskerroin tulee arvioida komponenttien R/X suhteesta. Ominaisoikosulkuteholla laskemiseen tarvittavat tiedot ovat: Jännite, teho ja komponentin impedanssi/reaktanssi. (ABB, 2000, Luku 7 s. 9).

Generaattorin, moottorin ja muuntajan ominaisoikosulkuteho saadaan kaavoilla 4.15 ja 4.16.

$$S_k = \frac{U_n^2}{Z_k} \quad (4.15)$$

missä

$S_k =$ Ominaisoikosulkuteho

$U_n =$ Nimellisjännite

$Z_k =$ Oikosulkuimpedanssi ohmeina/vaihe

$$S_k = \frac{S_n}{z_k} \sim \frac{S_n}{x_d} \quad (4.16)$$

missä

$S_k =$ Ominaisoikosulkuteho

$S_n =$ Nimellisteho

$z_k =$ Komponentin suhteellinen oikosulkuimpedanssi

$x_d =$ Generaattorin suhteellinen alkutilan reaktanssi

Kun piirissä on useampi komponentti rinnan tai sarjaan kytkettyinä, jotka tuottavat ominaisoikosulkutehoa, saadaan tietyn pisteen kokonaisoikosulkuteho yhdistämällä piiriin kuuluvat komponentit kaavoilla 4.17 ja 4.18. (ABB, 2000, Luku 7 s. 9-10).

Rinnan kytketyt komponentit

$$S_k = S_{k1} + S_{k2} + \dots + S_{kn} \quad (4.17)$$

Sarjaan kytketyt komponentit

$$\frac{1}{S_k} = \frac{1}{S_{k1}} + \frac{1}{S_{k2}} + \dots + \frac{1}{S_{kn}} \quad (4.18)$$

Kun piirin ominaisoikosulkuteho on tiedossa saadaan siitä laskettua alkuoikosulkuvirta kaavalla 4.19.

$$I_k'' = \frac{1,1 \cdot S_k}{\sqrt{3} \cdot U_n} \quad (4.19)$$

missä

$I_k'' =$ Alkuoikosulkuvirta

$1,1 =$ Jännitekerroin c joka käsitellään IEC laskentamenetelmässä

$S_k =$ Ominaisoikosulkuteho

$U_n =$ Nimellisjännite

4.3.2 Laskenta standardin IEC 60909-0 määrittelemällä tavalla

Standardissa esitelty laskentamenetelmä perustuu vikapaikkaan sijoitettuun ekvivalenttiin jännitelähteeseen. Tämä ekvivalentti jännitelähde on systeemin ainut aktiivinen jännite. Kaikki piiriin kuuluvat komponentit, kuten generaattorit, muuntaajat, verkko jne. korvataan niiden sisäisellä impedanssilla. (IEC, 2001, s. 35).

Ekvivalentti jännitelähde saadaan kaavalla 4.20.

$$\frac{cU_n}{\sqrt{3}} \quad (4.20)$$

missä

$c = \text{Jännitekerroin}$

$U_n = \text{Nimellisjännite}$

Ekvivalentissa jännitelähteessä käytettävä jännitekerroin c on standardin IEC 60909-0 määrittelemä kerroin, jota on käytettävä monesta syystä.

Jännitekerroin huomioi seuraavat asiat:

- Jännite-eron oikosulkupisteen ja komponenttien välillä.
- Jännitteen vaihtelun riippuen ajasta ja paikasta
- Muuttumiset muuntaajan käämikytkimessä
- Jättää pois kuormitukset ja kapasitanssit
- Generaattoreiden ja moottoreiden subtransientin käyttäytymisen. (IEC, 2001, s. 21).

Käyttäessä taulukon 1 mukaista jännitekerrointa oikosulkulaskennan tuloksiin tulee turvamarginaali ja arvot ovat korkeampia kuin oikeassa järjestelmässä, kuitenkin välttämättä taloudellisesti kannattamattoman suurta arvoa. Nimellisjännite tässä tapauksessa on vikapaikan käyttöjännite vian syntymishetkellä.

Jännitekerroin c otetaan taulukon 1 mukaisesti. (IEC, 2001, s. 41).

Taulukko 1: Jännitekerroin c (IEC 60909-0 s. 41)

Nimellisjännite U_n	Maksimi oikosulkuvirta c_{max}	Minimi oikosulkuvirta c_{min}
Pienjännite 100 V - 1000 V	1,05/1,10	0,95
Keskijännite > 1kV - 35 kV	1,10	1,00
Suurjännite >35kV	1,10	1,00

(IEC, 2001, s. 41)

Kolmivaiheinen oikosulkuvirta lasketaan kaavalla 4.21

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (4.21)$$

missä

c = Taulukon 1 mukainen jännitekerroin

U_n = Nimellisjännite

Z_k = Oikosulkupiirin impedanssi

R_k = Oikosulkupiirin resistanssi

X_k = Oikosulkupiirin reaktanssi

Kahden vaiheen välinen oikosulkuvirta lasketaan kaavalla 4.22

$$I_{k2}'' = \frac{cU_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)}|} = \frac{cU_n}{2 \cdot |Z_{(1)}|} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_k'' \quad (4.22)$$

missä

c = Taulukon 1 mukainen jännitekerroin

U_n = Nimellisjännite

$Z_{(1)}$ = Myötäkomponenttiverkon impedanssi

$Z_{(2)}$ = Vastakomponenttiverkon impedanssi

I_k'' = Kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta

Myötäkomponentin oikosulkuimpedanssissa vaihevektorit ovat järjestelmän vaiheiden kanssa samassa järjestyksessä, esim L1 L2 L3. Vastakomponentin oikosulkuimpedanssissa vaihevektorit ovat järjestelmään nähden käänteisessä järjestyksessä esim. L1 L3 L2. Oikosulun alkuvaiheessa vastaimpedanssin on lähes yhtä suuri kuin myötäimpedanssi, riippumatta sattuuiko oikosulku lähellä generaattoria vai kaukana generaattorista. Siitä syystä kaavassa 4.22 voidaan asettaa $Z_{(1)} = Z_{(2)}$. Ainut kerta, kun oikosulkuimpedanssi $Z_{(2)}$ eroaa $Z_{(1)}$:stä on muutostilan tai pysyvän tilan aikana jos oikosulku on generaattorin lähellä. (IEC, 2001, s. 95).

4.3.3 Komponenttien impedanssit oikosulkupiirissä

Oikosulkupiirissä generaattorit, tahti- ja epätahtimoottorit sekä syöttävä verkko kuuluvat oikosulkuvirtaa syöttäviin komponentteihin, jotka korvataan impedansseilla. Myös oikosulkuvirtaa rajoittavat komponentit kuten muuntajat, kuristimet, kaapeli ja kiskot korvataan impedansseilla. (Huotari & Partanen, 1998, s. 15.) Laskiessa oikosulkuvirtoja käyttäen ekvivalenttia jännitelähdettä tulee generaattoreiden ja muuntajien impedanssit kertoa impedanssin korjauskertoimilla K_G ja K_T (IEC, 2001, s. 49).

Generaattorin impedanssi

Generaattorin mallintamiseksi impedanssina tulee ensin laskea generaattorin reaktanssi, ja sitten soveltaa reaktanssiin standardin mukainen korjauskerroin. Generaattorin valmistajalta saadaan reaktanssin arvo. Mikäli valmistajalta saatu arvo on prosentteina eikä ohmeina, lasketaan se ohmeikse kaavalla 4.23. (IEC, 2001, s. 63).

$$X_G'' = \frac{x_d''}{100\%} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad (4.23)$$

missä

$X_G'' =$ Generaattorin reaktanssi

$x_d'' =$ Generaattorin alkutilan suhteellinen reaktanssi

$U_n^2 =$ Generaattorin nimellisjännite

$S_n =$ Generaattorin nimellisnäennäisteho

Generaattorin korjauskerroin lasketaan kaavalla 4.24.

$$K_G = \frac{U_n}{U_{nG}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \cdot \sin\varphi_{nG}} \quad (4.24)$$

missä

$K_G =$ Generaattorin impedanssin korjauskerroin

$U_n =$ Verkon nimellispääjännite

$U_{nG} =$ Generaattorin nimellispääjännite

$c_{max} =$ Taulukon 1 mukainen jännitekerroin

$x_d'' =$ Generaattorin suhteellinen alkureaktanssi

$\varphi_{nG} =$ Generaattorin vaihekulma normaalikäytössä

Generaattorin korjattu impedanssi saadan kaavalla 4.25.

$$Z_{GK} = K_G \cdot Z_G = K_G(R_G + jX_G'') \quad (4.25)$$

Muuntajan impedanssi

Kaksikämmimuuntajan oikosulkuimpedanssin laskemiseen käytettävät oikosulkusuureet lasketaan muuntajan kilpiarvoista kaavoilla 4.26, 4.27 ja 4.28 (IEC, 2001, s. 51).

$$Z_t = \frac{u_k}{100\%} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad (4.26)$$

$$R_t = \frac{u_r}{100\%} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{P_{kn}}{3I_n^2} \quad (4.27)$$

$$X_t = \sqrt{Z_t^2 - R_t^2} \quad (4.28)$$

joissa

Z_t = Muuntajan oikosulkuimpedanssi

R_t = Muuntajan oikosulkuresistanssi

X_t = Muuntajan oikosulkureaktanssi

u_k = Muuntajan suhteellinen oikosulkujännite

U_n = Muuntajan nimellisjännite

S_n = Muuntajan nimellinäennäisteho

u_r = Muuntajan suhteellinen oikosulkuresistanssi

P_{kn} = Muuntajan kokonaispätötehohäviöt nimellisvirralla

I_n = Muuntajan nimellisvirta

Yleensä muuntajan R/X suhde laskee muuntajan koon suurentuessa, isojen muuntajien resistanssi on niin pieni, että laskiessa oikosulkuvirtoja impedanssin voidaan olettaa koostuvan pelkästään reaktanssista. Mikäli lasketaan sysäysoikosulkuvirtaa tai tasavirtakomponenttia tulee resistanssi ottaa huomioon. (IEC, 2001, s. 51).

Kaksikämmimuuntajan laskuissa tulee käyttää impedanssin korjauskerrointa K_t .

Kaksikämmimuuntajan korjauskerroin lasketaan kaavalla 4.29.

$$K_T = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6x_T} \quad (4.29)$$

missä

K_T = Muuntajan impedanssin korjauskerroin

0,95 = Standardin määräämä kerroin

c_{max} = Taulukon 1 mukainen jännitekerroin

x_T = Muuntajan suhteellinen reaktanssi

Jännitekerrointa c_{max} valittaessa taulukosta 1, käytetään muuntajan pienjännitepuolen nimellisjännitettä (IEC, 2001, s. 57).

Muuntajan suhteellinen reaktanssi saadaan muuntajan reaktanssista kaavalla 4.30.

$$x_T = \frac{X_T}{(U_n^2/S_n)} \quad (4.30)$$

missä

x_T = Muuntajan suhteellinen reaktanssi

X_T = Muuntajan reaktanssi ohmeina

U_n = Muuntajan nimellisjännite

S_n = Muuntajan nimellinäennäisteho

Syöttävän verkon impedanssi

Syöttävästä verkosta tulee tietää joko alkuoikosulkuvirta I''_{kv} tai oikosulkuteho S''_{kv} .

Verkon oikosulkuimpedanssi Z_{kv} saadan kaavalla 4.31.

$$Z_{kv} = \frac{cU_n^2}{S''_{kv}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}I''_{kv}} \quad (4.31)$$

missä

Z_{kv} = Verkon oikosulkuimpedanssi

c = Taulukon 1 mukainen jännitekerroin

U_n = Syöttävän verkon nimellisjännite

S_{kv} = Syöttävän verkon oikosulkuteho

I_{kv} = Syöttävän verkon oikosulkuvirta

Jos syöttävän verkon resistanssin ja reaktanssin suhde R_{kv}/X_{kv} on tiedossa, saadaan siitä laskettua oikosulkureaktanssi X_{kv} :n arvo kaavalla 4.32 (IEC, 2001, s. 49).

$$X_{kv} = \frac{Z_{kv}}{\sqrt{1 + (R_{kv}/X_{kv})^2}} \quad (4.32)$$

missä

Z_{kv} = Syöttävän verkon impedanssi

X_{kv} = Syöttävän verkon reaktanssi

R_{kv} = Syöttävän verkon resistanssi

Avojohtoverkoissa, joissa nimellispääjännite on yli 35kV, voidaan ekvivalentti impedanssi Z_{kv} tulkita reaktanssina, täten $Z_{kv} = 0 + jX_{kv}$.

Muissa tapauksissa, joissa resistanssin tarkka arvo ei ole tiedossa, voidaan impedanssi jakaa seuraavasti. (IEC, 2001, s. 51).

$$R_{kv} = 0,1X_{kv}$$

$$X_{kv} = 0,995Z_{kv}$$

4.4 Oikosulkulaskentapohja

Oikosulkulaskentapohjalla mitoitetaan kojeistojen oikosulkukestoisuus, sillä ei ole tarkoitus määrittellä releiden suojausasetteluja. Liitteessä 1 on eri oikosulkulaskentamenetelmien vertailuja. IEC:n määrittelemällä menetelmällä laskettujen oikosulkuvirtojen ja ominaisoikosulkutehomenetelmällä laskettujen oikosulkuvirtojen ero on noin 1-2,5 %. Liitteessä 2 on simulointiohjelma Neplanilla tehdyt simuloinnit kolmesta eri laitostyypistä, simuloidut tulokset eroavat 1-10 % ominaisoikosulkumenetelmän tuloksista. Koska laskentapohjalla ei tarvita tarkalleen oikeita arvoja toteutetaan laskentapohjan laskut ominaisoikosulkuteholla. Tämä menetelmä on käyttäjäystävällisempi ja vaatii vähemmän lähtötietoja komponenteista.

Viitaten kaavaan 4.10 on sysäyskerroin lukittu arvoon 1,8

Viitaten kappaleeseen 2.3.5 on oikosulkuaika asetettu arvoon 1s.

Liitteessä 3 on laskentapohjat, laskentapohjia on kolme kappaletta, jotka kuvastavat yleisimpiä laitostyyppejä VEO:lla.

1. kaksi rinnakkaista generaattoria ja yksi muuntaja.
2. kolme rinnakkaista generaattoria ja kaksi muuntaja, jotka syöttävät eri verkkoja.
3. kolme rinnakkaista generaattoria ja kaksi rinnakkaista muuntaja syöttävät samaa verkkoa.

Näitä vakio pohjia on mahdollista muokata kuvastamaan käyttäjän haluamaa laitosta jättämällä ylimääräisen generaattorin/muuntajan tiedot tyhjäksi jolloin laskenta ei huomioi kyseistä komponenttia. Esimerkiksi tapauksessa nro. 2 voidaan yhden muuntajan tiedot jättää tyhjäksi jolloin laskentapohja kuvastaa laitosta, jossa on kolme rinnakkaista generaattoria ja yksi muuntaja, ja laskee kaiken tämän mukaan. Käyttäjä syöttää laskentapohjassa keltaisella merkittyihin ruutuihin komponenttien tiedot, kaikki komponentista vaadittavat tiedot on syötettävä, jotta laskenta toimii oikein. Tiedot tulee syöttää seuraavina suureina:

Teho	MVA
Jännite	kV
Virta	kA
Taajuus	Hz
Impedanssi	%
Reaktanssi	%

Mikäli impedanssi tai reaktanssi on tiedossa vain ohmeina on laskentapohjassa kohta, johon syötät arvon ohmeina ja se muunnetaan automaattisesti prosenteiksi.

Laskentaa varten vaaditaan komponenteilta seuraavat tiedot:

Verkko	Oikosulkuteho Taaajuus
Muuntaja	Näennäisteho Ensiöjännite Toisiojännite Oikosulkuimpedanssi
Generaattori	Näennäisteho Jännite Alkureaktanssi Magnetointikerroin

Magnetointikerroin λ on standardin määräämä kerroin, jota tarvitaan laskemaan pysyvä oikosulkuvirta, jota taas käytetään termisen oikosulkuvirran kertoimen n laskemiseen.

Magnetointikertoimen määrittämistä varten tarvittavat tiedot ovat:

- Suurimman magnetointijännitteen ja nimellismagnetointijännitteen suhde U_m/U_{mmax} , joka on joko 1,6 tai 2,0.
- Generaattorin kyllästynyt tahtireaktanssi X_{dsat} per unit arvona.
- Generaattorin alkuoikosulkuvirran ja nimellisvirran suhde I_k''/I_n .

Suhde U_m/U_{mmax} ja tahtireaktanssi on otettava generaattorin lähtötiedoista, suhde I_k''/I_n saadaan laskentapohjasta. Laskentapohjassa on kaksi kuvaa, joista magnetointikerroin valitaan. Magnetoinnin suhde U_m/U_{mmax} määrää kumpaa kuvaa käytetään. Molemmissa kuvissa käyrä haarautuu moneen osaan, tahtireaktanssin avulla valitaan, mitä haarautumaa seurataan. Laskentapohja antaa käyttäjälle suhteen I_k''/I_n , joka määrää käyrän x-akselin pisteen. Tästä pisteestä nousee ylös kunnes kohdataan reaktanssin avulla valittu käyrä, kohtaamispisteestä jatketaan vaakasuoraan vasemmalle y-akselille, josta saadaan magnetointikerroin λ .

Kaikkien tarvittavien tietojen syöttämisen jälkeen laskentapohja esittää komponenttien lasketut arvot niiden vieressä oleviin vihreisiin ruutuihin. Laskentapohja laskee seuraavat arvot:

- Ominaisoikosulkuteho S_k
- Alkuoikosulkuvirta I_k''
- Ekvivalentti termien oikosulkuvirta I_{th} (vain generaattorit ja solmupisteet)
- Dynaaminen/sysäys oikosulkuvirta I_{peak} (vain generaattorit ja solmupisteet)
- Nimellisvirta (generaattorit)

Järjestelmässä eri suuntiin, riippuen oikosulun paikasta, menevät ominaisoikosulkutehot sekä alkuoikosulkuvirrat ovat myös esitetty nuolien kanssa kaikissa eri pisteissä. Kaikki laskenta tapahtuu niin sanotusti piilossa toisella välilehdellä, jossa on omat taulukot oikosulkutehoille, sarjan ja rinnan kytkettyjen komponenttien yhdistämiselle ja oikosulkuvirroille sekä niiden laskemiseen tarvittaville muille suureuksille. Kaikki tämä tapahtuu automaattisesti käyttäjän syöttäessä keltaisiin ruutuihin tarvittavat tiedot.

Laskentapohjassa tapahtuva laskut

Ominaisoikosulkuteho S_k kaavalla 4.16

$$S_k = \frac{S_n}{z_k} \sim \frac{S_n}{z_d}$$

Ominaisoikosulkutehojen yhdistäminen kaavoilla 4.17 ja 4.18.

$$S_k = S_{k1} + S_{k2} + \dots + S_{kn}$$

$$\frac{1}{S_k} = \frac{1}{S_{k1}} + \frac{1}{S_{k2}} + \dots + \frac{1}{S_{kn}}$$

Alkuoikosulkuvirta I_k'' kaavalla 4.19.

$$I_k'' = \frac{1,1 \cdot S_k}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

Terminen oikosulkuvirta I_{th} kaavalla 4.12.

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{(m+n) \cdot t_k}$$

Kerroin m kaavalla 4.13.

$$\frac{1}{2fT_k \ln(\kappa-1)} [e^{4fT_k \ln(\kappa-1)} - 1]$$

Kerroin n kaavalla 4.14.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{(I_k''/I_k)^2} \left[1 + \frac{T'_d}{20T_k} (1 - e^{-20T_k/T'_d}) \left(\frac{I_k''}{I_k} - \frac{I'_k}{I_k} \right)^2 + \frac{T'_d}{2T_k} (1 - e^{-2T_k/T'_d}) \left(\frac{I'_k}{I_k} - 1 \right)^2 \right. \\ & + \frac{T'_d}{5T_k} (1 - e^{-10T_k/T'_d}) \left(\frac{I_k''}{I_k} - \frac{I'_k}{I_k} \right) + \frac{2T'_d}{T_k} (1 - e^{-T_k/T'_d}) \left(\frac{I'_k}{I_k} - 1 \right) \\ & \left. + \frac{T'_d}{5,5T_k} (1 - e^{-11T_k/T'_d}) \left(\frac{I_k''}{I_k} - \frac{I'_k}{I_k} \right) \left(\frac{I'_k}{I_k} - 1 \right) \right] \end{aligned}$$

Dynaaminen oikosulkuvirta I_s kaavalla 4.4.

$$i_s = \kappa \sqrt{2} * I_k''$$

Muunnos ohmeista prosentteihin muuntamalla kaavaa 4.23.

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

4.4.1 Generaattorin alkutiedot

Generaattorin valmistaja toimittaa taulukoita, joista saadaan kaikki generaattorin arvot. Yleisten sähköarvojen kuten jännite, teho, virta jne. lisäksi taulukoissa on useita eri reaktanssi- ja aikavakio-arvoja. Eri laskentamenetelmissä käytetään eri arvoja, tässä työssä esitetyssä ominaisoikosulkutehomenetelmässä käytetään generaattorin reaktanssiarvoista ainoastaan pitkittäisiä reaktanssiarvoja. Taulukoissa annetaan sekä kyllästetyt, että kyllästymättömät arvot reaktansseille, kyllästys pienentää reaktansseja 5-15 % (ABB, 2000, Luku 17 s. 20).

Kappaleessa on selvennetty generaattoritoimittajien taulukoissa esiintyvien reaktanssien ja aikavakioiden merkitys. Työhön on käytetty kahdeksan eri generaattoritoimittajan taulukoissa esiintyviä suureita. (Global hydro,2000), (TES Vsetín, 2014), (Wasserkraft Volk WKV, 2013), (Hitzinger, 2009), (Indar, 2011), (Leroy Somer, 2010), (Alstom, [s.a.]), (Norconsult, 2008).

X_d = Pitkittäinen tahtireaktanssi(pysyvä tila), generaattorin pitkittäisen reaktanssin pysyvä arvo.

X'_d = Pitkittäinen muutosreaktanssi(transientti), generaattorin pitkittäisen reaktanssin muutostilan arvo.

X''_d = Pitkittäinen alkureaktanssi(subtransientti), generaattorin pitkittäisen reaktanssin alkutilan arvo.

