



TAMPEREEN  
AMMATTIKORKEAKOULU

# STATCOM-DEMONSTRAATTORIN SUOJAUS

Mikael Kotilainen

Opinnäytetyö  
Elokuu 2017  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Sähkövoimatekniikka



## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Sähkövoimatekniikka

KOTILAINEN, MIKAEL:  
STATCOM-demonstraattorin suojaus

Opinnäytetyö 67 sivua, joista liitteitä 15 sivua  
Elokuu 2017

---

Opinnäytetyössä selvitettiin STATCOM-demonstraattorin (Static Synchronous Compensator, staattinen synkronikompensointilaite) käyttötarkoitus ja toimintaperiaate. Työssä määritettiin keskijännitekaapeli laitteistoa varten sekä esitettiin laitevalintoja esilatauspiiriä varten. Mitoituksen lisäksi tutkimuksen kohteena oli STATCOM-laitteiston suojausten tarkastelu.

Tarkoituksena oli tutkia laitteiston suojausten selektiivisyyttä ja määrittää jakeluverkon suojaukseen vaikuttavat tekijät. Tarkastelun tarkoituksena oli saada selville suojausten selektiivisyys. Suojausten osalta jakeluverkon asettamat vaatimukset ja rajoitukset selvitettiin ja perehdyttiin käytettäviin suojalaitteisiin. Suojausten selektiivisyyttä tarkasteltiin ST 53.13 -kortin mukaisesti. STATCOM-demonstraattorin suojana käytettiin numeerisia suojausalueita. Jakeluverkon suojaus toteutettiin selektiivisesti kolmella eri portaalla.

Koska suojausten väliset porrassijat olivat tarpeettoman suuria, suojausalueiden asetteluita oli muutettava. STATCOM-laitteiston suojausalueiden asetteluita muutettaessa huomioitiin myös STATCOMia syöttävä muuntaja, jotta se ei aiheuttaisi suojausten laukaisua. Samalla STATCOM-demonstraattorin käyttökapasiteettia oli mahdollista kasvattaa.

## **ABSTRACT**

Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Electrical Engineering  
Electrical Power Engineering

KOTILAINEN, MIKAEL:  
STATCOM and the Review of its Selectivity

Bachelor's thesis 67 pages, appendices 15 pages  
August 2017

---

The purpose of this thesis was to clarify the meaning and function of the STATCOM Demonstrator. Part of this thesis was to determine appropriate medium voltage cable and equipment for the pre-charge circuit for the demonstrator. The STATCOM hardware protection was studied to investigate the selectivity of the protection and to determine the factors, which affect the distribution network protection.

The connection between the STATCOM demonstrator and the distribution network was to be implemented with the appropriate cable. The purpose of hardware protection review was to find out its selectivity as the limits set by the hardware protection to determine the use of the STATCOM demonstrator. In terms of protection, the requirements and limitations set by the distribution network were investigated. The selectivity of the protection was examined in accordance with ST 53.13. The STATCOM Demonstrator was protected by numeric protection relays in three different stages. The Protection of the distribution network was implemented selectively.

The shutter speed of the protective relay was longer than needed and the switching power supply of the STATCOMs coupling transformer could trigger the protective relay. The protection settings of the relay were changed to prevent triggering of the protection relay so that the STATCOM demonstrator could be increased.

---

Key words: STATCOM, pre-charge circuit, selectivity, distribution network, shutter speed