X_q = Poikittainen tahtireaktanssi, generaattorin poikittaisen reaktanssin pysyvä arvo.

X'_q = Poikittainen muutosreaktanssi, generaattorin poikittaisen reaktanssin muutostilan sarvo.

X''_q = Poikittainen alkureaktanssi, generaattorin poikittaisen reaktanssin alkutilan arvo.

X_2 = Vastareaktanssi, vastakomponentin reaktanssin arvo.

X_0 = Nollareaktanssi, nollakomponentin reaktanssin arvo.

T'_d = Oikosulkupiirin pitkittäinen muutostilan aikavakio, aika joka pitkittäisellä muutosreaktanssilla kestää haihtua oikosulun aikana.

T''_d = Oikosulkupiirin pitkittäinen alkutilan aikavakio, aika joka pitkittäisellä alkureaktanssilla kestää haihtua oikosulun aikana.

T'_{do} = Avoimen piirin pitkittäinen muutostilan aikavakio, aika joka pitkittäisellä muutosreaktanssilla kestää haihtua avoimesta piiristä.

T''_{do} = Avoimen piirin pitkittäinen alkutilan aikavakio, aika joka pitkittäisellä alkureaktanssilla kestää haihtua avoimesta piiristä.

T'_q = Oikosulkupiirin poikittainen muutostilan aikavakio, aika joka poikittaisella

muutosreaktanssilla kestää haihtua oikosulun aikana.

T''_q = Oikosulkupiirin poikittainen alkutilan aikavakio, aika joka poikittaisella alkureaktanssilla kestää haihtua oikosulun aikana.

T'_{qo} = Avoimen piirin poikittainen muutostilan aikavakio, aika joka poikittaisella muutosreaktanssilla kestää haihtua avoimesta piiristä.

T''_{qo} = Avoimen piirin poikittainen alkutilan aikavakio, aika joka poikittaisella alkureaktanssilla kestää haihtua avoimesta piiristä.

Ta = Staattorikäänin oikosulkuaikavakio, tasavirtakomponentin vaimenemisaikavakio.

SCR = Oikosulkusuhte, määrittelee generaattorin stabilisuutta ja on suhde nimellisjännitteen tuottamiseen vaaditusta kenttävirrasta avoimessa piirissä suhteessa nimellisvirran tuottamiseen vaaditusta kenttävirrasta oikosulkupiirisää.

5 Generaattorin suojaus

Generaattori kannattaa suojata hyvin, koska se on yksi sähköverkon tärkeimmistä ja kalleimmista komponenteista, ja sillä on kohtuullisen pitkä toimitusaika johtuen suuresta käsityöosuudesta (VEO Academy, 2013, s. 2).

Generaattori tulee suojata sekä sisäisiltä, että ulkoisilta häiriöiltä ja laukaista mahdollisimman nopeasti vaurioiden minimoimiseksi. Sähköisten ja termisten rasitusten lisäksi se pyörivänä laitteena joutuu monille mekaanisille rasituksille alttiiksi, joten suojauksessa tulee ottaa huomioon monenlaisten häiriöiden ja vikojen syntymistavat. Vian sattuessa ei pelkkä katkaisijan avaaminen riitä, vaan turbiini on pysäytettävä, magnetointi poistettava ja mahdollisesti päästettävä sammutuskaasua generaattoriin. Vika pyritään havaitsemaan mahdollisimman pienellä tehotasolla, jotta suojaus toimisi mahdollisimman nopeasti ja täten voidaan välttyä aikaa vieviltä korjauksilta. (Mörsky, 1992, s. 141).

Pääosa generaattorin suojista perustuu sähköisten suureiden mittaukseen, jotka voidaan karkeasti jakaa virtasuojiin, jännite-/taajuussuojiiin ja impedanssi/tehosuojiiin, jotka mittaavat sekä virtaa, että jännitettä (VEO Academy, 2013, s. 2). Lämpötila on myös tärkeä suure kuvaamaan kuormitustilaa. Muita seurattavia suureita voi olla värinä, eristysvastus, valokaari yms. Apujärjestelmien valvonta kuten paine, virtaus, pinta, lämpötila yms. on myös osa generaattorisuojausta. (VEO Academy, 2013, s. 2).

Suojauksen toteuttamiseen ei ole olemassa yleispäteviä ohjeita, vaan ne tulee määrittää tapauskohtaisesti. Suojien asetusarvot riippuvat suuresti laitoksen koosta ja käyttötavasta. Suojalaitteiden tarpeeton toiminta halutaan estää sen ollessa verkon stabiilisuudelle, taloudellisuudelle ja sähkön laadulle haitallista. (VEO Academy, 2013, s. 3). Pienet generaattorit ja epätahtikoneet halutaan vian sattuessa irrottaa verkosta mahdollisimman nopeasti, jotta verkon jälleenkytkennät onnistuvat ja vian kesto sekä laajuus jää mahdollisimman pieneksi. Suuret sekä saarekekäyttökelpoiset generaattorit pyritään pitämään verkossa mahdollisimman kauan kantaverkon tukemiseksi. (VEO Academy, 2013, s. 3).

5.1 Selektiivisyys

Selektiivisyys tarkoittaa suojauksen kykyä erottaa ainoastaan viallinen osa verkosta, ja sitä, että kaikki verkon osat ovat tarvittavalla tavalla suojattuja (Tiesmäki, 2006, s. 26). Vian sattuessa suojauksen tulisi avata ainoastaan se katkaisija tai ne katkaisijat, joidenka avaaminen on tarpeellista vian eristämiseen (Alstom, 2011, s. 12).

Releet voivat suojata tiettyä komponenttia tai tiettyä aluetta. Releelle on asetettu alue, jota se ensisijaisesti suojaa, mutta suojaus ylettyy myös alueen ulkopuolelle. Suojaus on täysin aukotonta silloin, kun vierekkäiset suojat ylettyvät toistensa alueille.

Absoluuttisessa selektiivisydessä suojan tulee toimia vain vioista, jotka ovat sen alueella, ja jättää huomioimatta ulkopuoliset viat. (Mörsky, 1992, s. 15-16). Suoja voidaan myös aikaviiveellä asettaa toimimaan viereisen alueen varasuojana, jos sen alueen suoja ei toimi (Alstom, 2011, s. 12). Selektiivisyys voidaan saavuttaa neljällä eri menetelmällä, nämä ovat funktioselektiivisyys, aikaselektiivisyys, suuntaselektiivisyys ja absoluuttinen selektiivisyys (Öhlen, 2003, s. 364).

Funktioselektiivisyys perustuu suojausfunktioiden asetteluarvoihin, suojaus voidaan asettaa virtaselektiiviseksi tai impedansselektiiviseksi. Funktioselektiivisyyttä käytetään nopeuttamaan suojan toimintaa vian sattuessa suojan lähellä. Suojana käytetään ylivirta- tai ali-impedanssisuojaa, joka voi olla suunnattu tai suuntaamaton. Ylivirtasuojaa käyttäessä ylivirran asetusarvo laitetaan niin korkeaksi, että suoja ei havahdu vian sattuessa seuraavan suojan edessä. Ali-impedanssin asetusarvo tulee vastaavasti olla niin pieni, että saavutetaan sama toiminta. Funktioselektiivisyydellä ei saada täysin aukotonta suojausta, joten sen rinnalle laitetaan myös aikaselektiivinen suojaus. (ABB, 2000, Luku 7 s. 31).

Aikaselektiivisyys perustuu suojausfunktioiden toiminta-aikojen asetteluihin. Suojausten toiminta-ajat porrastetaan niin, että aina lähimpänä vikaa oleva suoja laukaisee ensimmäisenä. Suojaukseen käytetään ylivirtareleitä. Aikaselektiivisyys sopii parhaiten säteittäisverkkoihin. (ABB, 2000, Luku 7 s. 21).

Suuntaselektiivisyys perustuu suojiin, jotka voivat havaita vian suunnan. Suojausten periaate on sama kuin aikaselektiivisellä mutta suojina käytetään suunnattuja ylivirtasuojia. Käytetään rengas- ja silmukkaverkoissa, ja suuntaus on tarpeellinen, koska suojan eri puolilla vaaditaan eri toiminta-aikoja. (ABB, 2000, Luku 7 s. 28).

Absoluuttinen selektiivisyys perustuu suojan kykyyn havaita viat ainoastaan suojattavassa kohteessa. Toteutetaan usein differentiaalireleellä, joka mittaa virtaa kahdesta pisteestä ja näiden pisteiden välissä on releen suojausalue. Esimerkiksi generaattorin absoluuttinen selektiivisyys toteutetaan differentiaalisuojalla ja se on täten 100 % selektiivinen. (Öhlen, 2003, s. 364).

5.2 Varasuojaus

Suojauksessa on aina varauduttava varasuojalla siltä varalta, että pääsuojaus ei jostain syystä toimi. Varasuojaus voidaan toteuttaa kahdella tavalla, nämä ovat paikallinen varasuojaus ja etävarasuojaus. Paikallisessa varasuojauksessa pääsuoja ja varasuoja ovat rinnan ja ohjaavat samaa katkaisijaa, ne huomaavat vian yhtä aikaa mutta varasuojauksella on viive, joka antaa pääsuojalle mahdollisuuden toimia ensimmäisenä. Etävarasuojauksessa varasuoja ohjaa eri katkaisijaa kuin pääsuoja ja vika huomataan etäämmällä. (Öhlen, 2003, s. 368).

Generaattoreiden varasuojaus toteutetaan yleensä paikallisella varasuojauksella. Varasuojauksen laajuus riippuu generaattorin koosta, statkraftilla on seuraavat generaattorin koon mukaiset vaatimukset varasuojaukselle. Suojausryhmät ovat pääsuojausryhmä A ja varasuojausryhmä B. (Statkraft, 2014, s. 5).

Generaattori alle 25MVA.

Oikosulku ja maasulkusuojat, paitsi roottorin maasulku, ovat käytössä molemmissa suojausryhmissä. Muut suojat saa vapaasti asettaa haluamaansa ryhmään. (Statkraft, 2014, s. 5).

Generaattori 25MVA ja suuremmat.

Kaikki suojausfunktiot otetaan käyttöön molemmissa ryhmissä, paitsi semmoiset suojat, jotka alun perin ovat varasuojina. Mielellään tulisi käyttää eri mittamuuntajia eri ryhmille, mutta tämä ei ole pakollista. (Statkraft, 2014, s. 5).

Liitteessä 4 on esimerkit suojausfunktioiden jaosta <25MVA ja <150MVA generaattoreissa.

5.3 Suojaustarpeet

Suojausta suunniteltaessa tulee aloittaa selvittämällä mitä häiriöitä generaattoriin kohdistuu ja mitkä suojaustarpeet ovat. Suojauslaitteiden laajuutta ja varmistusta on aina harkittava tapauskohtaisesti. Suojaustason valitsemiseen vaikuttaa koneelle aiheutuvan riskin suuruuden lisäksi myös laitoksen koko ja mahdollisen keskeytysvahingon seurausten merkitys. Liiallinen suojauslaitteiden käyttö aiheuttaa turhia kustannuksia ja voi myös lisätä häiriölähteitä. (Mörsky, 1992, s. 141-142). Seuraavien vikatilanteiden esiintyminen on mahdollista ja niihin tulee suojauksessa varautua:

- staattorin ylivirta
- staattorin ulkopuolinen oikosulku
- staattorin käämisulku
- staattorin kierrossulku
- staattorin maasulku
- staattorin ylijännite
- roottorin ylivirta
- roottorin kierrossulku
- roottorin maasulku
- roottorin ylijännite
- yllämpötila
- epäsymmetrinen kuorma
- alimagnetointi
- epätahtikäyttö
- taajuuspoikkeama
- laakerivirta
- takateho
- ryntäys
- magnetointijärjestelmän toimintahäiriöt
- jäähdytysjärjestelmän toimintahäiriöt
- tulipalo (Mörsky, 1992, s. 141-142).

Koska suojaukseen ei ole olemassa yleispäteviä ohjeita, olen vertaillut Siprotecin, Statkraftin, Indarin sekä ABB:n esittelemiä ehdotuksia ja vaatimuksia generaattorin suojaukselle. Liitteessä 5, 6 ja 7 sekä taulukossa 2 on esitetty erikseen jokaisen edellä mainitun asettamat vaatimukset.

5.3.1 Statkraftin suojausvaatimukset

Statkraft on norjan valtion omistama energiatuotantoyhtiö. Suomessa ei generaattorin relesuojaukselle ole määritettyjä vaatimuksia mutta statkraftilla on norjan laitoksille määritetyt vaatimukset, joita voi käyttää suuntaa antavina myös Suomeen. Norja kuuluu maailman eniten vesivoimalla sähköä tuottaviin maihin joten suuri osa vesivoimalaitoksista rakennetaan norjaan ja näin ollen myös norjan vaatimukset tulee olla tiedossa.

Erovirtasuoja

Kaikki generaattorit tulee olla varustettu erovirtasuojalla, 25MVA ja sitä suuremmissa koneissa pitää käyttää omaa generaattorin erovirtasuojaa, koska sillä saadaan paras herkkyys. (Statkraft, 2014, s. 5).

Staattorin maasulku

Generaattori tulee olla varustettu staattorin maasulkusuojalla. Suojan tulee reagoida vikajännitteeseen viiden prosentin tarkkuudella nimellisjännitteestä. Suojan ei tule laueta ulkoisista vioista. Jännitteen mittausta tulee tapahtua jännitemuuntajaan kytketyn generaattorin nolllapisteestä. Jos nolllapiste on eristetty, suoritetaan mittausta vaihejännitteestä ja lasketaan siitä vikajännite, mahdollisesti mittausta generaattorilähdön avoimesta deltakäämistä. Mieluiten vikajännitteen havainnointi tulisi tapahtua sekä nolllapisteessä, että lähdöstä.

150MVA ja sitä suuremmissa generaattoreissa tulee lisäksi käyttää staattorin 100% maasulkusuojaa, joka perustuu aliharmoniseen taajuuden syöttöön. Suojassa tulee olla kaksi tasoa. Koneen ollessa pysähdyksissä syöttöyksikön tulee olla inaktiivinen, ja kytkeytyä päälle samana hetkenä, kun käynnistyskäsky annetaan. Pysähdyksissä syöttöyksikkö voidaan kytkeä päälle vianmäärityksen ajaksi. (Statkraft, 2014, s. 6).

Roottorin maasulku

Generaattori tulee olla varustettu roottorin maasulkusuojalla. Suoja kytketään mahdollisen DC-kenttäkatkaisijan roottoripuolelle. Koneen ollessa pysähdyksissä syöttöyksikön tulee olla inaktiivinen, ja kytkeytyä päälle samana hetkenä, kun käynnistyskäsky annetaan. Suojausfunktion tulee olla blokattu kunnes käynnistysmagnetointi kytketään pois. Pysähdyksissä syöttöyksikkö voidaan kytkeä päälle, ja suojausfunktio aktivoida, vianmäärityksen ajaksi.

Generaattorit $< 25MVA$

Tulee käyttää roottorin maasulkusuojaa, joka perustuu nimellistajuisen jännitteen syöttöön. Suojan tulee mitata virtaa ja jännitettä. Suojassa tulee olla kaksi tasoa.

Generaattorit $25 - 150MVA$

Tulee käyttää roottorin maasulkusuojaa, joka perustuu nimellistajuisen jännitteen syöttöön. Suojan tulee mitata virtaa ja jännitettä. Suojassa tulee olla kaksi tasoa.

Generaattori $\geq 150MVA$

Tulee käyttää roottorin maasulkusuojaa, joka perustuu nimellistajuudesta eroavan taajuuden syöttöön. Suojassa tulee olla kaksi tasoa. (Statkraft, 2014, s. 6).

Ylivirta/Alijännite(51V Jännitesäädetty ja ohjattu ylivirtasuojaja)

Generaattori tulee olla varustettu jännitesäädetyllä ylivirtasuojalla. Suojan tulee olla selektiivinen yläpuolella olevien verkkojen suojiin. (Statkraft, 2014, s. 6).

Ylijännite

Generaattori tulee olla varustettu ylijännitesuojalla, jossa on kaksi tasoa. Molemmissa tasoissa tulee olla viiveaika mahdollisuus. (Statkraft, 2014, s. 6).

Taajuus

Generaattori tulee olla varustettu taajuussuojalla. Suojassa tulee olla kaksi ylitaajuustasoa ja kaksi alitaajuustasoa. Kaikissa tasoissa tulee olla viiveaika mahdollisuus. (Statkraft, 2014, s. 6).

Alimagnetointi

Generaattori tulee olla varustettu alimagnetointisuojalla. Suojan tulee perustua impedanssimittaukseen tai admittanssimittaukseen. Suojassa tulee olla kaksi tasoa. (Statkraft, 2014, s. 6).

Epätahti

Epätahtisuojaa tulee käyttää 150MVA ja sitä suuremmissa generaattoreissa. (Statkraft, 2014, s. 7).

Vinokuormitus

Generaattori tulee olla varustettu vinokuormasuojalla. Suojassa tulee olla käänteisaikatoiminto, jonka voi mukauttaa generaattorin ominaisuuksiin. (Statkraft, 2014, s. 7).

Impedanssi

150MVA generaattorit ja sitä suuremmat tulee olla varustettu impedanssisuojalla. Suojassa tulee olla kaksi vyöhykettä/tasoa, jotka molemmat voidaan viivyttää. Generaattorit, jotka on kytketty yhteiseen kiskostoon tai suoraan kytketty verkkoon, ilman muuntajaa, tulee myös varustaa impedanssisuojalla. (Statkraft, 2014, s. 7).

Tahaton virroitus

150MVA generaattoreissa ja sitä suuremmissa tulee olla suojausfunktio, joka havaitsee katkaisijan haluamattoman kytkennän (esim. Inadvertant Energizing, Accidental Energizing tai Dead Bus). (Statkraft, 2014, s. 7).

Laakerivirta

Generaattorissa, jossa akselijännite on yli 1V, tulee käyttää laakerivirtasuojaa. Muita käytäntöjä laakerivirran havaitsemiseen voidaan myös käyttää, mutta ne tulee hyväksyä etukäteen. (Statkraft, 2014, s. 7).

Alijännite

Alijännitesuojaa on käytettävä pumppulaitoksissa ja koneissa, jotka eivät ole transientisti vakaita. (Statkraft, 2014, s. 7).

Takateho

Takatehosuojaa on käytettävä koneissa, joissa on Kaplan-, putki- tai matalapaine Francis-turbiini. (Statkraft, 2014, s. 7).

Taulukko 2: Statkraft suojausvaatimukset

Suojausfunktio
Differensialvern
Statorjordfeilvern
Rotorjordfeilvern
Overström-/Underspenningsvern
Overspenningsvern
Frekvensvern
Min reaktans(Undermagnetiseringsvern)
Tap av synkronisme
Skjevlastervern
Underimpedansvern
Uonsket innkobling
Lagerstromvern
Underspenningsvern
Retureffektvern

(Statkraft, 2014, s. 5-7)

Liitteissä 5-7 ja taulukossa 2 ehdotetuista ja vaadituista suojaustarpeista on taulukkoon 3 koottu tarvittavat suojausfunktiot sekä esitetty, mitkä funktioit löytyvät mistä releestä. Seuraavassa kappaleessa näiden funktioiden toiminta ja asetukset on selitetty.

Taulukko 3: Eri releissä olevat suojausfunktiot

Suojausfunktio	ANSI	IEC	VAMP 210	VAMP 265	REG 650	MC0A
Nollajännite	59N	$U_0 >$	✘		✘	
Nollavirta	50N/51N, 51N 67N	$I_0 >$	✘		✘	
Suunnattu maasulku	67N	$I_{0\phi} >$	✘		✘	
Staattorin 100% maasulku	64F3, 59THD	$U_{0f3} <$	✘		✘	
Staattorin ylikuorma	49	$T >$	✘		✘	
Roottorin maasulku	64R		✘		✘	
Ylivirta	51/50, 51/67	$I >$	✘		✘	
Ali-impedanssi	21, 21G	$Z <$	✘		✘	
Differentiaali	87, 87G	$\Delta I >$		✘	✘	
Vinokuormitus	46, 46I2	$I_2 >$	✘		✘	
Alimagnetointi	40	$Q <$	✘		✘	
Ylimagnetointi	24	$U_f <$	✘		✘	
Alijännite	27	$U <$	✘		✘	
Ylijännite	59	$U >$	✘		✘	
Taajuus	81H/81L, 81	$f < f >$	✘		✘	
Takateho	32	$P <$	✘		✘	
Tahaton verkkoonkytkentä	50AE	$U < I >$			✘	
Taajuuden muutosnopeus	81R, 81	df/dt	✘		✘	
Laakerivirta	F50N/51N					✘
Epätahti	78	$\phi <$			✘	

5.4 Relesuojausfunktiot

Taulukosta 3 nähdään, että vesivoimalaitokseen suositellaan käytettäväksi useaa suojausfunktiota. Tässä kappaleessa kaikkien taulukossa 3 olevien suojausfunktioiden toiminta käydään läpi yleisellä tasolla sekä miten ne toimivat VAMP- ja ABB-generaattorirelesuojissa. Olen valinnut VAMP- ja ABB-generaattorisuojat, koska nämä ovat yleisimmät Suomen ja Norjan vesivoimalaitoksissa käytettävät suojareleet.

5.4.1 Staattorin maasulku

Staattorin maasulkusuojaus voi toteuttaa usealla tavalla. Yleisimmät tavat ovat tähtipisteen ja maan välisen jännitteen tarkkailu, generaattorin liittimien jännitteen symmetrisyys ja vaihevirtojen symmetrisyys. (Elovaara & Laiho, 2008, s. 398). Suojaus toteutetaan eri tavalla riippuen generaattorin koosta, tähtipisteen maadoitustavasta ja järjestelmän ulkonäöstä (Strömberg, 1982, s. 10).

95% staattorin maasulkusuojaus toteutetaan seuraavilla menetelmillä. Blokkimuuntajalla varustetun generaattorin maasulkusuojaus toteutetaan joko avokolmion jännitereleellä tai tähtipisteen ja maan välisen jännitemuuntajan ja jännitereleen avulla. (Mörsky, 1992, s. 150). Rinnakkaisten generaattoreiden syöttäessä samaa kiskostoa ilman blokkimuuntajia, ei edellä mainituilla tavoilla saada selektiivisyyttä, koska silloin nollajännite on sama koko systeemissä. Suojaus on silloin toteutettava maasulkuvirran mittauksena.