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	STATCOM.....	8
	2.1 STATCOM sähköverkossa .....	8
	2.2 Rakenne .....	9
	2.3 Toimintaperiaate .....	10
	2.4 STATCOM-Demonstraattori .....	13
3	MITOITUS .....	15
	3.1 Suunnittelun lähtökohdat .....	15
	3.2 Kaapelin mitoittaminen.....	17
	3.3 Esilatauspiiri .....	21
	3.3.1 Kondensaattorit ja latausvastus .....	22
	3.3.2 Erotin.....	23
4	STATCOM SIMULOINTI.....	24
	4.1 Käynnistys- käyttötilanteet .....	24
	4.2 Vikatilanteet.....	25
5	OIKOSULKUVIRTASUOJAUS .....	27
	5.1 Muuntajalähdön suojaus .....	27
	5.2 Kiskosuojaus .....	28
	5.3 Jakeluverkon johtosuojaus .....	29
	5.4 Aikaselektiivinen suojaus .....	29
	5.5 Oikosulkuvirtojen laskentaan tarvittavia suureita.....	30
	5.6 Esimerkki oikosulkuvirtalaskennasta .....	35
6	TEHTAAN KESKIJÄNNITEVERKON SUOJAUS.....	38
	6.1 Verkon suojaus yleisesti .....	38
	6.2 Verkon rakenne .....	38
	6.3 Verkon komponentit .....	39
	6.3.1 Katkaisijat .....	39
	6.3.2 Muuntajat .....	39
	6.3.3 Virtamuuntajat.....	39
	6.3.4 Kaapeli .....	40
	6.4 Ylivirtasuojauksen tarkastelu.....	40
	6.5 Relesuojaus .....	41
	6.6 Selektiivisyys .....	43
	6.7 Selektiivisyystarkastelu .....	44
	6.8 Laitteiston uuden suojauksen parametrit .....	46
7	POHDINTA.....	48

LÄHTEET .....	50
LIITTEET .....	52
Liite 1. Jakelukaavio.....	52
Liite 2. STATCOM-testitilan layout. ....	53
Liite 3. Voimakaapelin teknisiä tietoja. ( <a href="https://www.reka.fi">https://www.reka.fi</a> ) .....	54
Liite 4. Simulointitulokset. (Lavapuro J. 2017. STATCOM demonstrator start up and fault study) .....	55
Liite 5. Oikosulkuvirta 20 kV-kiskostolla.....	56
Liite 6. Oikosulkuvirta muuntajan T03 yläjännitepuolella .....	57
Liite 7. Oikosulkuvirta 6 kV-kiskostolla.....	58
Liite 8. Oikosulkuvirta muuntajan T04 yläjännitepuolella .....	59
Liite 9. Merlin Gerin SFset -katkaisijan kilpiarvot .....	60
Liite 10. Uniswitch CBC -kojeiston kilpiarvot .....	61
Liite 11. HD4/S Circuit-Breaker -katkaisijan kilpiarvot .....	62
Liite 12. Muuntajan T04 tekniset tiedot .....	63
Liite 13. Muuntajan T03 kilpiarvot .....	64
Liite 14. Suojareleiden asettelut .....	65
Liite 15. AHXAMK-W -keskijännitekaapelin teknisiä tietoja.....	67

## LYHENTEET JA TERMIT

FACTS	Flexible AC Transmission System
AC	vaihtosähkö
STATCOM	staattinen synkronikompensaattori
VSC	jännitelähdemuunnin
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor, bipolaaritransistori
PWM	pulssinleveysmodulaatio
$U_0$	STATCOMin lähtöjännite, V
$U_V$	vaihejännite, V
$X_T$	muuntajan vuoreaktanssi, $\Omega$
$I_q$	loisvirta, A
$Q_0$	STATCOMin tuottama loisteho, Var
DC	tasasähkö
$P$	pätöteho, W
$I>$	ensimmäinen laukaisuporras
$I>>$	toinen laukaisuporras
$I>>>$	kolmas laukaisuporras
NI	Normal Inverse -toimintakäyrä
VI	Very Inverse toimintakäyrä
EI	Extremely Inverse toimintakäyrä
LTI	Long Time Inverse toimintakäyrä

## 1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä selvitetään STATCOM-demonstraattorin suojauksen selektiivisyyttä ja relesuojauksen parametreja. Tutkimuksen perusteella arvioidaan demonstraattorin sähköverkon kompensointimahdollisuuksia. Työn toimeksiantajana on kansainväliseen teknologia-alan konserniin kuuluva Pirkanmaalla toimiva yritys, joka suunnittelee omaa FACTS- eli Flexible AC Transmission System -tuoteperheeseen kuuluvaa STATCOM-laitteistoa. Yrityksen aikaisemmat tuotteet ovat sähköverkkojen kompensointijärjestelmiä, joihin myös STATCOM lukeutuu. Yritys rakentaa demonstraattori-laitteiston Tampereen Myllypurossa sijaitsevalle tehtaalleen. STATCOM-demonstraattori tulee sijaitsemaan testitilassa, jossa siihen liittyviä testejä suoritetaan. Tämän lisäksi demonstraattoria voidaan esitellä mahdollisille asiakkaille.

Opinnäytetyö liittyy laitteiston parissa tehtyyn mitoitus-, suunnittelu- ja tutkimustyöhön. Työssä kerrotaan ensinnäkin laitteiston kaapeloinnista ja kaapelireittien suunnittelusta ja mitoittamisesta. Kaapelit mitoitettiin noudattaen SFS-6000 – standardeja. Lisäksi opinnäytetyössä perehdytään esilatauspiirin suunnitteluun. Tämän raportin kannalta keskeisin aihealue on STATCOM-demonstraattorin suojauksen ja suojauksen selektiivisyyden tarkastelu, joiden perusteella laitteiston tarkempi käyttö määritellään. Tutkimusta varten aineistoa on kerätty työskenneltäessä STATCOM-demonstraattori hankkeen parissa. Lisäksi lähteinä on käytetty kansainvälistä kirjallisuutta, tieteellisiä artikkeleita ja aihetta koskevia raportteja.

Aiheena STATCOM on erittäin ajankohtainen, koska siirto- ja jakeluverkkojen loistehon kompensointi on tullut entistä tärkeämmäksi. Loistehoa synnyttäviä kuormia on verkossa runsaasti ja niiden kompensointi pitkillä etäisyyksillä aiheuttaa sähkövoimajärjestelmälle epätyypillisiä häiriöitä, jotka voivat johtaa verkon stabiiliuden menettämiseen, jota ylläpidetään tarkalla säätelyllä. Häiriöiden estämiseksi koko sähköverkon kapasiteettiä ei käytetä ja siirtojohtoja alikuormitetaan. Teollisuus on suuren sähkötehon kulutuksen takia panostanut käyttämänsä sähkön kompensointiin pienentämällä loistehon ja kasvattamalla pätötehon osuutta kulutetusta näennäistehosta. Kompensointi suoritetaan siirtojohtojen täyden kapasiteetin saavuttamiseksi. Kompensointi voidaan tehdä käyttäen perinteisten kondensaattoriparistojen lisäksi teollisuuslaitoksen jakeluverkon pääjakelukiskon rinnalle kytkettyä STATCOM-laitteistoa.

## 2 STATCOM

Sähkösiirtoverkkojen yhdistäminen sekä uusiutuvien ja hajautettujen energiantuotanto-voimaloiden lukumäärä on kasvanut nopeasti luoden uusia haasteita sähkösiirron käytövarmuudelle. Loistehon kompensointijärjestelmillä sähköverkkojen luotettavuutta ja sähkön laatua voidaan parantaa. Kompensoinnin tarkoituksena on mahdollistaa sähköverkon koko kapasiteetin käyttö.

Loistehon kompensointi on aikaisemmin toteutettu mekaanisesti kytkettävillä kondensaattoreilla ja kuristimilla. Nykyaikaiset verkon kuormat ovat kuitenkin osoittautuneet ongelmallisiksi mekaanisille kompensointisovelluksille. Uuden sukupolven loistehon kompensointit tarjoavat toimivia ratkaisuja nopeiden vasteaikojen perusteella.

Maailman ensimmäinen kaupallinen STATCOM kehitettiin Mitsubishi Electric Power Products Inc. toimesta ja otettiin käyttöön Japanissa vuonna 1991. (Acharya, N. 2005.). Sovellus ei siis itsessään ole täysin uusi, mutta kehittyneen teknologian ja etenkin teollisuuden sähköverkkojen muutokset ovat saaneet aikaan tarpeen kehittää STATCOM-sovellusta pidemmälle.