Maasulkuvirta on usein niin pieni, että sitä pitää keinotekoisesti suurentaa. Jos suurenus tehdään verkon puolella, voidaan suojaus toteuttaa ylivirtareleellä, joka mittaa nollavirtaa. (Turbiinilaitosten turvallisuuskomitea, 1989, s. 36). Virran mittausta voidaan toteuttaa virtamuuntajien toisiovirtojen summauksena, jolloin ainostaan viallisen staattorin releessä esiintyy summavirtaa, tai kaapelivirtamuuntajalla jolloin käytetään suunnattua maasulkurelettä (Mörsky, 1992, s. 151).

Nämä menetelmät suojaavat 90-95 % staattorin käämityksestä, eli 5-10 % staattorikäämityksistä tähtipisteen puolella jää suojaamatta. Maasulut tähtipisteen lähellä ovat harvinaisia, mutta niiden havaitseminen on tärkeää, koska toisen maasulun sattuessa syntyy oikosulku, joka aiheuttaa suuria virtoja. Varsinkin tärkeät ja suuret generaattorit suojataan 100% staattorin maasulkusuojalla. (Mörsky, 1992, s. 152).

100% staattorin maasulkusuoja voidaan toteuttaa muutamalla eri tavalla. Blokkikytketyssä generaattorissa voidaan jännitemuuntajan avulla antaa generaattorin tähtipisteeseen pieni jännite maata vastaan. Jännitemuuntajan kanssa sarjaan kytketään virtaa rajoittava vastus ja maasulkua tarkkaileva virtarele. (Mörsky, 1992, s. 152). Muissa tapauksissa voidaan maadoitusmuuntajan toisiosuon avokolmioon syöttää pienitaajuinen jännite, $12,5-20\text{Hz} \approx 1\%U_n$, joka aiheuttaa mitättömän pienen virran. Tämän virran suurentuessa on staattorissa tai siihen kytketyssä virtapiirissä sattunut maasulku. Tässä tapauksessa tähtipisteen tulee olla maasta erotettu. (Mörsky, 1992, s. 152). Toinen tapa on mitata generaattorin aiheuttamaa kolmatta yliaaltoa. Jännitemuuntajan avokolmioon kytketään 150Hz jännitteelle asetettu rele. Kun tähtipisteessä tai sen lähellä syntyy maasulku, syntyy myös 150Hz virralle virtapiiri, jonka rele huomaa. Kolmatta yliaaltoa voi myös mitata generaattorin tähtipisteen ja maan välisessä vastuksessa. Normaalitylanteessa vastuksen läpi kulkee

kolmannen yliaallon tuottama virta. Jos tämä virtaa haihtuu generaattorin ollessa käynnissä, on tähtipisteessä tai sen lähellä sattunut maasulku. (Mörsky, 1992, s. 153). Seuraavaksi on esitelty VAMP 210 ja REG 650 releissä olevat staattorin maasulkusuo-
jat, näitä ei tule käyttää kaikkia yhtä aikaa vaan suojaksi valitaan se, joka vastaa verkon vaatimuksia.

VAMP 210

Nollajännitesuoja 59N (VAMP, 2011a, s. 102-104).

Englanninkielinen nimitys: Zero sequence voltage protection.

Suoja mittaa nollakomponentin jännitettä.

Nollakomponentin mittaus voidaan toteuttaa kolmella tavalla.

- Avokolmio jännitemuuntajasta
- Tähtipisteen ja maan välisestä jännitemuuntajasta
- Laskea mitatuista vaihe-maa jännitteistä

Suojassa on kaksi tasoa, joissa molemmissa on vakioaikaviive.

Käyttäjät asettaa parametrit:

Nollajänniteraja prosentteina vaihejännitteestä	$U_{0>}, U_{0\gg}$
Aikaviive sekunteina	$t>, t\gg$

Nollavirtasuojat 50N/51N (VAMP, 2011a, s. 74-79).

Englanninkielinen nimitys: Earth fault protection.

Suojan toiminta perustuu kolmivaiheiseen vikavirtaan.

Suojassa on neljä erillistä nollavirta tasoa. Jokainen taso voidaan asettaa valvomaan releen signaalituloja I_{01} ja I_{02} ja laskettua signaalia I_{0Calc} , joka on $I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}$.

Lisäksi ensimmäisessä tasossa on kaksi lisävalintaa I_{01Peak} ja I_{02Peak} . Nämä mittaavat tulojen I_{01} ja I_{02} huippuarvoja, joiden avulla valvotaan jaksoittain iskeviä maasulkuja. Jaksottaisessa suojassa ei vian tarvitse kestää koko aikaviiveen aikaa. Kun suoja tunnistaa nopean maasulun se käynnistyy, jos asetetun jaksoajan aikana sattuu uusi nopea maasulku, niin suoja ei nollaannu vaan lopuksi se laukaisee. Kaikissa tasoissa on vakioaikaviive ja ensimmäisessä on myös käänteisaikaviive mahdollisuus.

Käyttäjät asettaa parametrit:

Tarkkailtava arvo	$I_{01}, I_{02}, I_{0Calc}, I_{01Peak}, I_{02Peak}$
Nollavirran raja	$I_{0>}, I_{0\gg}, I_{0\gg\gg}, I_{0\gg\gg\gg}$
Aikaviive sekunteina	$t>$

Tason yksi lisävalinnat:

Käänteisaikakäyrä	DT, IEC, IEEE, IEEE2, RI, PrgN
Käänteisaikatyyppi	DT, NI, VI, EI, LTI, Parameters
Käänteisaikakerroin	$k>$
Jaksoaika sekunteina	Intrmt

Suunnattu maasulku 67N (VAMP, 2011a, s. 79-85).

Englanninkielinen nimitys: Directional earth fault protection.

Suoja huomioi vikavirran ja nollajännitteen sekä niiden välisen kulman. Negatiivista nollakomponentin jännitettä käytetään vikavirran viitekulmana. Jännite voidaan mitata nollakomponentin tulosta tai laskea vaihejännitteistä. Suojassa on kolme eri suojaustilaa riippuen verkon ulkonäöstä, ResCap, Sector ja Undir.

– Rescap

ResCap muodostuu kahdesta osasta, Res ja Cap.

Res huomioi vikavirran resistiivisen komponentin ja sitä käytetään kompensoituissa ja suurella vastuksella maadoitetuissa verkoissa.

Cap huomioi vikavirran kapasitiivisen komponentin ja sitä käytetään maadoittamattomissa verkoissa.

– Sector

Käytetään pienellä vastuksella maadoitetuissa verkoissa. Pieni vastus tarkoittaa tässä tapauksessa, että vikavirta voi olla suurempi kuin mitoitettu vaihevirta.

– Undir

Huomioi ainoastaan vikavirran, sama toiminta kuin nollavirtasuojalla.

Suojassa on kaksi tasoa, molemmissa voi käyttää joko vakioaikaviivettä tai käänteisaikaviivettä. Suojassa on valittavissa tarkkailtavaksi samat signaalitulot ja sysäysvirrat kuin nollavirtasuojassa, ja sama toiminta jaksottaisten maasulkujen havaitsemiseen.

Käyttäjä asettaa paramterit:

Vikavirran raja per unit arvona CT:n arvosta	IoRes, IoCap, $Io\phi >$, $Io\phi \gg$
Jännitteen raja arvo prosentteina	$U_o >$

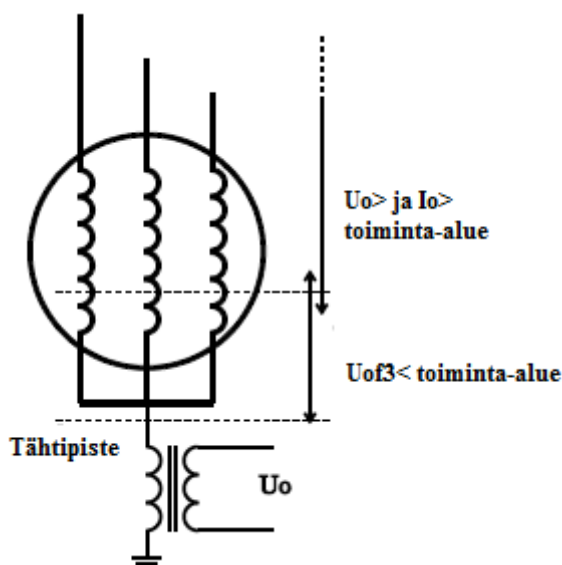
Käänteisaika- ja jaksoitusasetukset kuten nollavirtasuojassa.

100% Staattorin maasulku 64F3 (VAMP, 2011a, s. 105-108).

Englanninkielinen nimitys: 100% stator earth fault protection.

Suoja mittaa kolmannen yliaallon jännitettä tähtipisteessä. Jos tähtipisteen lähellä on maasulku, kolmannen yliaallon jännite putoaa asetusarvon alle.

Oikean asetusarvon löytäminen voi olla hankalaa, koska tähtipisteen kolmanteen yliaaltoon vaikuttaa moni tekijä. Näitä ovat generaattorin rakenne, kuormitus, tehokerroin, magnetointi, maadoituspiiri ja muuntajat. Oikean asetusarvon löytämiseksi releellä voidaan suorittaa mittauksia eri tilanteiden kolmannen yliaallon arvoista, normaalisti generaattorin pienin tuottama kolmas yliaalto esiintyy kuorman ollessa pieni ja magnetoinnin hidasa. Asetusarvon tulee olla tätä arvoa pienempi.



Kuva 16: Maasulkusuojien toiminta-alueet (VAMP, 2011a, s. 105).

Jotta saadaan 100% maasulkusuojaus tulee suoja yhdistää tavallisen maasulkusuojan kanssa. Tavallinen maasulkusuoja, joka on suurin piirtein 95% suoja, suojaa aluetta, joka alkaa HV puolella ja ylettyy kuten kuvasta 16 nähdään melkein staattorin käämityksien yli mutta ei ihan kokonaan. 64F3 suoja sen sijaan alkaa LV puolelta ja ylettyy 10-30 % käämien yli. Eli kuten kuvasta nähdään nämä kaksi suojaa ylettyvät hieman päällekkäin ja täten on 100% suoja toteutettu.

Käyttäjää asettaa parametrit:

Kolmannen yliaallon jännitteen raja prosentteina nollajännitteestä	$U_{0f3} <$
Aikaviive minuutteina	$t <$

REG 650

Nollajännitesuoja 59N (ABB, 2011, s. 230-236).

Englanninkielinen nimitys: Two step residual overvoltage protection.

Suoja laskee vikajännitteen kolmivaihe jännitemuuntajasta tai mittaa sen avokolmion syöttämästä yksivaiheisesta jännitemuuntajasta tai tähtipisteen jännitemuuntajasta. Suojassa on kaksi tasoa, joissa molemmissa on vakioaikaviive mahdollisuus ja ensimmäisessä on myös käänteisaikamahdollisuus.

Käyttäjällä asetetaan parametrit:

Nollajänniteraja prosentteina perusarvosta	U1>, U2>
Ensimmäisen tason aikaviiveen tyyppi	Characterist1
Aikaviive sekunteina	t1, t2
Minimi käänteisaikaviive sekunteina	tMin
Käänteisaikakerroin	k1

Nollavirtasuojat 51N/67N (ABB, 2011, s. 152-165).

Englanninkielinen nimitys: Four step residual overcurrent protection.

Suoja huomioi kolmivaiheisen vikavirran. Vikavirta voidaan mitata suoraan tai laskea vaihevirroista. Suoja voidaan halutessa asettaa suunnatuksi maasulkusuojaksi. Suojassa on neljä vikavirtatasoa, joista ensimmäisessä ja neljännessä on sekä vakioaika, että käänteisaikaviive mahdollisuus, toisessa ja kolmannessa on vain vakioaikaviive.

Käyttäjällä asetetaan parametrit (ilman suuntausta):

Suuntaus Off	Dirmode1, 2, 3, 4
Vikavirran raja prosentteina perusarvosta	IN1>, 2>, 3>, 4>
Aikaviive sekunteina	t1, t2, t3, t4
Minimivirta tason toiminnalle prosentteina perusarvosta	IMin1, 2, 3, 4

Käänteisaikaasetukset kuten nollajännitesuojassa.

Suunnattu maasulku 67N (ABB, 2011, s. 165-176).

Englanninkielinen nimitys: Sensitive directional residual overcurrent and power protection

Suoja voidaan asettaa huomioimaan joko vikavirran tai vikatehon komponentin. Suojassa on lisäfunktiona käytettävissä yksi suuntaamaton vikavirtasuojaja ja yksi suuntaamaton ylijännitesuojaja.

Käyttäjällä asetetaan parametrit:

Suojan toimintatapa	OpMode
Suuntauksen toimintasuunta	DirMode
Suunnatun vikavirran "3IOCosPhi" raja prosentteina virran perusarvosta	INCosPhi>
Vikatehon käänteisaikalaskurin käynnistysraja prosentteina näennäistehon perusarvosta	SN>
Suunnatun vikavirran raja prosentteina virran perusarvosta	INDir>
Vakioaikaviive sekunteina	tDef
Vikatehon viitearvo prosentteina tehon perusarvosta	SRef
Aikakerroin suunnatulle vikatehotoiminnalle	kSN
Suuntaamattoman vikavirtasuojan toiminta	OpINNinDir>
Suuntaamattoman vikavirran raja arvo prosentteina virran perusarvosta	INNinDir>
Suuntaamattoman vikavirtasuojan aikaviive sekunteina	tINNnonDir
Suuntaamattoman ylijännitesuojan toiminta	OpUN>
Suuntaamattoman ylijännitteen raja prosentteina jännitteen perusarvosta	UN>
Suuntaamattoman ylijännitesuojan aikaviive sekunteina	tUN

Käänteisaikaasetukset kuten nolajännitesuojassa.

100% Staattorin maasulku 59TH (ABB, 2011, s. 246-254).

Englanninkielinen nimitys: 100% stator earth fault protection, 3rd harmonic based.

Suoja on 95% maasulkusuojan ja 100% maasulkusuojan yhdistelmä. Suoja huomioi nolajännitteen ja kolmannen yliaallon jännitteen.

Käyttäjällä asetetaan parametrit:

Tähtipisteen puoleisen kolmannen yliaallon jänniteraja prosentteina vaihejännitteestä	UN3rdH<
Napojen puoleisen kolmannen yliaallon minimiraja prosentteina vaihejännitteestä	UT3BlkLevel
Nolajännitteen raja prosentteina vaihejännitteestä	UNFund>
100% suojan aikaviive sekunteina	t3rdH
95% suojan aikaviive sekunteina	tUNFund

5.4.2 Staattorin ylikuorma

Staattorin ylikuormasuojalla suojataan staattorin käämitystä liialliselta lämpötilalta. Tahtikonetta ylikuormittaessa käämityksien lämpötila nousee, lämpötilan noustessa eristykset heikentyvät. Tämän seurauksena oikosulkujen ja maasulkujen riski kasvaa. (Strömberg, 1982, s. 6).

VAMP 210 (ANSI 49) (VAMP, 2011a, s. 70-73).

Englanninkielinen nimitys: Thermal overload protection.

Virran noustessa myös lämpötila nousee, lämpötilan laskentaan suoja käyttää vaihevirtoja ja lämpenemisaikavakiota. Suojan laukaisutaso määritellään suurimman sallitun jatkuvan virran I_{MAX} arvolla, joka vastaa sataprosenttista lämpötilan nousua, toisin sanoen generaattorin lämpökapasiteetilla. I_{MAX} saadaan kaavalla 5.1.

$$I_{MAX} = k \cdot k_{\Theta} \cdot I_{GN} \quad (5.1)$$

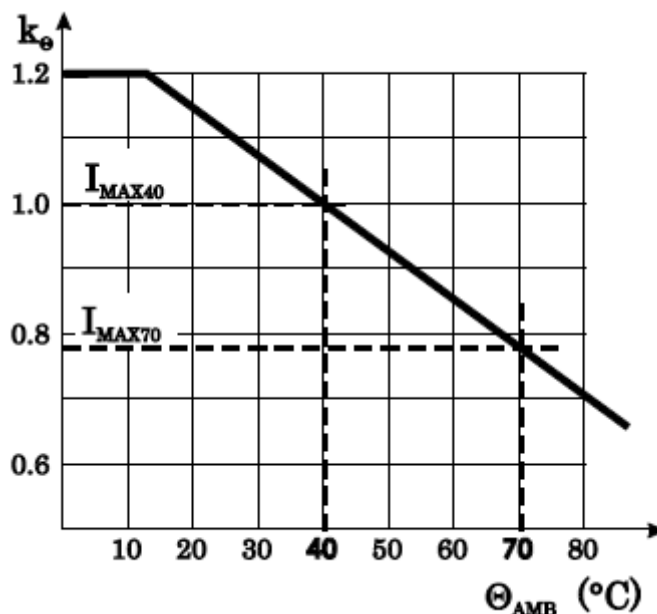
missä

k = Sallitun ylivirran kerroin

k_{Θ} = Ympäröivän lämpötilan kerroin

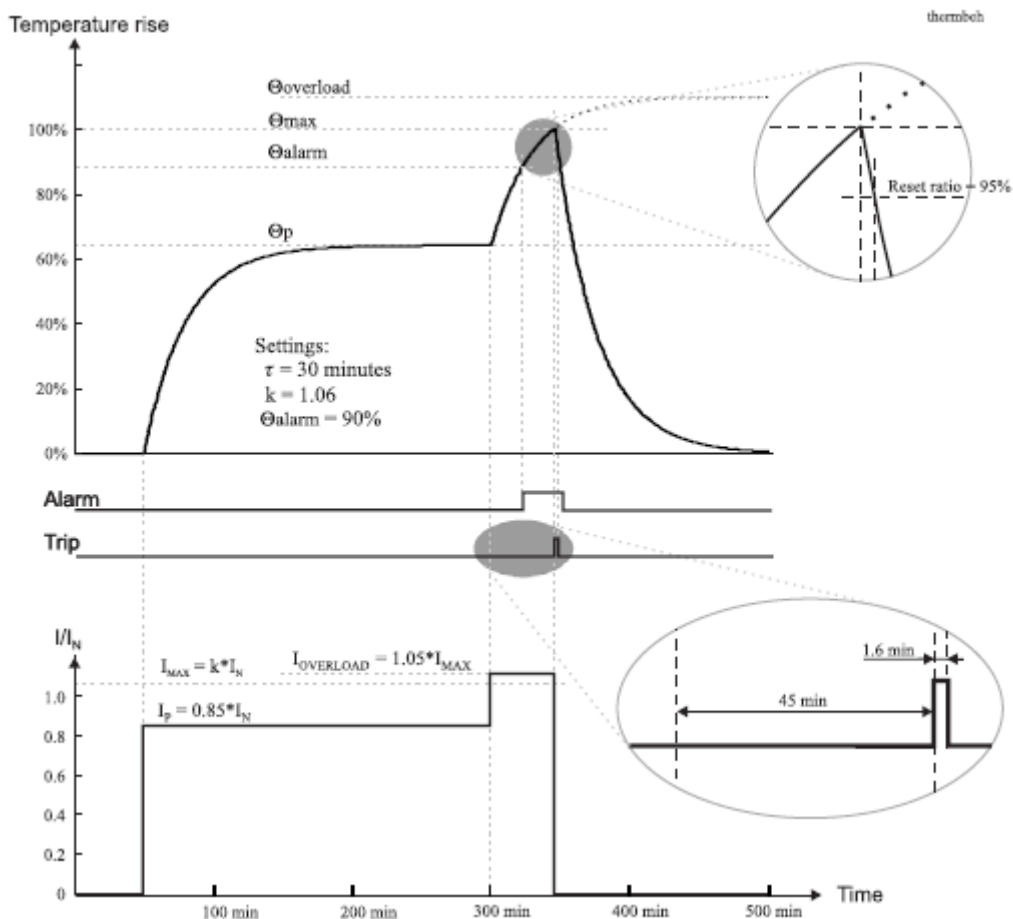
I_{GN} = Generaattorin nimellisvirta

Ympäröivän lämpötilan kerroin k_{Θ} saadaan kuvasta 17



Kuva 17: Ympäröivän lämpötilan korjauskerroin (VAMP, 2011a, s. 71).

Esimerkki tapauksessa kuvassa 18 ajassa 50min virta nousee $0,85 \times I_{GN}$ arvoon ja lämpötila lähtee nousemaan aikavakion mukaan. 300min kohdalla lämpötila on vakaa ja virta nostetaan $1,05 \times I_{MAX}$, josta lämpötila lähtee jälleen nousemaan ja 45min kuluttua lämpötila ylittää sallitun arvon ja suoja laukaisee.



Kuva 18: Esimerkki staattorin ylikuormasuojan toiminnasta (VAMP, 2011a, s. 72).

Käyttäjät asettaa parametrit:

Sallittu ylikuorma suhteessa nimellisvirtaan	$k >$
Hälytystaso prosentteina	Alarm
Lämpenemisaikavakio minuutteina	tau
Viilenemisaajan kerroin	ctau
Sallittu kuormitus prosentteina nimellisvirrasta ympäröivän lämpötilan ollessa +40°C	Imax40
Sallittu kuormitus prosentteina nimellisvirrasta ympäröivän lämpötilan ollessa +70°C	Imax70
Ympäröivä lämpötila °Casteissa	Tamb
Ympäröivän lämpötilan sensori	Samb

REG 650 (ANSI 49) (ABB, 2011, s. 176-183).

Englanninkielinen nimitys: Thermal overload protection, two time constants.

Suoja arvioi jatkuvasti generaattorin lämpötilaa. Lämpötilan arviointiin mitataan vaihevirrät sekä käytetään kahta lämpenemisaikavakiota. Yksi lämpenemisaikavakio on ilman jäähdystystä ja toinen on jäähdystyksellä, näin ollen myös virralle asetetaan kaksi perusarvoa, joista toinen on ilman jäähdystystä ja toinen on jäähdystyksellä.