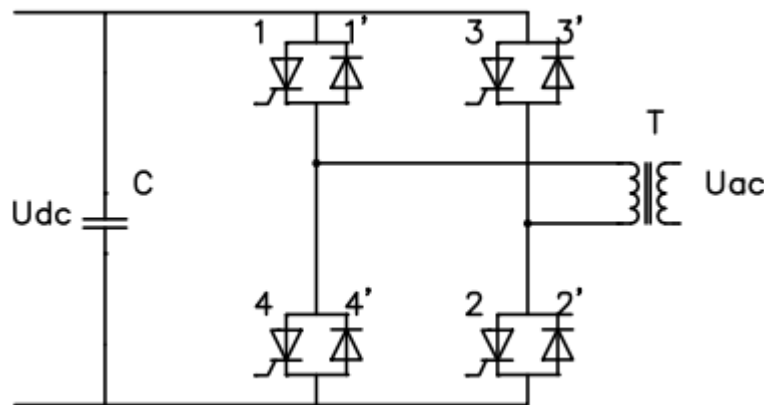
### 2.1 STATCOM sähköverkossa

Sähköverkosta saatavan sähkön laadun parantamiseen tarkoitettu FACTS-tuoteperheen yksi tärkeimmistä laitteista on STATCOM. Konseptin ideana on tehoelektroniikkaa hyödyntävien säätöjärjestelmien käyttö sähkösiirtoverkossa. FACTS-säätimien avulla siirtoverkkoa olisi mahdollista kuormittaa lähelle siirtojohtojen termistä kestävyyttä ilman, että verkon stabiilius menetettäisiin.

STATCOM suunniteltiin aluksi siirtoverkkoon käytettäväksi, mutta sitä on kuitenkin alettu käyttää myös sähkönjakeluverkossa. Siirto- ja jakeluverkon STATCOMit ovat rakenteeltaan samanlaisia, mutta niiden käyttötarkoitukset kuitenkin eroavat toisistaan. Siirtoverkossa STATCOM parantaa verkon stabiiliisuutta ja kuormitettavuutta. Jakeluverkossa sen pääasiallinen tehtävä on sähkön laadun parantaminen.

## 2.2 Rakenne

Tärkein komponentti STATCOM-laitteistossa on jännitelähdemuunnin, eli VSC-moduuli. Tässä projektissa käytetään jännitevälipiirillisiä jännitelähdemuuntimia, jotka koostuvat vaihtosuuntaajista (kuva 1). Jännitevälipiiri muodostetaan tasajännitekondensaattorilla, joka toimii myös jännitelähteenä tasajännitepuolella. Jännitevälipiirissä jännite pysyy lähes vakiona.



KUVA 1. Yksivaiheinen jännitevälipiirillinen vaihtosuuntaaja tyristoriohjauksella (Hingorani N G, Gyugyi L. 2000 s. 71)

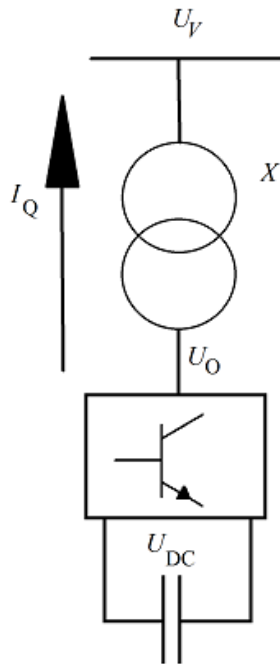
Kytkinlaitteina voidaan käyttää tyristoreita ja IGBT-transistoreita. Tyristoriohjatut STATCOM:it toimivat siirtoverkon kompensointilaitteina ja jakeluverkon STATCOM:eissa käytetään IGBT-transistoreita, joilla muodostetaan tasajännitelähteestä vaihtojännitettä ulostulolle hyödyntäen hakkuritekniikkaa ja pulssinleveysmodulaatiota (PWM, Pulse-Width Modulation). Kytinkomponenteille annetaan yhden verkonjakson puolikkaan aikana useita kytkentäpulsseja, joilla tuotetaan pulssimaista vaihtojännitettä tasajännitteestä. Tuotetun pulssimaisen kanttiaallon aikajatkuvasti muuttuva hetkellinen keskiarvo vaihtelee mukaillen sinimuotoisen jännitteen vaihtelua. PWM-ohjauksesta syntyy siten yliaalloja, jotka ovat lähellä suuntaajan kytkentätaajuutta (Hietalahti L. 2011). Suuritaajuiset yliaallot ovat vähemmän haitallisia ja ne on helppo suodattaa, siksi kytkentätaajuuden halutaan olevan mahdollisimman korkea, muutaman kilohertsin luokkaa. VSC-moduulin AC-puoli liitetään sähköverkkoon muuntajan kautta. Liitäntäpisteen lisäksi muuntajan tehtävänä on suodattaa jännitelähdemuuntimen toiminnasta syntyvät suurimmat yliaallot. (Hingorani N G, Gyugyi L. 2000 s.64).

Kuvan 1 esimerkin yksivaiheisesta jännitevälipiirillisestä vaihtosuuntaajasta tehdään kolmivaiheinen lisäämällä siihen yksi kytkinpari lisää. Yksittäisessä kolmivaiheisessa vaihtosuuntaajassa on haara jokaiselle kolmelle vaiheelle. Vaiheet toimivat 120 asteen vaihesiirrossa toisiinsa nähden ja haarojen ylempi ja alempi kytkinkomponentti johtaa puolet jännitteen verkkojaksosta (Hingorani N G, Gyugyi L. 2000 s.74). Kolmivaiheinen vaihtosuuntaaja, eli 6-pulssisuuntaaja ei sovellu sellaisenaan STATCOM-käyttöön. Suuntaaja yksiköitä kytketään keskenään sarjaan ja niistä muodostetaan jännitelähdemuuntimia. Useasta vaihtosuuntaajasta koostuvia jännitelähdemuuntimia kytketään keskenään käyttäen H-siltakytkentää. Vaihtosuuntaajien toimintaperiaate pysyy samana.

### 2.3 Toimintaperiaate

STATCOM tuottaa tai kuluttaa loistehoa. Jännitelähdemuunnin tuottaa vaihtojännitettä, jonka suuruutta ja vaihekulmaa voidaan säätää. Loistehon tuottaminen ja kuluttaminen perustuu jännitelähdemuuntimen ulostulojännitteen säätämiseen suhteessa verkon jännitteeseen. Laitteiston tuottama loisteho on lineaarisesti riippuvainen syöttävän verkon jännitteestä, mikä mahdollistaa suurehkojen loisvirtojen tuottamisen alhaisilla verkkojännitteillä.

Jännitelähdemuuntimen ulostulojännitteen  $U_O$  amplitudin suhde verkon jännitteen  $U_V$  amplitudiin määrää laitteiston loistehon tuottamisen tai kuluttamisen. STATCOM tuottaa loistehoa sen lähtöjännitteen ollessa suurempi kuin verkkojännitteen. Laitteisto kuluttaa loistehoa verkkojännitteen ollessa STATCOMin lähtöjännitettä suurempi. STATCOM:in tehontuottamisen laskukaavoissa suureet ovat suhteellisina arvoina, jotta jännitelähdemuuntimen ja verkon välissä olevan muuntajan muuntosuhdetta ei tarvitse huomioida. Jännitteiden  $U_O$  ja  $U_V$  oletetaan olevan samassa vaiheessa. Muuntajaa, jolla STATCOM liitetään jakeluverkkoon, kuvataan reaktanssilla  $X_T$  kuvan 2 mukaisesti.



KUVA 2. STATCOM-laitteiston yksivaiheinen sijaiskytkentä (Hingorani N G, Gyugyi L. 2000 s.167)

Kun tarkastellaan suuntaajasta muuntajan läpi verkkoon kulkevaa loisvirtaa yhden vaiheen osalta, loisvirran lauseke on lähteen mukaan (Hingorani N G, Gyugyi L. 2000 s.167)

$$I_Q = \frac{U_O - U_V}{X} \quad (1)$$

jossa

$I_Q$  = STATCOM-laitteiston tuottama loisvirta

$U_{DC}$  = jännitelähteenä käytettävän kondensaattorin jännite

$U_O$  = STATCOM-laitteiston lähtöjännite

$X_T$  = muuntajan hajareaktanssi

$U_V$  = verkon vaihejännite

Jännitteiden tehollisarvojen keskinäinen suuruus määrittää virran etumerkin ja siten loistehon kulkusuunnan. Vastaavasti verkkoon tuotetun induktiivisen loistehon lauseke on (Hingorani N G, Gyugyi L. 2000 s.167)

$$Q_o = \frac{1 - \frac{U_o}{U_v}}{X} \cdot U_v^2 = \frac{U_v(U_o - U_v)}{X} \quad (2)$$