Käyttäjä asettaa parametrit:

Virran viitearvo prosentteina perusarvosta	IRef
Virran perusarvo ilman jäähdystystä prosentteina perusarvosta	IBase1
Virran perusarvo jäähdystyksellä prosentteina perusarvosta	IBase2
Lämpenemisaikavakio ilman jäähdystystä	Tau1
Lämpenemisaikavakio jäähdystyksellä	Tau2
Virrät ja lämpenemisaikavakiot skaalataan IBase tasoille	IHigh/Low Tau1/2, Tau1/2High/Low
Vakaan tilan virran toimintaraja prosentteina perusarvoista	ITrip

5.4.3 Roottorin maasulku

Maasulku roottorissa ei aiheuta suurta riskiä koneelle eikä estä koneen normaalia käyttöä, mutta toisen samanaikaisen maasulun riski kasvaa merkittävästi. Kahden samanaikaisen maasulun aiheuttamat vauriot voivat olla todella suuret, ja tämän takia vika tulee havaita jo ensimmäisen maasulun sattuessa. (Mörsky, 1992, s. 157).

Yleisin tapa toteuttaa roottorin maasulkusuoja on kytkeä virransyöttöyksikkö roottorin ja maan väliin. Yksikkö syöttää pientä virtaa koko ajan, jota suoja mittaa. Maasulun sattuessa virta nousee ja suoja laukaisee. (Alstom, 2011, s. 311).

VAMP 210 (VAMP, 2011a, s. 235).

Englanninkielinen nimitys: Rotor earth fault protection.

Roottorin maasulkusuojaus voidaan toteuttaa suuntaamattoman maasulun (50N/51N), eli nollavirtasuojan, virtatulon I_{02} kautta, johonka yhdistetään virransyöttöyksikkö, esim. VEO-MSV.

Aseteltavat parametrit ovat nollavirtasuojan kappaleessa esitellyt parametrit I_{02} tasolle.

REG 650 (ABB, 2010, s. 1-2,11).

Englanninkielinen nimitys: Rotor earth fault protection

Suojaus toteutetaan käyttämällä virransyöttö yksikköä RXTTE4. Yksikkö kytketään roottoriin joko plus- tai miinusnavan ja maan väliin. Yksiköstä tuleva signaali kytketään releen herkkään virtatuloon. Suojausfunktiona voi käyttää joko suunnattua maasulkusuojaa tai nollavirtasuojaa. Aseteltavat parametrit ovat samat kuin suunnatun maasulkusuojan ja nollavirtasuojan kappaleissa.

5.4.4 Ylivirta

Ylivirtasuojasta käytetään oikosulkusuojana ja ylikuormitussuojana. Pienissä generaattoreissa ja kiskovioissa ylivirtasuojana on pääoikosulkusuojana, isoilla generaattoreilla se on differentiaalireleen varasuojana. (Mörsky, 1992, s. 145). Tässä tapauksessa pieneksi generaattoriksi lasketaan alle 1MVA. Ylivirtasuojauksia on kahden tapaisia, virran huomioivait ja jännitteen huomioivat. (Alstom, 2011, s. 300).

VAMP 210 (ANSI 50/51) (VAMP, 2011a, s. 53-57).

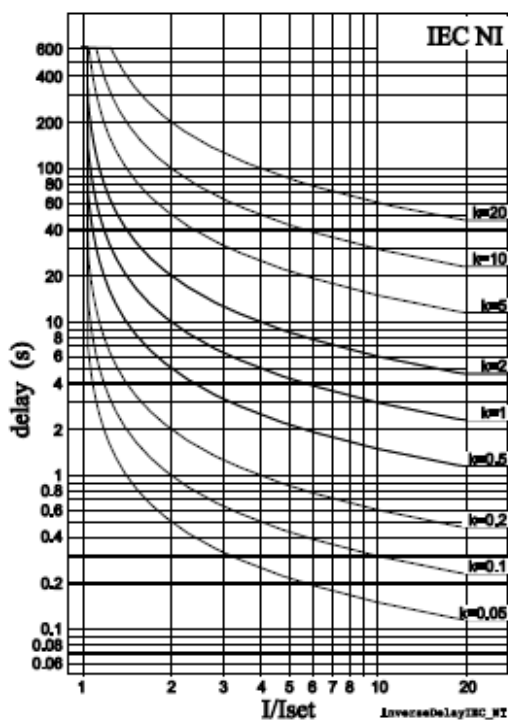
Englanninkielinen nimitys: Overcurrent protection

Suoja mittaa kaikki kolme vaihevirtaa ja huomioi näistä aina korkeimman.

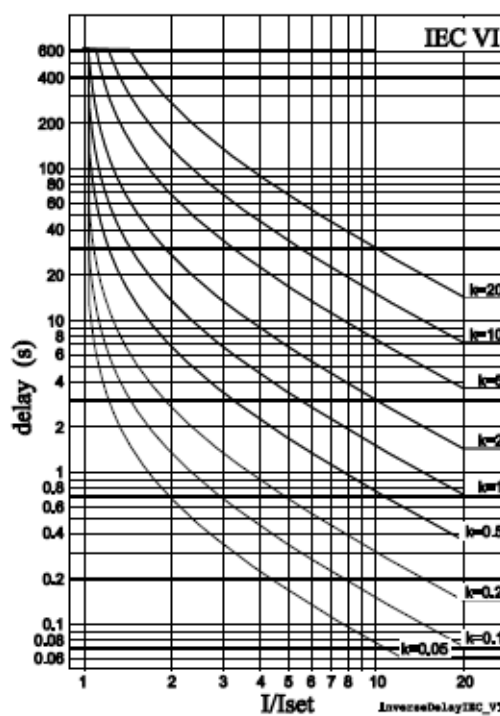
Suojassa on kolme erillistä ylivirta tasoa, joista ensimmäisessä tasossa ($I >$) voidaan valita toiminta joko vakioaikaisena tai käänteisaikaisena. Kaksi muuta tasoa ovat vain vakioaikatoimintaisia.

Käänteisaika tarkoittaa, että suojan laukaisuaika riippuu siitä kuinka paljon mitattu ylivirta ylittää asetusarvon. Mitä suurempi ylivirta sitä nopeampi toiminta suojalla on, verrattuna vakioaikasuojaan, joka odottaa aina asetetun aika-arvon ja laukaisee sen jälkeen.

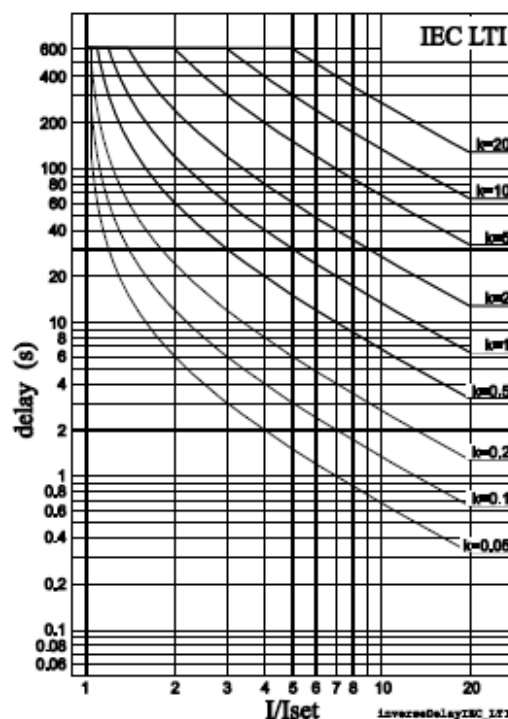
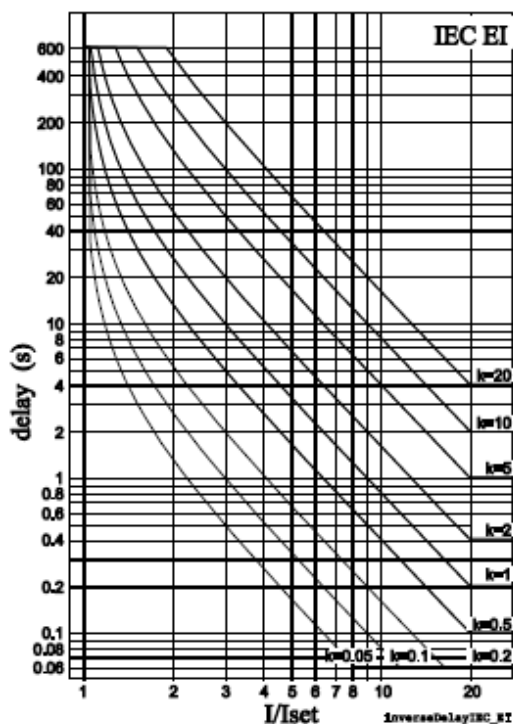
On mahdollista itse ohjelmoida käänteisaikakäyriä, tai käyttää suojassa valmiiksi olevia standardi käyriä. Standardikäyrät ovat jaettuna neljään kategoriaan, IEC, IEEE, IEEE2, RI. Niissä kaikissa on eri vaihtoehtoja valittavana, yhteensä 12 eri käyriä. Esimerkkinä kuvissa 19, 20, 21 ja 22 ovat kategoriassa IEC olevat käyrät, NI (normal inverse), VI (Very Inverse), EI (Extremely Inverse) ja LTI (Long Time Inverse).



Kuva 19: NI (VAMP, 2011a, s. 144).



Kuva 20: VI (VAMP, 2011a, s. 144).



Kuva 21: EI (VAMP, 2011a, s. 144).

Kuva 22: LTI (VAMP, 2011a, s. 144).

Käyttäjää asettaa parametrit:

Ylivirtaraja suhteessa nimellisvirtaan	$I>$, $I\gg$, $I\gg\gg$
Käyräkatteoria	(esim. DT, IEC, IEEE...)
Vakioaikaviive sekunteina	$t>$, $t\gg$, $t\gg\gg$

Ainoastaan käännteisaikakäyriä käyttäessä

Käännteisaikakerroin	$k>$
Käyrätyyppi	(esim. DT, NI, VI...)

REG 650 (ANSI 51/67) (ABB, 2011, s. 145-153).

Englanninkielinen nimitys: Four step phase overcurrent protection.

Suoja mittaa vaihevirtoja, mittaustavaksi voi valita joko DFT tai RMS. Jokaisen vaihevirran arvoa verrataan asetusarvoihin. Suojassa on neljä ylivirta tasoa, joista ensimmäinen ja viimeinen taso voidaan valita käännteis- tai vakioaikaiseksi, tasot kaksi ja kolme ovat aina vakioaikaisia. Suojan voi asettaa suunnatuksi tai suuntaamattomaksi. Kaikki ANSI ja IEC käännteisaikakäyrät ovat valittavissa suojaan, näitä on yhteensä 18 kappaletta.

Käyttäjää asettaa parametrit:

Suojan suuntauksen käyttö eri tasoilla	DirModel1, 2, 3, 4
Ylivirtaraja prosentteina perusarvosta	$I1>$, $I2>$, $I3>$, $I4>$
Tason yksi ja neljä aikaviivekäyrät	Characterist1, Characterist4
Aikaviive sekunteina	$t1$, $t2$, $t3$, $t4$ ($t1$ ja $t4$ jos vakioaikaviive)

Ainoastaan käännteisaikakäyriä käyttäessä:

Käännteisaikakerroin	$k1$, $k4$
Minimi toiminta-virta prosentteina perusarvosta	I_{min1} , I_{min4}
Käännteisaikakäyrien minimi toiminta-aika sekunteina	$t1Min$, $t4Min$

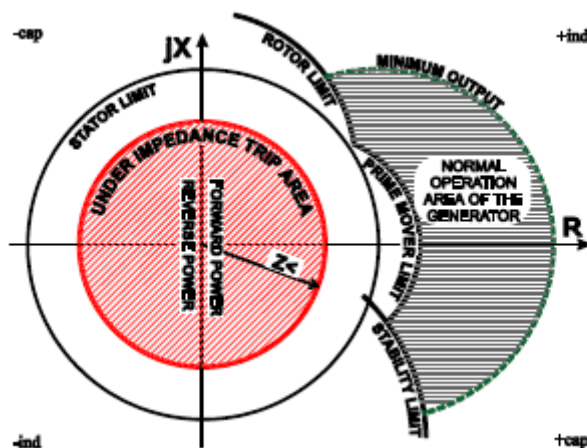
5.4.5 Ali-impedanssi

Ali-impedanssisuojaa käytetään varsinkin pienempien generaattoreiden oikosulkusuojana. Suojan käyttö on erityisen tarpeellinen tapauksissa, joissa oikosulkuvirta voi laskea nimellisen kuormitusvirran alle niin nopeasti, että perinteinen ylivirtasuojaus ei ehdi havaitsemaan sitä. (Öhlen, 2003, s. 379). Impedanssin mittausta suoritetaan yleensä jännitteen ja virran mittauksella (Elovaara & Laiho, 2007, s. 396).

VAMP 210 (ANSI 21) (VAMP, 2011a, s. 116-119).

Englanninkielinen nimitys: Under-impedance protection.

Suoja mittaa myötäkomponentin jännitettä ja virtaa ja laskee niiden avulla myötäkomponentin impedanssin. Suojassa on kaksi ali-impedanssi tasoa, joissa molemmissa on vakioaikaviive mahdollisuus. Suojan toiminta kannattaa estää ylivirtasuojan käänteisellä signaalilla. Tilanteessa, jossa jännite putoaa mutta virta pysyy samana, laskettu impedanssin voi mahdollisesti laskea laukaisalueen arvoon vaikka oikosulkua ei ole.



Kuva 23: Ali-impedanssi (VAMP, 2011a, s. 116).

Kuvassa 23 suojan laukaisualue on punaisella viivoitettu ympyrä origon ympärillä. Ympyrän säde on asetettu ali-impedanssi raja $Z <$

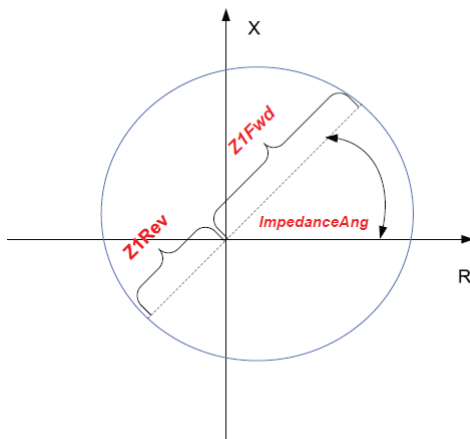
Käyttäjällä asetetaan parametrit:

Impedanssin raja arvo per unit arvona	$Z <, Z \ll$
Aikaviive sekunteina	$t <$

REG 650 (ANSI 21G) (ABB, 2011, s. 117-123).

Englanninkielinen nimitys: Underimpedance protection for generators and transformers.

Suojassa on kolme tasoa, joilla kaikilla on omat mittaukset ja asetukset. On mahdollista käyttää vain yhtä tasoa tai kaikkia tasoja. Suojassa käytetään koko järjestelmän mittausta, joka tarkoittaa vaiheiden välisten vikojen eri vikapiirien suorittamista rinnakkain. Näin saadaan nopeampi toiminta kuin niin sanotuissa kytkin mittauksissa, joissa vikatyypin ensin määrittää mitä jännitettä ja virtaa mitataan.



Kuva 24: Ali-impedanssi (ABB, 2011, s. 121).

Jokaiselle tasolle asetetaan kuvan 24 parametrit, impedanssin kulma on kaikille tasoille sama, mutta impedanssin etu ja takarajat ovat aseteltavissa jokaiselle tasolle.

Käyttäjää asettaa parametrit:

Impedanssin kulma asteissa	ImpedanceAng
Myötäimpedanssin raja eteenpäin ohmeina	Z1Fwd, Z2Fwd, Z3Fwd
Myötäimpedanssin raja taaksepäin ohmeina	Z1Rev, Z2Rev, Z3Rev
Aikaviive sekunteina	tZ1, tZ2, tZ3

5.4.6 Erovirta/Differentiaali

Erovirtasuojaa käytetään staattorin oikosulkusuojana ja on useimmiten generaattorin ensisijainen oikosulkusuoja. Staattorissa tapahtuvat oikosulut halutaan huomata mahdollisimman nopeasti ja erovirtasuojalla on erinomainen nopeus havaita vika.

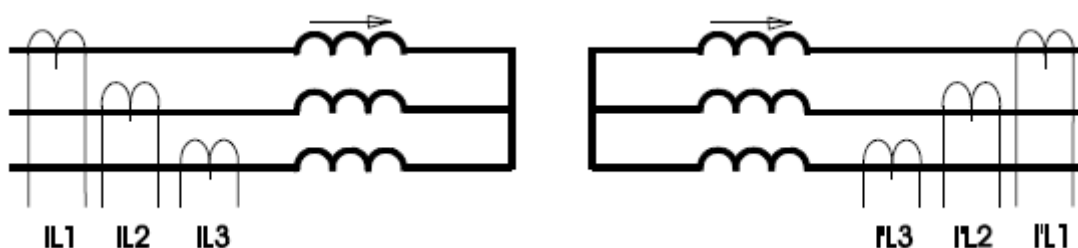
Erovirtasuojaus perustuu kirchhoffin virtalakiin, jonka mukaan tiettyyn pisteeseen tuleva virta on sama kuin sieltä poistuva virta. Näin ollen suojaus toteutetaan kahdella virtamuuntajalla ja virta mitataan molemmiin puolin staattoria. Näiden kahden virtamuuntajan välissä oleva alue on täten differentiaalisuojattu. Normaality- lanteessa erovirta on nolla, vian sattuessa virrat ovat erisuuntaisia ja suoja havaitsee tämän. (Öhlen, 2003, s. 360).

VAMP 265 (ANSI 87) (VAMP, 2011b, s. 51-55).

Englanninkielinen nimitys: Differential overcurrent protection.

Suoja mittaa kuvan 25 mukaan käämivirrat molemmilta puolilta ja vertaa niiden eroa.

Muuntajia suojatessa virran laskennat riippuvat kytkentätavasta, mutta generaattori on aina $Yy0$ kytketty joten suojan mittaamat virrat ovat todelliset käämivirrat.

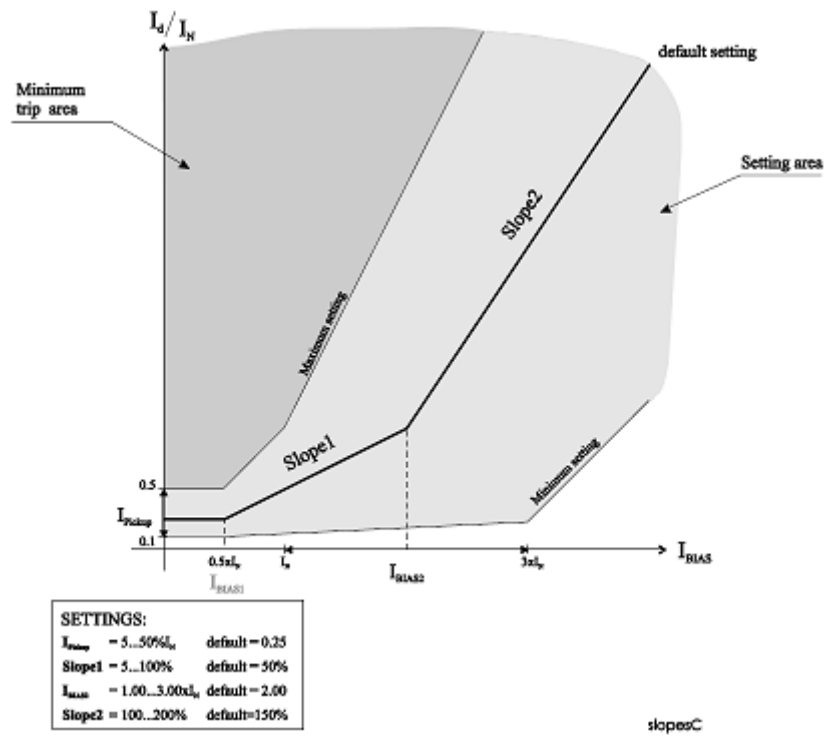


Kuva 25: Erovirran mittaus (VAMP, 2011b, s. 51).

Suoja laskee jokaisen vaiheen niin sanotun biasvirran, joka on virran keskimääräinen virtaus muuntajassa. Suo- jan ensimmäinen taso voidaan asettaa sallimaan enemmän erovirtaa, mitä suurempi biasvirta on. Toisen tason asetusarvona on ainoastaan erovirran raja eikä siinä voida tehdä slope asetuksia. Slope asetuksilla määritellään erovirran sallittu suuruus eri biasvirroilla.

Kuvassa 26 on esimerkki erovirtasuojan toiminnasta. I_{Pickup} on herkimmän alueen erovirtaraja, joka voidaan asettaa $5-50\%I_N$. Slope 1 alkupiste, I_{BIAS1} on aina $0,5 \times I_N$ ja sille voi asettaa nousun $5-100\%$. Slope 2 alkupiste, I_{BIAS2} on aseteltavissa $1 - 3 \times I_N$, ja sille voi asettaa $100-200\%$ nousun. Slope 1 ja 2 muodostavat käyrän, joka rajaa erovirtasuojan toiminta-alueen. Suoja laukaisee erovirran ollessa tietyn biasvirran arvolla käyrän yläpuolella.

Esimerkissä asetukset ovat $I_{Pickup} = 0,25 \times I_N$, $Slope1 = 50\%$, $I_{BIAS2} = 2 \times I_N$, $Slope2 = 150\%$.



Kuva 26: Erovirtasuojan toiminta (VAMP, 2011b, s. 54).