Välipiirin jännitelähde luodaan tasavirtakondensaattoreilla. Tämän takia laitteiston pätötehovalmiudet ovat hyvin pienet. STATCOM-vaihtosuuntaajan kytkinkomponentit eivät ole häviöttömiä, vaan kuluttavat pätötehoa toimiessaan. Tämän takia kytkinkomponentit kuluttavat suuntaajan DC-puolen energiavaraston, eli välipiirin tasajännitekondensaattorin tyhjäksi, mikäli sen varausta ei ylläpidetä.

Jakeluverkosta voidaan syöttää kytkinlaitteiden tarvitsema pätöteho tuomalla niille omat syötöt jakeluverkosta. (Hingorani N G, Gyugyi L. 2000 s.169–170). Tehokkaampi ratkaisu on kuitenkin säätää suuntaajan ulostulojännitteen vaihekulmaa siten, että ulostulojännitteen  $U_o$  vaihekulma on hieman verkkojännitteen vaihekulmaa  $\delta$  jäljessä. Kaavalla 3 (Hingorani N G, Gyugyi L. 2000 s.208) selvitetään verkosta suuntaajalle siirtyvä pätöteho, jonka kytkinlaitteet tarvitsevat toimiakseen

$$P = \frac{U_o^2}{X} \cdot \sin \delta \quad (3)$$

Kulma  $\delta$  on suuntaajan ulostulojännitteen vaihekulma, kun verkkojännitteen vaihekulmaksi kiinnitetään nolla astetta. Suuntaajan jännitteen ollessa verkon jännitettä jäljessä, termi  $\sin \delta$  saa negatiivisia arvoja, jolloin pätöteho virtaa suuntaajaan päin.

Jännitteiden  $U_o$  ja  $U_v$  välinen kulma huomioituna, STATCOMin tuottama loistehon lausekkeeksi saadaan

$$Q_o = \frac{U_o \cdot U_v}{X} \cos \delta - \frac{U_v^2}{X} \quad (4)$$

Tapauksissa, joissa kulman  $\delta$  arvo on pieni, termi  $\cos \delta$  on lähes yksi. Tällöin lausekkeen 4 voi yksinkertaistaa lausekkeeksi 2.

Edellä esitettyjen yhtälöiden perusteella STATCOM:n tuottaman loisvirran maksimiarvo riippuu jännitteiden  $U_o$  ja  $U_v$  erotuksesta sekä tuotetun loistehon maksimiarvo määräytyy

lineaarisesti verkkojännitteestä. (STATCOM, STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR, 2011).

STATCOMilla on merkittäviä etuja sitä edeltäneeseen perinteisempään tyristoriohjattuun kondensaattoreista ja reaktoreista koostuvaan kompensointiparistoon nähden. STATCOMin tuottaman loistehon maksimiarvo on lineaarisesti riippuvainen sitä syöttävän verkon jännitteestä. Tarvittavan loisvirran tuottaminen alemmillakin verkon jännitteillä onnistuu ongelmitta. Vanhempaa teknologiaa olevien kompensointiparistojen tuottama loisteho on neliöllisesti riippuvainen verkkojännitteestä verrattuna STATCOMin. Ne myös reagoivat STATCOM:ia hitaammin äkillisiin verkkojännitteen muutoksiin. (STATCOM: future-proofing reactive power compensation).

Sähköverkon jännitteen laskiessa äkillisesti jännitteiden  $U_O$  ja  $U_V$  erotus kasvaa, tällöin STATCOM tuottaa enemmän loisvirtaa ja -tehoa pyrkien tukemaan sähköverkon jännitettä. Kestoltaan kyseinen tapahtuma on erittäin nopea, sillä STATCOMin kytkinlaitteet reagoivat nopeasti ja äkillisen jännitealenneman vaikutukset verkossa minimoidaan. Kompensointiparistolle sähköverkon jännitteen äkillinen pienentyminen aiheuttaa tuotetun loistehon laskun ja sen pahentaa verkkojännitteen alenemaa siksi, että loisteho on neliöllisesti riippuvainen verkkojännitteestä eikä jännitteen muutokseen reagoida tarpeeksi nopeasti. (STATCOM, STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR, 2011).

## 2.4 STATCOM-Demonstraattori

Yrityksen valmistamat STATCOM-järjestelmät koostuvat jännitelähdemuuntimista, esilatauspiireistä, vaihekohtaisista keloista ja muuntajasta. Demonstraattori-laitteiston VSC-moduulit ovat jännitevälipiirillisiä. Jännitelähde luodaan kahdeksan alimoduulin kondensaattoreista, joiden kytkinlaitteina toimivat IGBT-transistorit. Erittäin dynaamisen kokonaisuuden avulla jännitelähdemuuntimien rakenne pysyy pienenä menettämättä toimintakykyä laajalla jännitealueella ja saadaan aikaan enemmän kompensointikapasiteettia vanhempiin sovellutuksiin nähden.

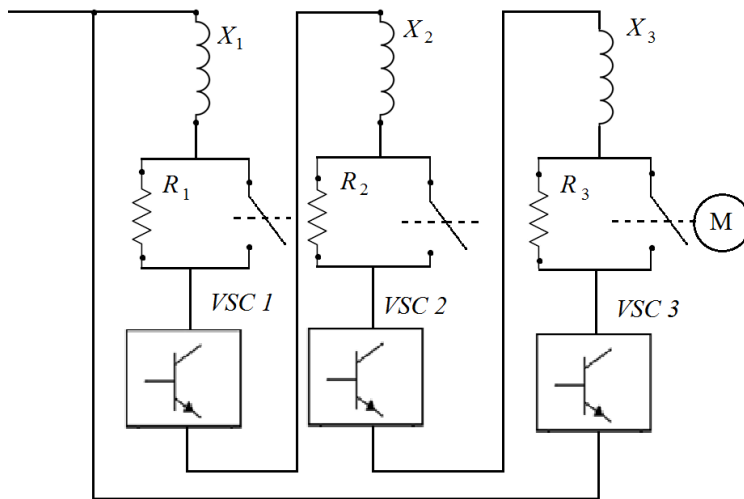
Järjestelmä on kolmivaiheinen. Jokaisessa vaiheessa on oma VSC-moduuli, jonka virtaa kontrolloidaan vaihtelemalla alimoduulien tuottamaa jännitettä positiiviseksi tai negatiiv-

viseksi tasajännitteeksi. Vaihtoehtoisesti VSC-moduulin virran kontrollointi voidaan toteuttaa moduulien tuottamaa jännitettä muuttamalla jännite-eron kasvattamiseksi liitännässä käytetyn muuntajan tai vaiheessa olevan sarjaan kytketyn kelan impedanssin yli. (STATCOM: future-proofing reactive power compensation).

Normaalisti STATCOM-laitteisto on ulos rakennettava kokonaisuus, jossa jännitelähde-muuntimet ovat omassa rakennuksessa ja esilatauspiirit, kelat ja muuntaja ovat ulkona. Demonstraattori rakennetaan testitilaan, jonka ulkopuolelta laitteiston ohjaus ja seuranta tapahtuvat. Poikkeuksellisesti muuntaja ja esilatauspiirit ovat sisätiloissa. Laitteisto ja sen ohjaus ovat muuten samanlaiset kuin kaupallisessa toteutuksessa, jotta demonstraattorin avulla tehdyt testitulokset ovat sovellettavissa suuremmissakin projekteissa.

### 3 MITOITUS

Osana opinnäytetyötä on STATCOM-demonstraattoriin liittyvä mitoitusyö. Laitteiston VSC-moduulien ja kelojen välille tuleva kaapelointi pitää määrittellä. Kaapelin valinnassa pitää noudattaa tiettyjä kriteerejä, joita ovat: ympäristö, jännitetaso, johtimen kuormitettavuus ja johtimen paksuus. Lisäksi on valittava esilatauspiiriin tarvittava erotin. Ennen mitoitusta selvitetään laitteiston testipaikalle tehtäviä muutoksia jakeluverkon osalta. STATCOM-demonstraattorin yksivaiheinen päävirtapiiri on esitetty kuvassa 3.