Käyttjä asettaa parametrit:

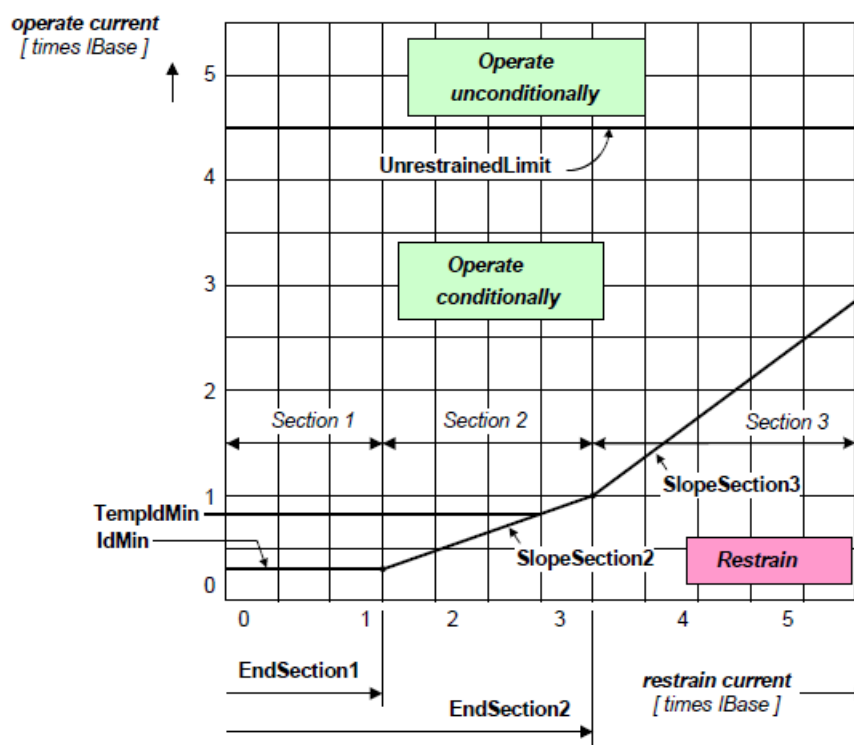
Erovirran asetusrvo prosentteina nimellisvirrasta (I_{Pickup})	$\Delta I >, \Delta I \gg$
Slope 1 nousu prosentteina	Slope1
Slope 2 alkupiste biasvirran suhteena nimellisvirtaan	I_{bias2}
Slope 2 nousu prosentteina	Slope2

REG 650 (ANSI 87G) (ABB, 2011, s. 98-115).

Englanninkielinen nimitys: Generator differential protection.

Suoja mittaa staattorikäimityksiin sisään meneviä ja ulos tulevia vaihevirtoja ja vertaa näitä, normaalitilanteessa summa on nolla, vikatilanteessa suojassa esiintyy vikavirta, jonka seurauksena suoja laukaisee.

Suojassa on kaksi eri suojaustapaa, joita molempia käytetään yhtä aikaa. Näitä voidaan kutsua rajoitetuksi ja rajoittamattomaksi. Rajoittamatonta suojausta käytetään suuria erovirtoja varten, jotka ovat niin suuria, että ne aivan varmasti ovat suojausalueen sisällä. Tämä suoja ei ole riippuvainen biasvirrasta vaan se asetetaan suhteessa generaattorin nimellisvirtaan ja rajan ylittyessä suoja laukaisee. Rajoitetussa suojassa on suojausalue jaettu kolmeen alueeseen, alue 1, alue 2 ja alue 3. Nämä alueet huomioivat sekä erovirran, että biasvirran, ja asetetaan sallimaan suuremman erovirran suuremmalla biasvirralla. Ensimmäinen alue on kaikista herkin sen salliessa vain pieniä erovirtoja, kolmas alue on kaikista sallivin. Alueiden virtarajoitukset asetetaan slope käyrien asetuksilla, joidenka nousu määritellään prosentteina erovirran ja biasvirran suhteesta. Valitun alueen käyrä lähtee nousemaan edellisen alueen päättymispisteestä.



Kuva 27: Erovirtasuojan toiminta (ABB, 2011, s. 107).

Käyttäjää asettaa parametrit:

Rajoittamattoman suojauksen erovirtaraja suhteessa generaattorin nimellisvirtaan	IdUnre
Ensimmäisen alueen erovirtaraja suhteessa generaattorin nimellisvirtaan	IdMin
Ensimmäisen alueen päättymispiste suhteessa generaattorin nimellisvirtaan	EndSection1
Toisen alueen päättymispiste suhteessa generaattorin nimellisvirtaan	EndSection2
Toisen alueen käyrän nousu prosentteina	SlopeSection2
Kolmannen alueen käyrän nousu prosentteina	SlopeSection3

5.4.7 Vinokuormitus

Vinokuormitussuoja, kutsutaan myös epäsymmetriasuojaksi, suojaa generaattoria liian suurelta vinokuormalta. Vinokuormitusta esiintyy yksi- ja kaksivaiheisten oikosulkujen yhteydessä, sekä yhden tai kahden vaiheen katkeamisesta tai katkaisijan vajaanapaisesta toiminnasta jolloin yksi vaihe jää avoimeksi. (Mörsky, 1992, s. 41). Vinokuormituksen johdosta staattoriin syntyy vastakomponentti, jonka magneettikenttä pyörii myötäkomponentin magneettikenttää vastaan. Nämä vastakkaiset komponentit aiheuttavat 100 Hz hajavirtoja roottoriin ja vaimennuskäämitykseen. Vastakomponentin seurauksena koneen vääntömomentti nousee ja se rupeaa tärisemään ja ylikuumentamaan. Sallittu vastavirta on generaattorin tyypistä riippuen suunnilleen 10-30 %. (Mörsky, 1992, s. 161).

VAMP 210 (ANSI 46) (VAMP, 2011a, s. 67-69).

Englanninkielinen nimitys: Current unbalance protection.

Suojan toiminta huomioi vastakomponentin vaihevirrat. Suojassa on sekä vakioaika, että käänteisaikaviive mahdollisuus. Epäsymmetria määritellään vasta ja myötäkomponentin suhteena joko virrasta tai jännitteestä.

Käyttjä asettaa parametrit:

Vastavirran raja prosentteina nimellisivrrasta	I2>
Aikaviive sekunteina	t>
Aikaviiveen tyyppi	DT/INV Type
Käänteisaikaviivekerroin	K1

REG 650 (ANSI 46I2) (ABB, 2011, s. 204-210).

Englanninkielinen nimitys: Negative-sequence time overcurrent protection for machines.

Suoja mittaa vastakomponentin virtaa. Suojassa on vakioaika ja käänteisaikaviive mahdollisuus, ja kaksi tasoa. Suojan aikaviive on suhteutettu roottorin termiseen kestävyYTEEN.

Käyttjä asettaa parametrit:

Vastavirran raja prosentteina perusarvosta	I2-1>, I2-2>
Aikaviive sekunteina	t1, t2
Aikaviiveen tyyppi	DT/INV CurveType1
Vastavirtakestoisuus ensimmäisellä tasolla sekunteina	K1
Käänteisaajan minimiaika sekunteina	t1Min
Tason 1 maksimi aikaviive	t1Max

5.4.8 Alimagnetointi

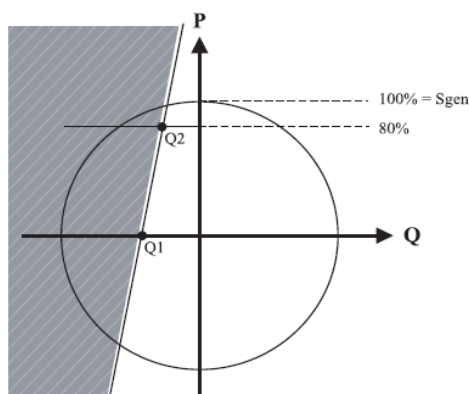
Alimagnetointisuoja käytetään valvomaan generaattorin toimintaa stabiililla alueella ja laukaisemaan generaattori irti verkosta jos se on vaarassa pudota tahdista. Alimagnetointitila syntyy, kun generaattorin magnetointi ei enää tietyllä tehotasolla riitä, tai magnetointi on kokonaan hävinnyt. Syynä tähän voi olla magnetointikatkaisijan aukeaminen, magnetoinnin katkeaminen, viallinen jännitteensäätö tai verkon jännitteen nousu.

Alimagnetointitilassa generaattorin loisteho on melkein täysin kapasitiivista ja stabiilisuuden menetyksen riski on suuri, jonka seurauksena generaattori voi pudota tahdista. Generaattorin pudotessa tahdista se joutuu epätahtikäyttöön. Epätahtikäytössä staattorissa ja roottorissa esiintyy voimakkaita virta ja jännitesysäyksiä sekä kuumenemista. Turbiini, generaattorin akseli ja perustukset kokevat voimakkaita mekaanisia rasituskia. (Mörsky, 1992, s. 162).

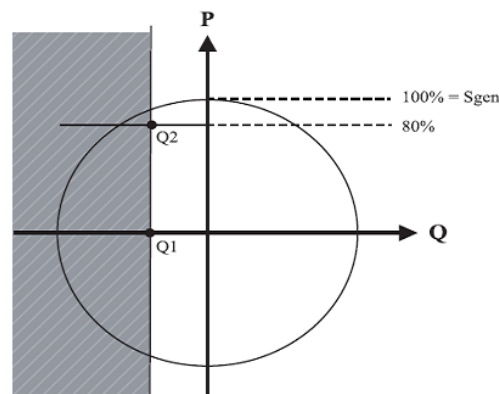
VAMP 210 (ANSI 40) (VAMP, 2011a, s. 119-122).

Englanninkielinen nimitys: Under-excitation protection.

Suoja valvoo kapasitiivisen tehon määrää. Generaattorin tuottaessa kapasitiivista tehoa, loisteho on negatiivisella puolella. Suojan voi valita huomioimaan sekä loistehon, että pätötehon tai pelkästään loistehon.



Kuva 28: Alimagnetointi asetusrayhmä 1 (VAMP, 2011a, s. 120).



Kuva 29: Alimagnetointi asetusrayhmä 2 (VAMP, 2011a, s. 120).

Kuvissa 28 ja 29 tehon ollessa harmaalla alueella suoja laukeaa, suojan laukaisuraja asetellaan parametreilla Q1 ja Q2. Kuva 28 kuvastaa asetusrayhmä 1:n toimintaa ja kuva 29 asetusrayhmä 2:n toimintaa. Parametreja asettaessa Q1 pisteen P-koordinaatti on aina nolla ja Q2 pisteen P-koordinaatti on aina 80% generaattorille määritetystä nimellistehosta. Q-koordinaatilla määritellään rajan kohta. Asetusrayhmän 1 toiminta riippuu pätötehosta ja loistehon kapasitiivisuudesta, joten toimintasuoraa on kallistettu 8° . Asetusrayhmä 2 toiminta riippuu ainoastaan kapasitiivisen tehon määrästä ja täten toimintasuora on pystysuora ja $Q1=Q2$.

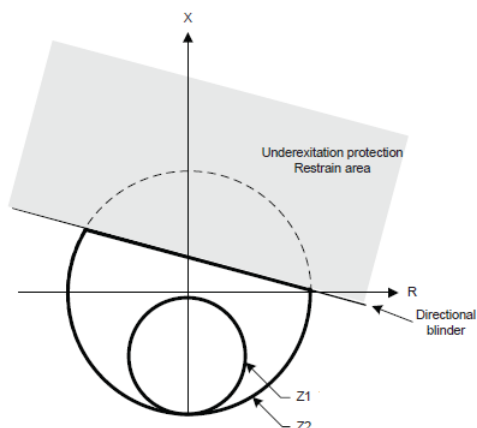
Käyttäjä asettaa parametrit:

Asetusrayhmän valinta 1 tai 2	SetGrp
Loistehon raja prosentteina nimellinäennäistehosta pisteessä Q1	Q@P0%
Loistehon raja prosentteina nimellinäennäistehosta pisteessä Q2	Q@P80%
Aikaviive sekunteina	t<

REG 650 (ANSI 40)(ABB, 2011, s. 123-129).

Englanninkielinen nimitys: Loss of excitation.

Releessä ei ole alimagnetointisuojaa vaan ”Loss-of-Excitation” suoja. Suoja mittaa näennäistä myötäimpedanssia generaattorilta katsottuna. Mittaus perustuu jännitteen ja virran myötäkomponenttien mittaukseen.



Kuva 30: Alimagnetointisuojan asetusalueet (ABB, 2011, s. 126).

Kuvassa 30 näennäisen impedanssin ollessa alueella Z1, niin sanotulla nopealla alueella, suojaus laukaisee nopeasti. Tämä alue liittyy generaattorin dynaamiseen stabiilisuuteen. Impedanssin ollessa alueella Z2, hitaalla alueella, suojaus laukaisee hitaammin ja tämä alue liittyy staattiseen stabiilisuuteen. Suojassa on vian suunnan rajoittava toiminto, ”directional blinder”.

Käyttäjää asettaa parametrit:

Alueiden Z1 ja Z2 yläraja X-akselilla prosentteina impedanssin perusarvosta	XoffsetZ1, XoffsetZ2
Alueiden Z1 ja Z2 halkaisija prosentteina impedanssin perusarvosta	Z1diameter, Z2diameter
Aikaviive sekunteina	tZ1, tZ2

Jos käytetään suunnan rajoittajaa asetetaan myös:

Suunnan rajoittajan raja X-akselilla prosentteina impedanssin perusarvosta	XoffsetDirLine
Suunnan rajoittajan ja R-akselin kulma asteissa	DirAngle

5.4.9 Ylimagnetointi

Ylimagnetointitila esiintyy, kun jännitteen ja taajuuden suhde on liian korkea, eli joko suuri jännite tai matala taajuus aiheuttaa ylimagnetoinnin. Ylimagnetoinnista seuraa ylilämpenemistä, joka aiheuttaa vaurioita generaattorille. (Alstom, 2011, s. 309).

VAMP 210 (ANSI 24) (VAMP, 2011a, s. 93-95).

Englanninkielinen nimitys: Volts/hertz over-excitation protection.

Suoja reagoi jännitteen ja taajuuden väliseen suhteeseen. Suoja mittaa vaiheiden välisiä pääjännitteitä ja huomioi näistä aina suurimman. Relettä voidaan käyttää sekä 50Hz, että 60Hz verkoissa ja se tunnistaa itse kyseisen verkon taajuuden. Ylimagnetointisuoja tarvietaan generaattoreissa, jotka magnetoidaan myös käynnistyksen ja sammutuksen aikana.

Käyttäjä asettaa parametrit:

V/Hz suhteen raja prosentteina nimellisestä V/Hz suhteesta	Uf>
Aikaviive	t>

REG 650 (ANSI 24) (ABB, 2011, s. 236-245).

Englanninkielinen nimitys: Overexcitation protection.

Suojan toiminta perustuu jännitteen ja taajuuden suhteen laskemiseen. Rele suorittaa tarkistuksen vaihe-maa jännitteen ollessa yli 70% nimellisestä vaihe-maa jännitteestä, sitä alempiin jännitteisiin suojaus ei reagoi. Suoja huomioi 50Hz verkossa taajuuksia väliltä 33-60Hz ja 60Hz verkossa väliltä 42-75Hz.

Käyttäjä asettaa parametrit:

V/Hz suhteen raja prosentteina nimellis V/Hz suhteesta, ilman kuormaa ja nimellistaajuudella	V/Hz>
V/Hz suhteen raja prosentteina nimellis V/Hz suhteesta, alueella jossa aikaviivettä käytetään	V/Hz>>
Aikaviive sekunteina	tMin

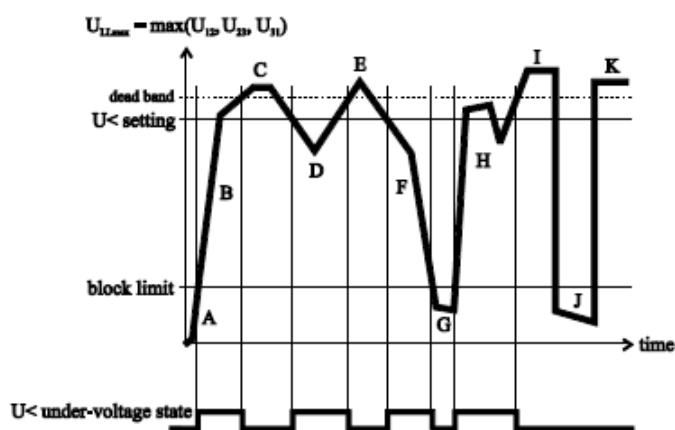
5.4.10 Alijännite

Alijännitesuoja mittaa jännitettä ja laukaisee, kun jännite alittaa asetetun arvon. Suojassa pitää olla aikaviive, joka estää suojan laukeamisen lyhytaikaisten jännitevaihtelujen johdosta, tämän aiheuttaessa turhia keskeytyksiä. Hyvässä alijännitereleessä voidaan asetusarvo asettaa 50% nimellisjännitteestä, ja myös asettaa aikaviive. (Mörsky, 1992, s. 39). Alijännitesuojausta käytetään melko harvoin generaattorin suojauksessa (Alstom, 2011, s. 306)

VAMP 210 (ANSI 27) (VAMP, 2011a, s. 99-102).

Englanninkielinen nimitys: Undervoltage protection.

Suoja mittaa pääjännitteitä kaikkien kolmen vaiheen välillä ja huomioi niistä aina pienimmän, suoja laukaisee, kun mitattu jännite alittaa suojalle asetetun arvon. Suojassa on kolme alijännitetasoa ja kaikissa tasoissa on vakioaikaviiveen mahdollisuus. Suojassa on myös alhaisten jännitteiden lukitus, joka estää turhat laukeamiset silloin, kun jännite katkaistaan.



Kuva 31: Alijännite (VAMP, 2011a, s. 100).

Kuvassa 31 tilanteet C, E I ja K ovat normaalin jännitetason alueella, B, D, F ja H ovat alijännite tilassa ja A, G ja J ovat lukitun alarajan alla joten niitä ei katsota alijännitteisiksi.

Käyttäjät asettaa parametrit:

Alijänniteraja prosentteina pääjännitteestä	$U <, U \ll, U \lll$
Aikaviive	$t <, t \ll, t \lll$
Alijännitelukituksen raja prosentteina pääjännitteestä	$LVBlk$

REG 650 (ANSI 27) (ABB, 2011, s. 217-223).

Englanninkielinen nimitys: Two step undervoltage protection.

Suojassa voi valita jännitteen mittauksen maa-vaihe tai vaihe-vaihe väliseksi, ja myös jos mittaus on tehollisarvosta vai perusarvosta. Mittaus tapahtuu aina kaikista kolmesta jännitteestä. Suojassa on kaksi alijännitetasoa, joissa molemmissa on vakioaikaviive mahdollisuus, ja ensimmäisessä tasossa on myös käänteisaikaviive mahdollisuus

Käyttäjät asettaa parametrit:

Alijänniteraja prosentteina pääjännitteestä	$U1 <, U2 <$
Aikaviive	$t1, t2$

5.4.11 Ylijännite

Mahdollista ylijännitettä aiheuttavia vikatilanteita ovat voimakoneen ryntääminen, kuormituksen äkillinen häviäminen ja jännitteensäätäjän rikkoutuminen. Vesivoim-
ageneraattorin rynnätessä voi ylijännite olla jopa 50-100 %, jolloin muuntaja ottaa
valtavan tyhjäkäyntivirran, joten asetteluarvot pitää laittaa tarpeeksi alhaiselle
jännitetasolle. (Mörsky, 1992, s. 154).

Ylijänniterele avaa generaattorin pääkatkaisijan, poistaa magnetoinnin ja pysäyttää
voimakoneen joten siinä tarvitaan useampi kosketin, tai käyttää lisälaitteena apurelettä
monella koskettimella. Ylijännitereleen on saatava jännitettä myös tapauksissa, joissa
jännitesäätäjä on epäkunnossa. (Mörsky, 1992, s. 153).

Generaattorin ylijännitekestävyys pienenee sitä mukaan, kun taajuus pienenee,
taajuuden pienentyessä magneettivuo tiivistyy, joka aiheuttaa rautasydämen mag-
neettisen kyllästymisen ja nopean lämpenemisen. Tilanne on pahin silloin, kun yhtä
aikaa esiintyy alitaajuutta ja ylijännitettä. Keskisuurten ja suurten generaattoreiden
automaattinen jännitteensäätö tulisi varustaa jännite/taajuus-rajoittimella (Mörsky,
1992, s. 154).

VAMP 210 (ANSI 59) (VAMP, 2011a, s. 90-92).

Englanninkielinen nimitys: Overvoltage protection.

Suoja mitta pääjännitteitä kaikkien kolmen vaiheen välillä ja huomioi niistä aina
suurimman. Käyttämällä pääjännitteitä eikä vaihejännitteitä saadaan kätevästi
poistettua se mahdollisuus, että suoja laukeaisi vaiheen ja maan välillä sattuvan
maasulun aiheuttamasta ylijännitteestä, maasulkusuojausfunktiot huolehtivat ne viat.
Suoja on kolme ylijännitetasoa, joissa kaikissa on vakioaikaviive mahdollisuus.
Ylijännitesuojan hystereesi on vakioasetuksena 3%. Jos ollaan alueella, jossa vaaditaan
herkkää suojausta, jonka asetusarvo on alle 3%, on syytä alentaa hystereesiä.

Käyttäjä asettaa parametrit:

Ylijänniteraja prosentteina nimellisjännitteestä	U>, U>>, U>>>
Aikaviive sekunteina	t>, t>>, t>>>
Tietyissä tapauksissa hystereesi prosentteina	Hyster

REG 650 (ANSI 59) (ABB, 2011, s. 223-230).

Englanninkielinen nimitys: Two step overvoltage protection.

Suoja voi valita jännitteen mittauksen maa-vaihe tai vaihe-vaihe väliseksi, ja
myös jos mittaus on tehollisarvosta vai perusarvosta. Mittaus tapahtuu aina kaikista
kolmesta jännitteestä. Suoja on kaksi ylijännitetasoa, molemmissa on vakioaikaviive
mahdollisuus ja ensimmäisessä tasossa on myös käänteisaikaviive mahdollisuus.

Käyttäjä asettaa parametrit:

Ylijänniteraja prosentteina jännitteen perusarvosta	U1>, U2>
Aikaviive sekunteina	t1, t2

5.4.12 Taajuus

Taajuussuoja mittaa generaattorin jännitteen taajuutta, ja sen laskiessa liian pieneksi tai noustessa liian suureksi, tulee suojan tehdä tarvittavat kytkennät (Mörsky, 1992, s. 40).

Alitaaajuutta voi esiintyä, kun generaattoria ylikuormitetaan, tai järjestelmässä sattuvan vian seurauksena, jonka johdosta generaattorin tuottama teho ei riitä kuormituksen kattamiseen (Alstom, 2011, s. 310).

Ylitaaajuutta voi esiintyä generaattorissa tehonsäätäjän vioittumisen johdosta tai kuormituksen äkillisestä häviämisestä (Mörsky, 1992, s. 155).

Taajuussuojat ovat joissakin releissä eri suojausfunktioissa ja toisissa releissä ne ovat samassa funktiossa.

VAMP 210 (ANSI 81H/81L) (VAMP, 2011a, s. 109-111).

Englanninkielinen nimitys: Overfrequency and underfrequency protection.

Releessä yli- ja alitaaajuussuojat on yhdistetty samaan funktioon. Suoja mittaa taajuuden kahdesta ensimmäisestä jännitesyötöstä. Ainakin yhteen näistä pitää olla jännite kytkettynä, jotta taajuusmittaus on mahdollista.

Suojassa on neljä tasoa, kaksi alemmaa tasoa voidaan asettaa yli- tai alitaaajuussuojiksi, ja kaksi ylempää tasoa on alitaaajuussuojia. Kaikki tasot voidaan halutessa asettaa alitaaajuussuojiksi yhtä aikaa. Alitaaajuussuojassa on alijännitelukitus. Tällä estetään turhat laukeamiset generaattorin ollessa pysähdyksissä.

Käyttäjällä asetetaan parametrit:

Taajuuden ylä/alaraja Hertseinä	$f > <, f > < > <, f <, f < <$
Aikaviiveen sekunteina	$t > <, t > < > <, t <, t < <$
Kahden ensimmäisen tason suojaustyyppi	$< \text{ tai } >$

REG 650 (ANSI 81) (ABB, 2011, s. 255-262).

Englanninkielinen nimitys: Underfrequency protection, Overfrequency protection.

Releessä on erilliset alitaaajuus ja ylitaaajuus suojaukset.

Alitaaajuussuoja

Suoja mittaa syöttöjännitteen taajuutta, mittaus on riippuvainen jännitteen suuruudesta. Suojassa on yksi alitaaajuustaso, jossa on vakioaikaviive ja alijännitelukitus.

Käyttäjällä asetetaan parametrit:

Taajuuden alaraja Hertseinä	StartFrequency
Aikaviive sekunteina	tDelay

Ylitaaajuussuoja

Suoja mittaa myötäkomponentin jännitteen taajuutta. Suojassa on yksi ylitaaajuustaso, jossa on vakioaikaviive ja alijännitelukitus.

Käyttäjällä asetetaan parametrit:

Taajuuden yläaraja Hertseinä	StartFrequency
Aikaviive sekunteina	tDelay

5.4.13 Takateho

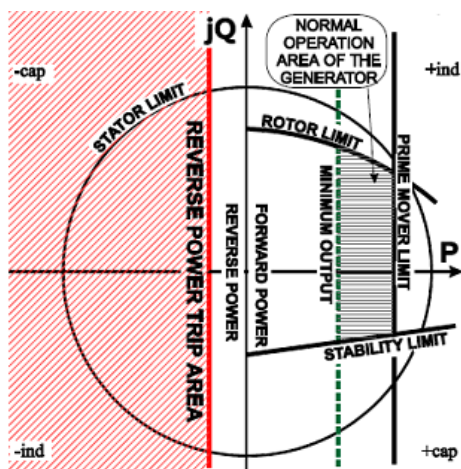
Takatehosuoja mittaa verkosta generaattoriin päin menevää tehoa, ja tehon ylittäessä asetusravon suojalaaukaisee. Takatehosuojalla suojataan turbiinia estämällä generaattorin toiminta moottorina, joka voi vaurioittaa voimakonetta. Vika ilmenee silloin, kun sähkötehon suunta muuttuu ja teho siirtyy verkosta generaattoriin. Vesivoimalaitoksessa generaattorin takateho aiheuttaa turbiinikoneistoon värinää, joka voi sen johdosta vaurioitua. (Mörsky, 1992, s. 166). Turbiinin lapojen pyöriessä ohjaussiipien ollessa suljettuina voi tästä seurata kavitaatiota. Tästä voi pääasiassa kaplanturbiineille aiheutua vakavia laakerivikoja. (Öhlen, 2003, s. 382).

Suojan pitää sallia pieniä takatehoja, koska verkkoon tahdistuksessa generaattorissa usein esiintyy pientä takatehoa ja se ei saa aiheuttaa suojan laukeamista. Suojassa pitää myös olla tietty hitaus, jotta se ei laukea verkon tehojen heilahtelusta. (Mörsky, 1992, s. 166).

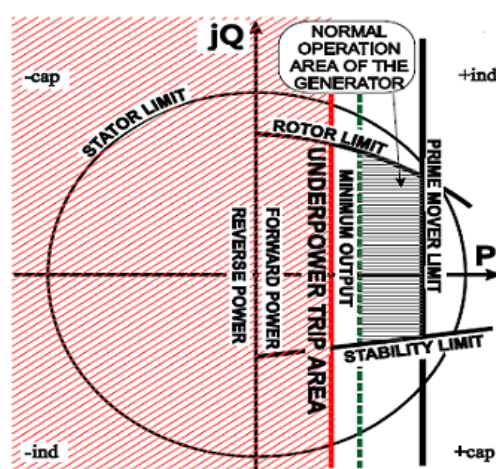
VAMP 210 (ANSI 32) (VAMP, 2011a, s. 126-129).

Englanninkielinen nimitys: Reverse power and under-power protection.

Suojassa on sekä takateho- että aliteho-funktio. Takatehofunktiota käytetään estämään generaattorin toimimista moottorina, ja alitehofunktiota voidaan käyttää havaitsemaan mekaanisen kuormituksen katoaminen. Molemmat funktiot mittaavat pätehoa, ja suojan asetusarvo on suhteessa turbiinin nimellistehoon.



Kuva 32: Takateho (VAMP, 2011a, s. 127).



Kuva 33: Aliteho (VAMP, 2011a, s. 128).

Kuvista 32 ja 33 nähdään, että takatehofunktion asetusarvo tulee olla negatiivinen, edellä mainitusta syystä ja alitehofunktion asetusarvo positiivinen. Alitehofunktiossa on kaksi tasoa.

Käyttäjä asettaa parametrit:

Takateho/Alitehoraja prosentteina turbiinin nimellistehosta	$P <, P \ll$
Aikaviive	$t <, t \ll$

REG 650 (ANSI 32) (ABB, 2011, s. 192-200).

Englanninkielinen nimitys: Directional over-/under-power protection.

Suojassa on suunnattu ali- ja yliteho suojausfunktio, jolla voidaan mitata liian korkeaa/matalaa pätötehoa, näennäistehoa tai loistehoa riippuen suojauksen vaatimuksista. Sillä voidaan myös valvoa pätötehon ja loistehon suuntaa. Molemmissa funktioissa on kaksi tasoa, joissa molemmissa on vakioaikaviive mahdollisuus.

Käyttäjät asettaa parametrit:

Suunnattu yli/alitehoraja prosentteina lasketusta perusarvosta	Power1, Power2
Aikaviive sekunteina	TripDelay1, TripDelay2
Ominaiskulma asteissa	Angle1, Angle2

5.4.14 Tahaton verkkoonkytkentä

Suoja estää generaattorin tahattoman verkkoon kytkennän. Tilanne, jossa katkaisija suljetaan generaattorin ollessa pysähdyksissä, tai käynnissä mutta ei vielä tahdistettuna, on niin sanottu tahaton verkkoonkytkentä. Tämän tapahtuessa todella suuret virrat indusoituvat pääosin roottoriin, mutta myös staattoriin, aiheuttaen suuria lämpötiloja ja vaurioita. (Alstom, 2011, s. 309).

Vampin generaattorisuojassa ei ole tahattoman verkkoonkytkennän suojausta, Abb:n generaattorisuojassa on.

REG 650 (ANSI 50AE) (ABB, 2011, s. 200-203).

Englanninkielinen nimitys: Accidental energizing protection for synchronous generator. Suoja mittaa kaikkien vaiheiden virtoja ja pääjännitteitä ja huomioi näistä aina suurimmat. Vaihevirtojen mittaus tehdään joko generaattorin napapuolelta tai tähtipisteen puolelta, ja jännitemittaus napapuolelta. Vikatilanteessa jännite on liian pieni virran ollessa liian suuri. Jännitteen ylittäessä tietyn arvon on generaattori normaalissa toiminnassa ja silloin suojan toiminta on estetty.

Käyttäjät asettaa parametrit:

Virran yläraja prosentteina perusvirrasta	$I >$
Ylivirran aikaviive sekunteina	tOC
Jännitteen alaraja prosentteina perusjännitteestä	ArmU<
Alijännitteen aikaviive sekunteina	tArn
Jänniteraja, jonka yllä toiminta estetään	DisarmU>
Aikaviive suojauksen estolle sekunteina	tDisarm

5.4.15 Taajuuden muutosnopeus ROCOF

Taajuuden muutosnopeuden suoja, niin sanottu Rocof, vertaa taajuuden todellista arvoa normaaliin arvoon. Suojan toiminta perustuu taajuuden laskemis-/nousemisnopeuden valvontaan ja suoja laukaisee jos tämä muutosnopeus on sallittua nopeampi. (Alstom, 2011, s. 320).

Suoja pystyy tavallaan ennustamaan yli- ja alitaajuuden ja on täten nopeampi havaitsemaan taajuusviat kuin perinteiset taajuussuojat, ja sen avulla nopeutetaan toimintaa taajuuden vikatilanteissa. Sitä käytetään myös nopeaan kuorman purkamiseen ja saarekekäytön tunnistamiseen. Rocof suoja on todella tehokas huomaamaan saarekekäyttöön joutumisen. Mitä enemmän generaattorin jäljellä oleva kuormitus eroaa ennen saareketilannetta vallinneesta kuormituksesta, sitä paremmin suoja tunnistaa tilanteen. (VAMP, 2011a, s. 111).

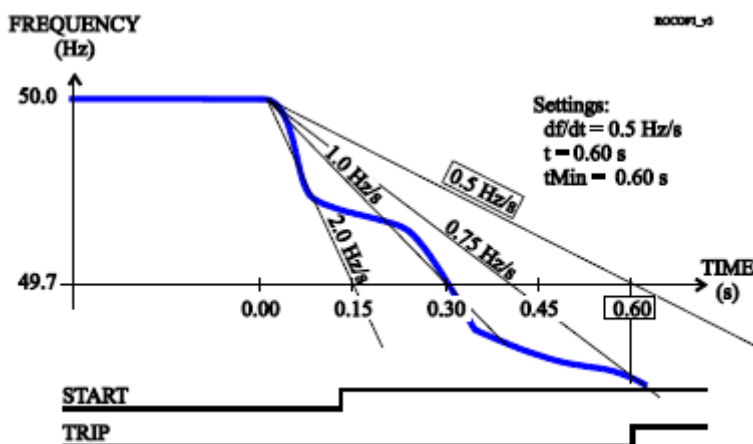
Taajuuden muutokset voivat johtua kuormituksen muuttumisesta tai vikatilanteista. Kuormitusta pienentäessä taajuus nousee ja kuormitusta suuretaessa taajuus laskee. Normaalitylanteessa kuormituksen muutoksista johtuva taajuuden hetkellinen nousu tai lasku jää heilahtelemaan kunnes generaattorin ohjausjärjestelmä palauttaa taajuuden normaaliin arvoon. Vikatilanteessa, jossa oikosulkuvirta on suuri, tai lisätty kuormitus on niin suuri, että se ylittää generaattorin tuotantokapasiteetin, ei taajuus jää heilahtelemaan vaan se jatkaa laskemista. (VAMP, 2011a, s. 111).

VAMP 210 (ANSI 81R) (VAMP, 2011a, s. 111-116).

Englanninkielinen nimitys: Rate of change of frequency (ROCOF) protection.

Suojan toiminta perustuu todellisen muutosnopeuden keskiarvoon. Suoja laukeaa jos muutosnopeus tietyn aikaviiveen aikana on suurempi kuin sallittu muutosnopeus.

Yli- ja alitaajuussuojia tulee käyttää yhdessä rocof:n kanssa. Vaikka rocof usein on nopeampi havaitsemaan muutokset, tilanteissa joissa taajuus muuttuu hitaasti se ei havaitse vikaa.



Kuva 34: Taajuuden muutosnopeus (VAMP, 2011a, s. 111).

Kuvassa 34 taajuuden muutosnopeus on asetettu $0,5 \text{ Hz/s}$ ja t sekä t_{Min} ovat $0,6 \text{ s}$. Kun t ja t_{Min} asetetaan samoiksi, on suojassa vakioaikaviive, ja laukaisu tapahtuu $0,6 \text{ s}$ kohdalla. Jos t_{Min} asetetaan pienemmäksi kuin t saadaan käänteisäikaviive. Silloin t_{Min} on minimi käänteisäikaviive. Jos kuvassa 34 asetetaan t_{Min} $0,15 \text{ s}$ tulee suojan laukaisu tapahtumaan jo $0,3 \text{ s}$ kohdalla

Käyttäjä asettaa parametrit:

Taajuuden muutosnopeuden raja Hz/s	df/dt>
Aikaviive sekunteina	t>
Minimi käänteisaikaviive sekunteina	tMin

REG 650 (ANSI 81) (ABB, 2011, s. 262-265).

Englanninkielinen nimitys: Rate-of-change frequency protection.

Suoja mittaa jatkuvasti taajuuden muutosnopeutta ja vertaa sitä asetettuun arvoon. Suoja on myös riippuvainen alijännitelukituksesta, jos jännite on lukitusrajan alla suoja ei reagoi. Suojassa on vakioaikaviive.

Käyttäjä asettaa parametrit:

Taajuuden muutosnopeuden raja Hz/s	StartFreqGrad
Aikaviive sekunteina	tTrip

5.4.16 Laakerivirta

Vesivoimageneraattorin akselissa mahdollisesti esiintyvä jännite johtuu magneettipiirin epäsymmetriasta. Jännite voi olla noin 10-20V, ja siitä tulee laakerivirta, joka ajan myötä vahingoittaa laakereita ja yllämmittää jäähdytysöljyn. Eristämällä laakerit pystytään estämään laakerivirrat, ja laakerivirtasuojarele asetetaan valvomaan eristysten kuntoa. (Mörsky, 1992, s. 165).

MC0A(Microelettrica Scientifica, 2014, s. 1).

Laakerivirtasuojana käytetään Microelettrica Scientifica MC0A releitä, koska laakerivirrat ovat pieniä ja kyseisen releen herkkyys on parempi kuin esimerkiksi VAMP releiden. Suojaustoiminto on tavallinen maasulun ylivirtasuoja.

5.4.17 Epätahti

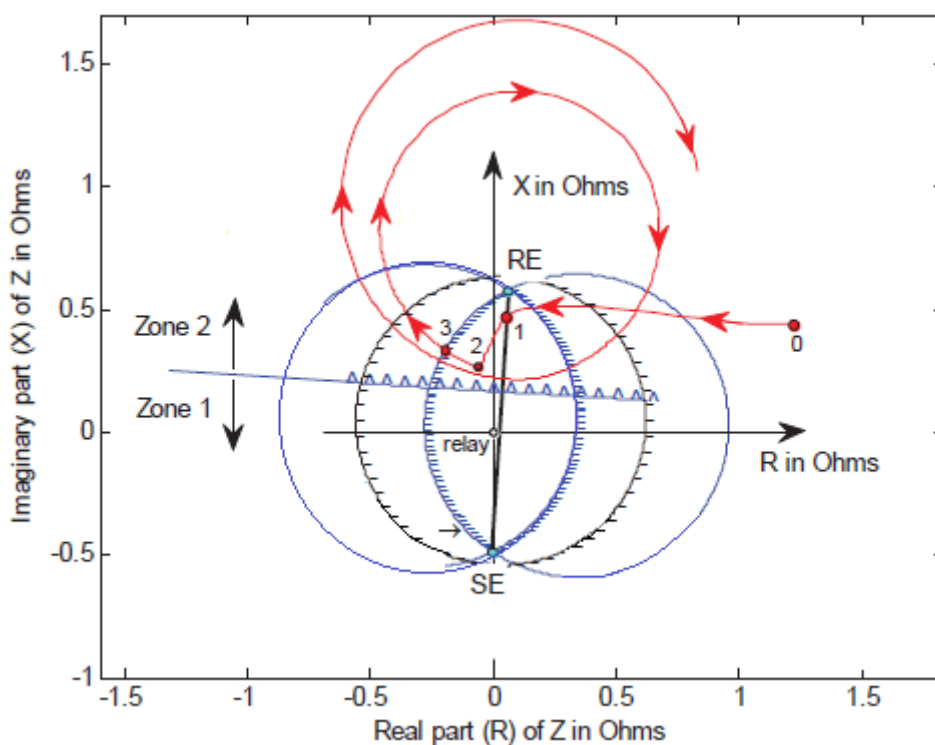
Epätahtisuojaalla generaattori saadaan mahdollisimman nopeasti irrotettua verkosta epätahtitilanteessa. Toiminnan tulee olla nopeaa, jotta generaattorin suurilta vaurioilta vältytään ja että heilahtelu ei vaikuta kovin kauaa järjestelmän syöttämiin kuormiin. Generaattori voi joutua epätahtitilaan pääosin seuraavista syistä, järjestelmässä esiintyvän vian liian pitkä selvittämis aika, generaattorin tehokulman ollessa suuri ja lähellä stabiilisuuden rajaa tai alimagnetoinnista. Epätahtikäytölle on tyypillistä suuret heilahtelut pätötehosta ja loistehossa. Suojaus voidaan toteuttaa huomioimalla takateho tai impedanssi. (Alstom, 2011, s. 315-317). Vampin generaattorireleessä ei ole epätahtisuojaa, ABB:n generaattorireleessä on.

REG 650 (ANSI 78) (ABB, 2011, s. 129-141).

Englanninkielinen nimitys: Out-of-step protection.

Suoja tunnistaa tehon heilahtelut seuraamalla impedanssia. Suojausalue määräytyy eteenpäin ja taaksepäin ulottuvista impedansseista. Eteenpäin ulottuva impedanssi, RE, määräytyy kaikista generaattorin jännitteeseen vaikuttavista impedansseista eli muuntajan, kaapeleiden ja verkon impedanssista. Taaksepäin ulottuva impedanssi, SE, määräytyy generaattorin transientista reaktanssista.

Suojauksessa on kaksi aluetta, joista ensimmäinen alue huomioi generaattorin ja mahdollisesti sen muuntajan, ja toinen alue huomioi järjestelmässä kauempana generaattorista olevat viat. Mikäli heilahtelujen keskipiste on ensimmäisellä alueella, asetetaan suoja yleensä laukeamaan yhden heilahduksen jälkeen, mutta se voidaan myös asettaa sallimaan useampia heilahduksia. Jos heilahtelut tapahtuvat kauempana, eli toisella alueella, asetetaan suoja sallimaan useampi heilahdus ennen laukeamista.



Kuva 35: Epätahtisuoja (ABB, 2011, s. 132).

Suojaalue on kuvassa 35 kahden sinisen ympyrän muodostama soikea keskikohta. Tämän alueen yläraja on edellä mainittu RE ja alaraja SE. Kuvassa punainen viiva kuvaa vikatilanteen aiheuttamaa heilahtelua.

- Piste 0 on impedanssi normaalin toiminnan aikana.
- Piste 1 on impedanssi kolmivaiheisen oikosulun aikana.
- Piste 2 on vian selvittämisen jälkeen.
- Piste 3 epätahtikäyttö ja heilahtelu.

Käyttäjä asettaa parametrit:

Ensimmäisen alueen kattavuus prosentteina eteenpäin ulottuvasta impedanssista	ReachZ1
Ensimmäisellä alueella sallittujen heilahduksien määrä	NoOfSlipsZ1
Toisella alueella sallittujen heilahduksien määrä	NoOfSlipsZ2

6 Tulokset

Opinnäytetyön tuloksena on uusi laskentapohja oikosulkuvirtojen laskemista varten ja käsikirja vesivoimalaitosten generaattorien relesuojaukselle.

Uusi laskentapohja on edeltäjänsä käyttäjäystävällisempi ja siinä on enemmän laskumahdollisuuksia. Liitteessä 1 tehtyjen laskentamenetelmien vertailun ja tarkistuksen ansiosta tiedetään myös, että laskut toteutuvat oikein ja tarpeeksi tarkalla marginaalilla. Laskentapohjalla saadaan laskettua kaikki oikosulkuvirrat, joita tarvitaan kojeiston mitoitukseen. Edellisellä pohjalla laskettiin ainoastaan alkuoikosulkuvirta, joka tämän työn ansiosta todettiin riittämättömäksi. Liitteessä 2 on laskentapohjia vastaavista laitoksista tehty simuloinnit Neplan simulointiohjelmalla. Simuloidut tulokset vastaavat laskentapohjilla saatuja tuloksia, joten laskentapohjien tarkkuus on todettu tarpeeksi hyväksi. Liitteessä 3 on kaikista laskentapohjista saatava tulospaperi esiteltynä, ja tämän lisäksi liitteessä 8 on esitetty laskentapohjan ulkonäkö Excel-ympäristössä.

Tutustumalla eri suojarelevalmistajien ehdotuksiin sekä Statkraftin vaatimukseen taulukko 3 toteutui, joka antaa käyttäjälle pohjan relesuojauksen suunnitteluun. Relesuojauksen vaatimuksia ei Suomessa ole, joten taulukko on suuntaa antava ja sitä pitää soveltaa jokaiseen projektiin sopivaksi. Käsikirjassa on selvennetty kaikkien taulukossa 3 esitettyjen suojaustoimintojen toimintaperiaate sekä annettu ohjeet näiden asetteluihin yleisimmissä suojareleissä, jotka ovat VAMP 210- ja ABB REG 650-generaattorisuojareleet. Käsikirja antaa myös tietoa muista tärkeistä seikoista, joita suojausta suunnitellessa tulee ottaa huomioon kuten selektiivisyys, varasuojaus ja yleisesti, mitä vikatilanteita generaattorissa voi esiintyä ja miksi generaattori pitää suojata hyvin. Liitteessä 4 on AutoCad-piirrustusohjelmalla piirretyt esimerkit relesuojauksen toteuttamisesta sisältäen varasuojauksen kahden eri koon laitoksissa. Näiden laitosten suojaus on toteutettu Statkraft(2014)-vaatimusten mukaan. Käsikirjana toimii opinnäytetyön luku 5 kokonaisuudessaan.

7 Keskustelu

Opinnäytetyön tarkoituksena oli parantaa olemassa olevaa oikosulkulaskentapohjaa ja selvittää generaattorin relesuojausta. Aluksi suunnitelmissa oli, että oikosulkulaskentapohjan tekeminen olisi vain pieni osa työstä. Aika nopeasti kuitenkin selveni, että se tulee viemään suunniteltua enemmän aikaa. Suurin osa työstä koostui eri laskentamenetelmiin tutustumisesta ja standardisoitujen tapojen tulkitsemisesta. Ensin selvitin miten vanha laskentapohja toimi ja mitä laskentamenetelmiä siinä käytettiin. Tämän selvennettyä aloin tutkia eri laskentamenetelmiä ja selvittää mitä kaikkea laskentapohjan tulisi laskea. Selvitin myös kaikki oikosulkuun kuuluvat vaiheet ja suureet. Kun olin tutustunut laskentamenetelmiin ja niihin kuuluviin eri osiin, rupesin kehittämään uutta laskentapohjaa. Toivomus tehtävänantajalta oli, että ulkonäkö olisi mahdollisimman samanlainen kuin vanhassa pohjassa, jotta vanhaa pohjaa käyttäneet henkilöt pystyvät helposti siirtymään uuden pohjan käyttöön. Näin ollen tein pohjasta ulkonäöllisesti melkein samanlaisen muutamilla lisäyksillä.

Laskentapohjan valmistuttua aloin tutustua relesuojaukseen. Alkuvaiheessa oli hieman haasteellista tietää mistä aloittaa, koska relesuojaukselle ei ole selkeitä ohjeita. Rupesin vertailemaan eri relevalmistajien ehdottamia suojauksia ja sain myös käyttööni Statkraftin norjalaiset vaatimukset. Näitä yhdistelemällä kokosin tarvittavat suojaustoiminnot ja näihin tuli muutama lisäys tehtävänantajan toivomuksesta. Kun olin selvittänyt tarvittavat suojaustoiminnot, aloin selvittää jokaisen suojan toimintaa. Kirjoitin jokaisesta suojasta lyhyen tekstin miten suoja yleisesti toimii, ja koska tehtävänantajan projekteissa useimmiten käytetään VAMP- ja ABB-generaattorisuojia, tein näiden suojien toiminnasta ja asetuksista myös ohjeet.

Oikosulkulaskentapohja tulee käyttöön projektien suunnittelijoille heidän mitoittaessa kojeistoja. Relesuojauksen ohjeet ovat pääosin tarkoitettu uusille suunnittelijoille, ja niistä he saavat nopeasti hyvät alkutiedot miten suojaus toteutetaan. Myös vanhemmat suunnittelijat voivat käyttää ohjetta suuntaa antavana tukena.

Koska oikosulkulaskentaan liittyvä osa oli paljon laajempi kuin mitä aluksi ajattelimme, jouduimme jättämään työstä pois tiettyjä osia. Suurin pois jätetty osa oli relesuojauslaskentaa varten tehtävä laskentapohja, jolla laskettaisiin relesuojien asetukset. Tämä on niin laaja aihe, että siitä voi jatkossa tehdä uuden opinnäytetyön.

Lähdeluettelo

ABB, 1986. *Generatorskydd applikationsguide AG03-4005*.

ABB, 2000. *TTT-käsikirja*.

ABB, 2010. *Rotor earth-fault protection with injection unit RXTTE4 and REG670*.

ABB, 2011. *Generator protection REG650 Technical manual*.

Alfredsson, A., 2003. *Elmaskiner. Kapitel 2 (Elkraftshandboken)(3)*. (2. painos) Stockholm:Liber

Alstom, 2011. *Network Protection & Automation Guide*

Alstom, [s.a.]. *Harjavalta excitation data sheet*.

C2ES, 2011, *Hydropower* [Online]

http://www.c2es.org/docUploads/Hydropower_0.pdf [Lainattu 20.3.2015]

Elovaara, J. & Laiho, Y., 2007. *Sähkölaitostekniikan perusteet*. (6. painos) Helsinki : Otatieto.

Energiateollisuus, 2014, *Sähkön tuotanto energialähteittäin 2013* [Online]

<http://www.energia.fi/energia-ja-ymparisto/sahkontuotanto> [Lainattu 20.3.2015]

Gamesa, 2012. *Skarg datasheet*.

Global hydro, 2000. *Rendalsvik aceo hydro generators electrical data*.

Hitzinger, 2009. *Julfoss parameter of the synchronous machine*.

Huotari, K., Partanen, J., 1998. *Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen*. Opetusmoniste, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, sähkötekniikan osasto.

IEC, 2001. *International Standard 60909-0 Calculation of currents*. Short-circuit currents in three-phase a.c. systems, 0.

Indar, 2009. *Synchronous generator protection guide*.

Indar, 2011. *Embla electrical data sheet*.

Indar, 2013. *Vittingfoss electrical data sheet*.

Jacobsson, K., A., 2003. *Elkraftsystem 1. Kapitel 8*. (Elkraftshandboken)(1). (2. painos) Stockholm:Liber

Kuhlin, L., [s.a.]. *Turbiner* [Online]

<http://vattenkraft.info/?page=41> [Lainattu 19.3.2015]

- Leroy Somer, 2010. *Ringdal generator data and curves*.
- Machowski, J., Bialek, J.W., & Bumby, J.R., 1997. *Power system dynamics and stability* Chichester, England:Wiley.
- Microelettrica Scientifica, 2014. *MCOA relay, data sheet*.
- Mörsky, J., 1992. *Relesuojatekniikka* (2. painos) Espoo:Otatiето.
- Norconsult, 2008. *Kongsvinger priser og data*.
- Renewables first, [s.a.]. *Kaplan turbines* [Online]
<http://www.renewablesfirst.co.uk/hydro-learning-centre/kaplan-turbines> [Lainattu 20.3.2015]
- Schlabbach, J., 2005. *Short-circuit Currents*. IET Power and Energy,51. London:The Institution of Engineering and Technology.
- Siemens, 2005. *Applications for SIPROTEC protection relays*.
- Statkraft, 2014. *Relévern Generelle krav*
- Strömberg, 1982. *Application guide for protection of synchronous machines*.
- TES Vsetín, 2014. *Rendalsvik technical specification*.
- The Shift Project, 2012, *World electricity production* [Online]
<http://www.tsp-data-portal.org/Breakdown-of-Electricity-Generation-by-Energy-Source> [Lainattu 20.3.2015]
- Tiesmäki, V., 2006. *Relesuojaus*. Fingrid Oy:n asiakaslehti, 2006(2), s. 26-27.
- Turbiinilaitosten turvallisuuskomitea, 1989. *Turbiinin ja generaattorin suojaus*. Otso.
- VAMP, 2011. *VAMP 210 Generator protection relay User manual*.
- VAMP, 2011. *VAMP 265 Transformer, generator and motor differential protection relay Operation and Configuration instructions*.
- VEO Academy, 2006. *Vesivoima*. Yrityksen sisäinen koulutusmateriaali.
- VEO Academy, 2013. *Generaattorin suojaus*. Yrityksen sisäinen koulutusmateriaali.
- Wasserkraft Volk WKV, 2013. *Kvitno technical data*.
- Weedy, B., M., Cory, B., J., 1998. *Electric power systems* (4. painos). Chichester, England:Wiley.

Winell, L., 2012. *Elkraftsystem 2. Kapitel 6.3.* (Elkraftshandboken)(2). (3. painos) Stockholm:Liber

Öhlén, C., 2003. *Elkraftsystem 1. Kapitel 12.* (Elkraftshandboken)(1). (2. painos) Stockholm:Liber

Liitteet

Generaattorin alkuoikosulkuvirta

Vittingfoss generaattori 1

IEC menetelmällä

Generaattorin kilpiarvot:

$$X_d = 95,1 \quad U_n = 5,5kV$$

$$X'_d = 32,1 \quad S_n = 17MVA$$

$$X''_d = 22,1 \quad \cos\varphi = 0,86$$

käyttäen kaavaa 3.11 saadaan generaattorin reaktanssin arvot.

$$X_d = \frac{95,1}{100} \cdot \frac{5,5^2kV}{17MVA} = 1,692\Omega$$

$$X'_d = \frac{32,1}{100} \cdot \frac{5,5^2kV}{17MVA} = 0,571\Omega$$

$$X''_d = \frac{22,1}{100} \cdot \frac{5,5^2kV}{17MVA} = 0,393\Omega$$

Korjauskerroin saadaan kaavalla 3.12

$$K_G = \frac{5,5kV}{5,5kV} \cdot \frac{1,1}{1+0,221 \cdot \sin(\arccos(0,86))} = 0,9885$$

Generaattorin korjattu impedanssi kaavalla 3.13

$$Z_{GK} = 0,393\Omega \cdot 0,9885 = 0,3885\Omega$$

Generaattorin alkuoikosulkuvirta kaavalla 3.9

$$I''_{k3} = \frac{1,1 \cdot 5,5kV}{\sqrt{3} \cdot 0,3885\Omega} = 8991,4A \approx 8,99kA$$

Ominaisoikosulkuteholla

Generaattorin ominaisoikosulkuteho kaavalla 3.4

$$S_k = \frac{17MVA}{22,1\%} = 76,92MVA$$

Generaattorin alkuoikosulkuvirta kaavalla 3.7

$$I''_{k3} = \frac{1,1 \cdot 76,92MVA}{\sqrt{3} \cdot 5,5kV} = 8819,6A \approx 8,88kA$$

Ero: $8991,4A - 8819,6A = 171,8A \approx 2\%$

Ringdal generaattori 1

IEC menetelmällä

Generaattorin kilpiarvot:

$$X_d = 146,9 \quad U_n = 6,6kV$$

$$X'_d = 28,0 \quad S_n = 3,4MVA$$

$$X''_d = 17,9 \quad \cos\varphi = 0,9$$

käyttäen kaavaa 3.11 saadaan generaattorin reaktanssin arvot.

$$X_d = \frac{146,9}{100} \cdot \frac{6,6^2kV}{3,4MVA} = 18,833\Omega$$

$$X'_d = \frac{28,0}{100} \cdot \frac{6,6^2kV}{3,4MVA} = 3,587\Omega$$

$$X''_d = \frac{17,9}{100} \cdot \frac{5,5^2kV}{17MVA} = 2,293\Omega$$

Korjauskerroin saadaan kaavalla 3.12

$$K_G = \frac{6,6kV}{6,6kV} \cdot \frac{1,1}{1+0,179 \cdot \sin(\arccos(0,9))} = 1,020$$

Generaattorin korjattu impedanssi kaavalla 3.13

$$Z_{GK} = 2,293\Omega \cdot 1,020 = 2,339\Omega$$

Generaattorin alkuoikosulkuvirta kaavalla 3.9

$$I''_{k3} = \frac{1,1 \cdot 6,6kV}{\sqrt{3} \cdot 2,339\Omega} = 1792,1A \approx 1,79kA$$

Ominaisoikosulkuteholla

Generaattorin ominaisoikosulkuteho kaavalla 3.4

$$S_k = \frac{3,4MVA}{17,9\%} = 18,99MVA$$

Generaattorin alkuoikosulkuvirta kaavalla 3.7

$$I'''_{k3} = \frac{1,1 \cdot 18,99MVA}{\sqrt{3} \cdot 6,6kV} = 1827,3A \approx 1,83kA$$

Ero: $1792,1A - 1827,3A = -171,8A \approx 2\%$

Embla generaattori 1

IEC menetelmällä

Generaattorin kilpiarvot:

$$X_d = 132,5 \quad U_n = 6,6kV$$

$$X'_d = 26,1 \quad S_n = 5,5MVA$$

$$X''_d = 16,8 \quad \cos\varphi = 0,9$$

käyttäen kaavaa 3.11 saadaan generaattorin reaktanssin arvot.

$$X_d = \frac{132,5}{100} \cdot \frac{6,6^2kV}{5,5MVA} = 10,494\Omega$$

$$X'_d = \frac{26,1}{100} \cdot \frac{6,6^2kV}{5,5MVA} = 2,067\Omega$$

$$X_d = \frac{16,8}{100} \cdot \frac{6,6^2kV}{5,5MVA} = 1,331\Omega$$

Korjauskerroin saadaan kaavalla 3.12

$$K_G = \frac{6,6kV}{6,6kV} \cdot \frac{1,1}{1+0,168 \cdot \sin(\arccos(0,9))} = 1,025$$

Generaattorin korjattu impedanssi kaavalla 3.13

$$Z_{GK} = 1,331\Omega \cdot 1,025 = 1,364\Omega$$

Generaattorin alkuoikosulkuvirta kaavalla 3.9

$$I''_{k3} = \frac{1,1 \cdot 6,6kV}{\sqrt{3} \cdot 1,364\Omega} = 3072,4A \approx 3,07kA$$

Ominaisoikosulkuteholla

Generaattorin ominaisoikosulkuteho kaavalla 3.4

$$S_k = \frac{5,5MVA}{16,8\%} = 32,74MVA$$

Generaattorin alkuoikosulkuvirta kaavalla 3.7

$$I''_{k3} = \frac{1,1 \cdot 32,74MVA}{\sqrt{3} \cdot 6,6kV} = 3150,4A \approx 3,15kA$$

$$\text{Ero: } 3072,4A - 3150,4A = -78A \approx 2,5\%$$

Kiskoston alkukoivokuvirta

Skarg

Alustavat tiedot:

Generaattori 1 kilpiarvot:

$$S_n = 13,509 \text{ MVA}$$

$$U_n = 6,9 \text{ kV}$$

$$\cos\varphi = 0,86$$

$$x_d'' = 0,18$$

Generaattori 2 kilpiarvot:

$$S_n = 13,509 \text{ MVA}$$

$$U_n = 6,9 \text{ kV}$$

$$\cos\varphi = 0,86$$

$$x_d'' = 0,18$$

Muuntajan kilpiarvot:

$$S_n = 25 \text{ MVA}$$

$$U_{n1}/U_{n2} = 66 \text{ kV}/6,9 \text{ kV}$$

$$u_k = 14\%$$

Verkon tiedot:

$$S_{kv}'' = 2087,4 \text{ MVA}$$

$$U_n = 66 \text{ kV}$$

Verkon oikosulkuimpedanssi kaavalla 3.19.

$$Z_{kv} = \frac{1,1 \cdot 66^2 \text{ kV}}{2087,4 \text{ MVA}} = 2,296 \Omega$$

Muunnetaan ensiöstä toisioon.

$$Z_{kv}' = \frac{1}{(66/6,9)^2 \text{ kV}} \cdot 2,296 \Omega = 0,025 \Omega$$

Muuntajan oikosulkuimpedanssi kaavalla 3.14.

$$Z_t = \frac{14\% \cdot 6,9^2 \text{ kV}}{100\% \cdot 25 \text{ MVA}} = 0,267 \Omega$$

Muuntajan impedanssin korjauskerroin kaavalla 3.17

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1+0,6 \cdot 0,14} = 0,964$$

Muuntajan korjattu impedanssi $Z_{kt} = Z_t \cdot K_T = 0,267 \Omega \cdot 0,964 = 0,257 \Omega$

Tässä tapauksessa on kaksi identtistä generaattoria joten $X_{G1} = X_{G2}$ joka saadaan kaavalla 3.11.

$$X_{G1} = 0,18 \cdot \frac{6,9^2 \text{ kV}}{13,509 \text{ MVA}} = 0,634 \Omega$$

Generaattorin impedanssin korjauskerroin kaavalla 3.12

$$K_G = \frac{6,9 \text{ kV}}{6,9 \text{ kV}} \cdot \frac{1,1}{1+0,18 \cdot \sin(\arccos 0,86)} = 1,007$$

Generaattorin korjattu impedanssi $X_{G1k} = X_{G1} \cdot K_G = 0,634 \Omega \cdot 1,007 = 0,638 \Omega$

Vikapisteen oikosulkuimpedanssi = 0,1497

Kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta kaavalla 3.9

$$I''_{k3} = \frac{1,1 \cdot 6,9kV}{\sqrt{3} \cdot 0,1497} = 29,27kA$$

Ominaisoikosulkuteholla

Generaattori 1 ominaisoikosulkuteho kaavalla 3.4

$$S_{kG1} = \frac{13,509MVA}{18\%} = 75,05MVA$$

Generaattori 2 ominaisoikosulkuteho kaavalla 3.4

$$S_{kG2} = \frac{13,509MVA}{18\%} = 75,05MVA$$

Muuntajan ominaisoikosulkuteho kaavalla 3.4

$$S_{kt} = \frac{25MVA}{14\%} = 178,6MVA$$

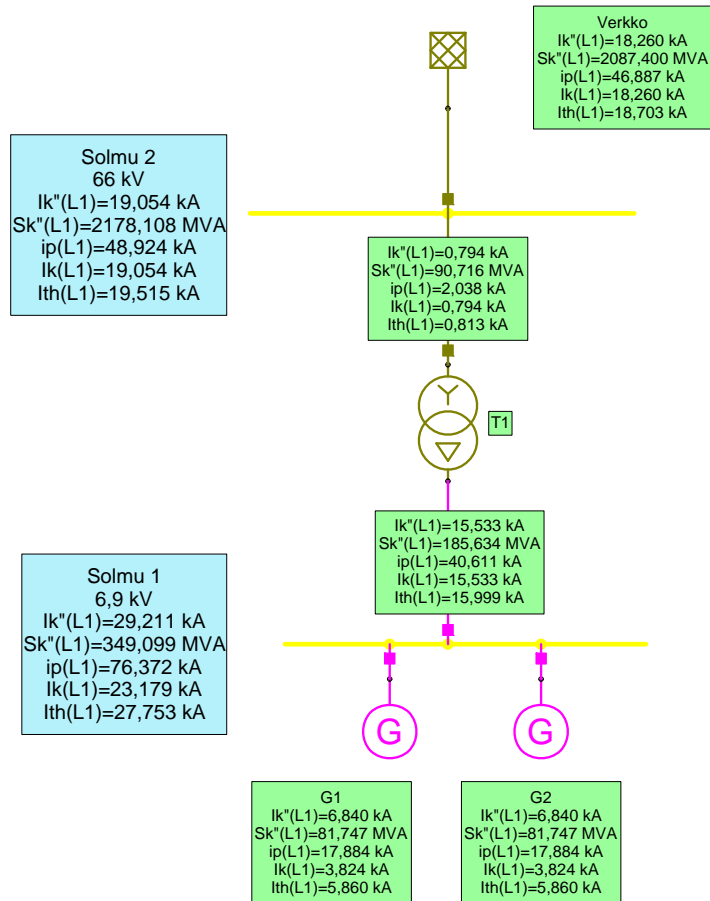
Vikapisteen kokonaisoikosulkuteho

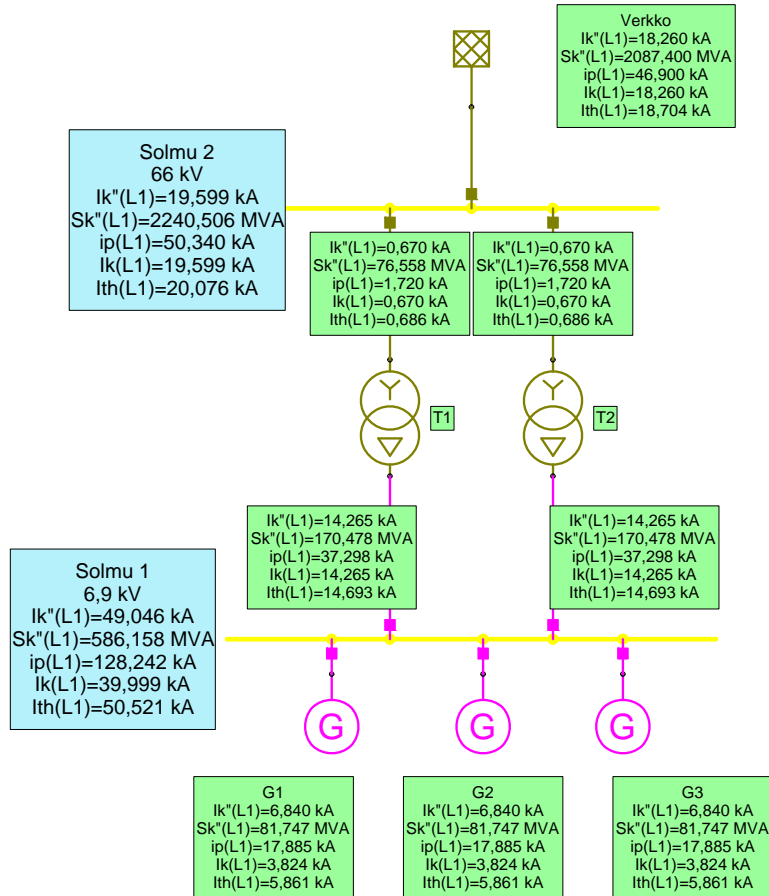
$$S_k = \frac{1}{\frac{1}{S_{kv}} + \frac{1}{S_{kt}}} + S_{kG1} + S_{kG2} = 314,6MVA$$

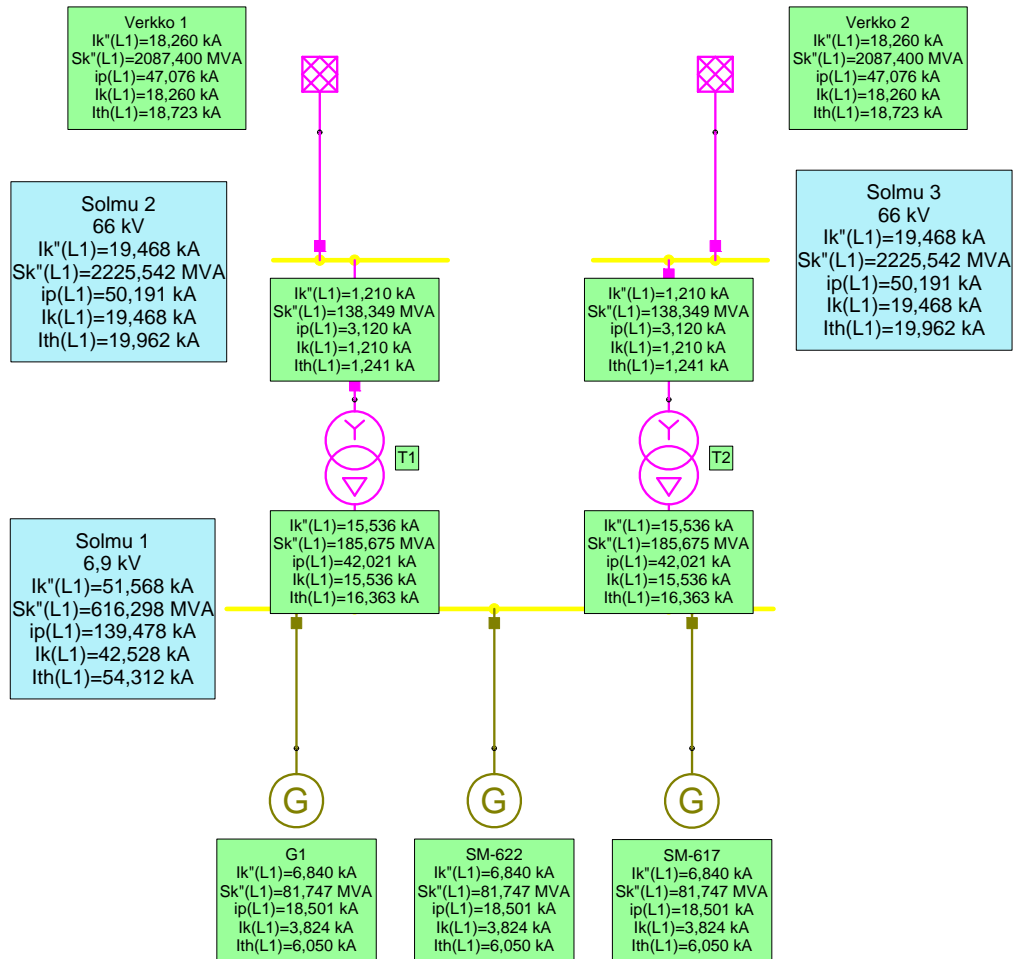
Kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta kaavalla 3.7

$$I''_{k3} = \frac{1,1 \cdot 314,6MVA}{\sqrt{3} \cdot 6,9kV} = 28,96kA$$

Ero: $29,27kA - 28,96kA = 0,31kA \approx 1\%$







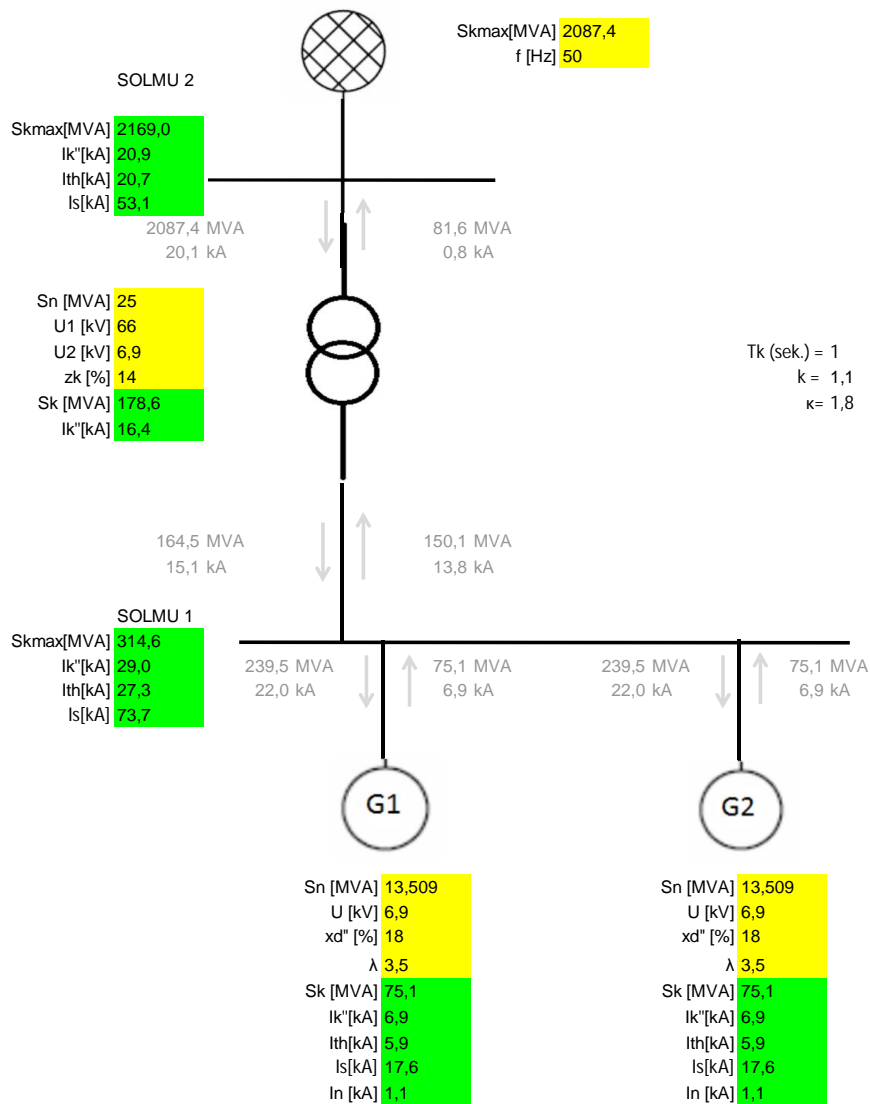
MITOITUSPÖYTÄKIRJA
OIKOSULKU



VEO Projektinumber / Asiakas: _____
 ASIAKKAAN Projektinumber / Projektinimi: _____
 Projektinimi: _____
 Suunnitteli / päivämäärä: _____

Fill in

Results



MITOITUSPÖYTÄKIRJA

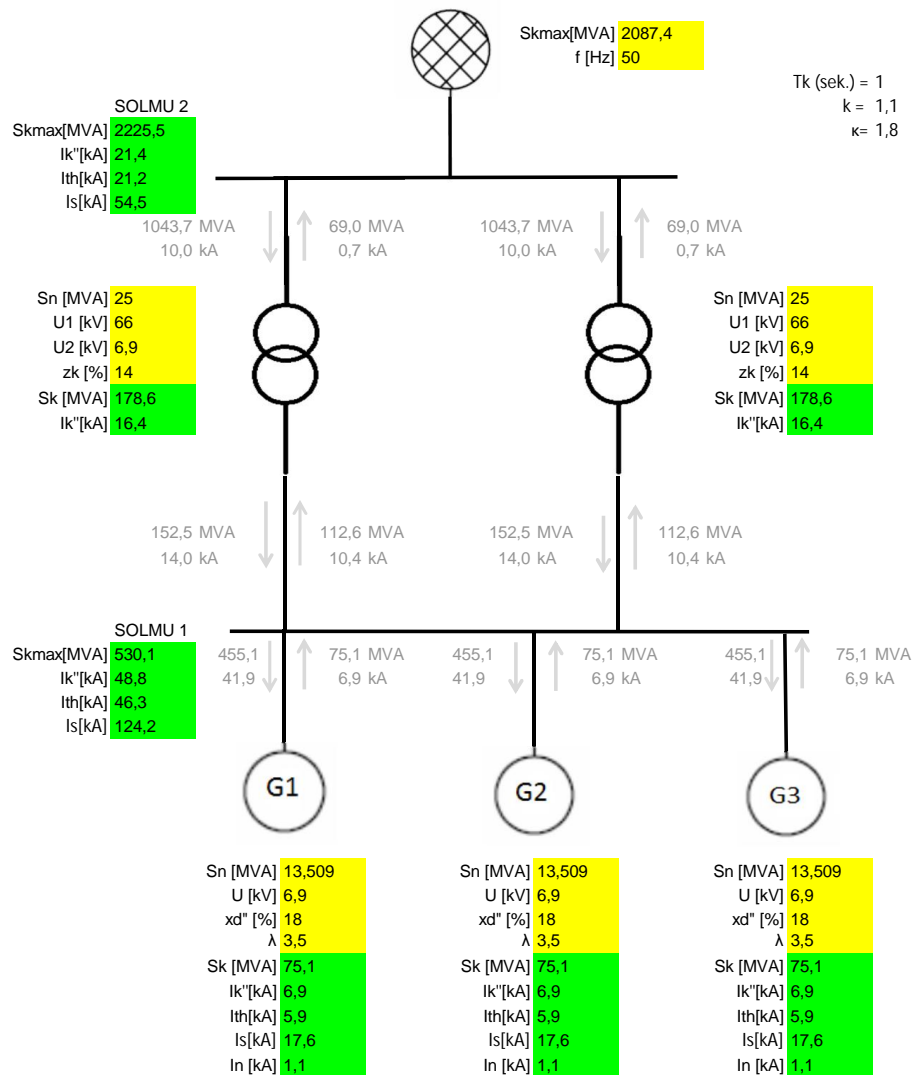
Oikosulku



VEO Projektinumbero / Asiakas _____
 ASIAKKAAN Projektinumbero / Projektinimi: _____
 Projektinimi: _____
 Suunnitteli / päivämäärä: _____

Fill in

Results



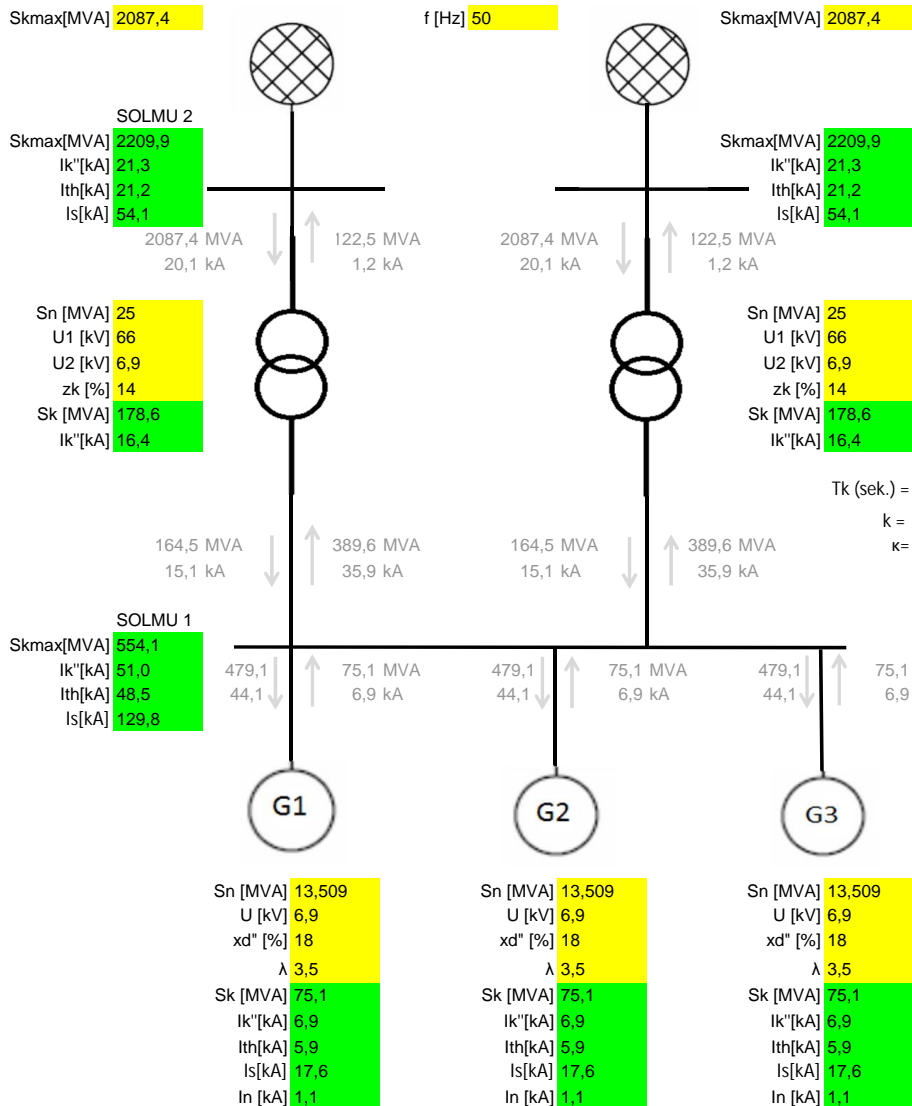
MITOITUSPÖYTÄKIRJA
Oikosulku

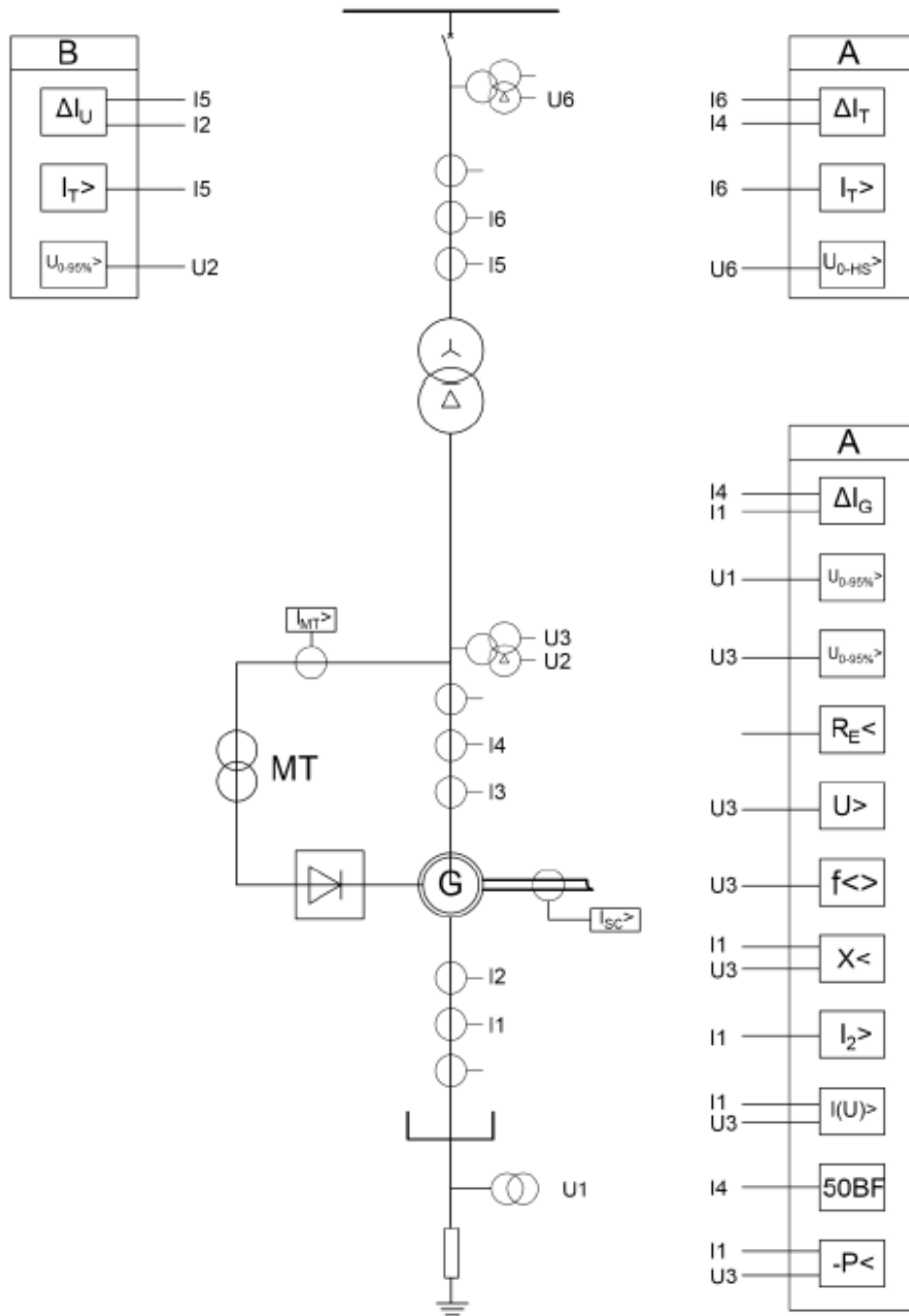


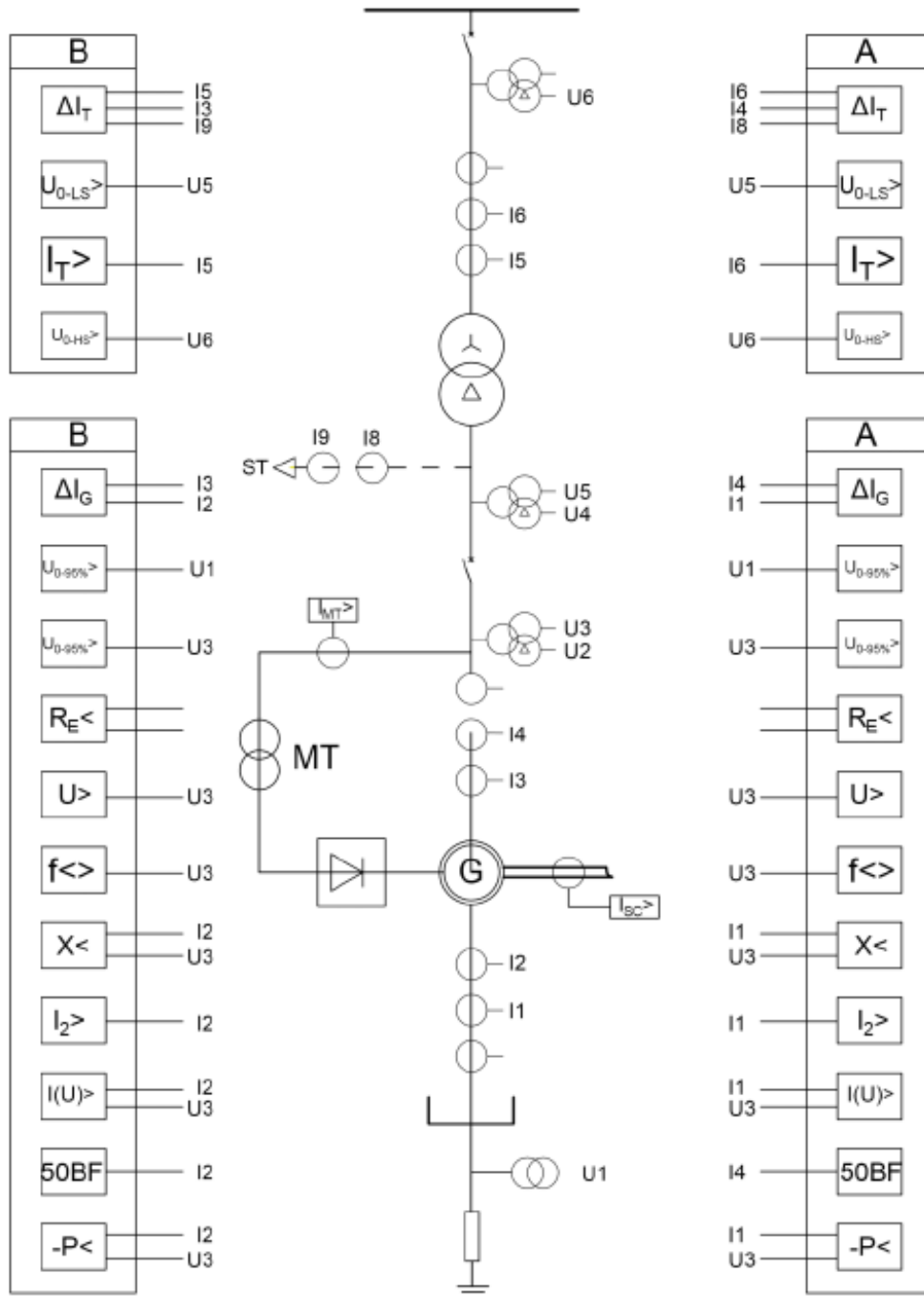
VEO Projektinumbero / Asiakas _____
 ASIAKKAAN Projektinumbero / Projektinimi: _____
 Projektinimi: _____
 Suunnitteli / päivämäärä: _____

Fill in

Results







Siprotec suojaus ehdotukset

Suojausfunktio	Generaattorin teho		
	5-50MVA	50-200MVA	>200MVA
Staattorin maasulku 90%	✘	✘	✘
Staattorin maasulku 100%		✘	✘
Erovirta	✘	✘	✘
Vakioaikaylivirta	✘	*	*
Impedanssi		✘	✘
Roottorin maasulku	✘	✘	✘
Vinokuormitus	✘	✘	✘
Alimagnetointi	✘	✘	✘
Epätahti		*	✘
Staattorin ylikuorma	✘	✘	✘
Roottorin ylikuorma			✘
Ylijännite	✘	✘	✘
Alitajuus $f >$	✘	✘	✘
Ylitajuus $f <$	✘	✘	✘
Takateho	✘	✘	✘
Alijännite	☐	☐	☐
Ylimagnetointi	*	✘	✘

(Siemens, 2005, s.196)

- ✘ = Käytettävissä
 * = Valinnainen
 ☐ = Pumppuvoimalaitos

Indar suojausohdotukset

Suojausfunktio
Differential protection
Ground protection
Loss of field
Overexcitation:(AVR)
Subexcitation: alarm
Sub/Overfrequency
Reverse Power
Unbalanced load
Inadvertent energization
Overload/Overcurrent
Sincronizing:(25c(Check), 25A(auto Synch))
Out of step
Overvoltage
Undervoltage

(Indar, 2009, s.3)

Taulukko 1: ABB suojausohdotukset

Suojausfunktio	Ilmajäähdytys < 5MVA	Ilmajäähdytys 50-200MVA	Ilmajäähdytys 20-80MVA	Ilmajäähdytys 80-600MVA	Vesijäähdytetty staattori 300-600MVA
95% staattorin maasulku	✖	✖	✖	✖	✖
100% staattorin maasulku					
Roottorin maasulku	✖	✖	✖	✖	✖
Generaattori erovirta	✖	✖	✖	✖	✖
Blokkimurtaja erovirta	✖	✖	✖	✖	✖
Aliimpedanssi	✖	✖	✖	1	1
Terminen ylikuormitusuoja - staattori				✖	✖
Terminen ylikuormitusuoja - roottori				✖	✖
Vinokuorma		2	2	✖	✖
Alimagnetointi		3	✖	✖	✖
Ylijännite	✖	✖	✖	✖	✖
Laahevirta		3	✖	✖	✖
Aliftaajius	4	4	4	4	4
Takateho	5	5	5	✖	✖
Daad-machine				✖	✖
Kierrosilukvalvonta	✖	✖	✖	✖	✖
Lämpötilanvalvonta	✖	✖	✖	✖	✖
Välösaarivalvonta			6	6	6

(ABB, 1986, s.22)

- 1 Generaattoreille <250MVA
- 2 Jos on vinokuormituksen riski
- 3 Generaattoreille >10MVA
- 4 Rippuu verkosta ja turbiiniregulaattorin ominaisuuksista
- 5 Generaattoreille joissa on Kaplan tai putki turbiini
- 6 Generaattoreille joissa on liukurenkaat kenttäpiirissä