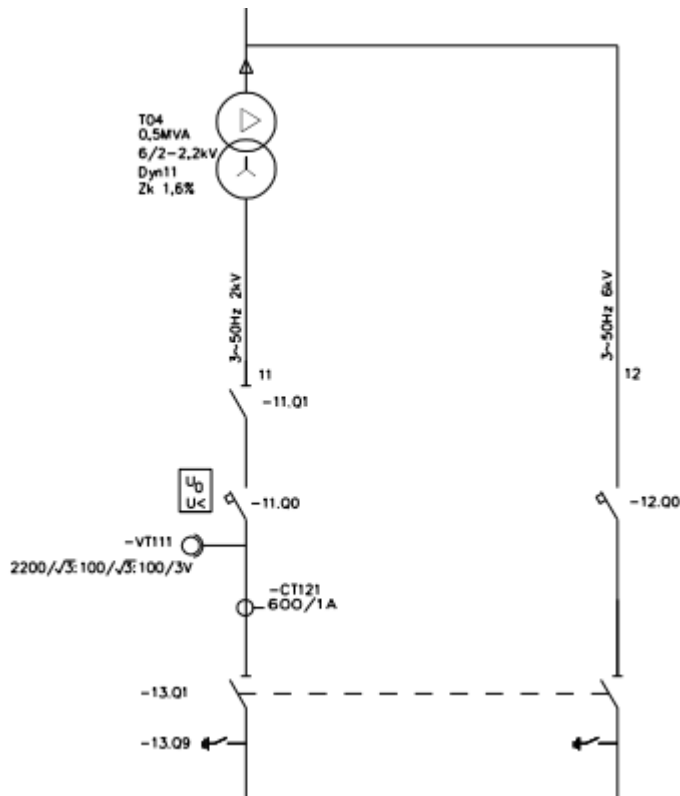
KUVA 3. STATCOM-demonstraattorin päävirtapiiri, jossa vaihekohtaiset kelat, esilatauspiirit ja jännitelähdemuuntimet on kytketty kolmioon

#### 3.1 Suunnittelun lähtökohdat

Demonstraattorille määritetty testitila sijaitsee Alstomin entisellä tehtaalla Myllypuron teollisuusalueella. Testilaboratoriossa on aikaisemmin testattu yrityksen toista sähköverkon kompensointiin tarkoitettua tuotetta. Aikaisempi jännitetaso on ollut 2 kV, mutta STATCOM:ia varten on tehtävä muutostöitä tehtaan jakeluverkkoon jännitetason nostamiseksi 6 kV:iin.

Testipaikan kiskoston jännitetaso muuttaminen tapahtuu ohittamalla muuntaja T04 (kuva 3), joka sijaitsee testipaikan yläpuolella olevalla parvella. Muuntaja T04 on 6/2 kV

-muuntaja, jonka toisiopuolella on kaksi kiskostoa. Vasemman puoleinen kiskosto jätetään 2 kV-jännitetasoon mahdollista kompensointiparistoa varten. Oikean puoleisesta kiskosta tehdään 6 kV kiskosto purkamalla sen yhteys muuntajan toision kanssa ja kytkemällä kiskosto muuntajan T04 ensiön liitäntäpisteisiin.



KUVA 4. Osa jakelukaaviosta, jossa näkyvillä muuntajan T04 ohitus (Liite 1, muokattu)

Laitteiston kaapelointi pyrittiin tekemään mahdollisimman yksinkertaisesti. Tilasta löytyy entuudestaan vanha läpivienni. Läpiviennin käyttämistä tutkittiin ja huomattiin, ettei kaapelointi sitä kautta onnistuisi. Läpivienni oli rakennuksen ulkoseinässä ja ulkopuolella sen välittömässä läheisyydessä sijaitsee tehtaan kondensaattoriparistojen muodostamat patterit. Läpiviennistä on mahdollista kuusi paksuhkoa ja huonosti taipuvaa voimakapealia. Seinän ja kondensaattorien välinen tila eivät mahdollista läpiviennin käyttöä. Uuden läpiviennin paikaksi määriteltiin testitilan nurkka. Kaapelit kulkisivat nurkan läpiviennin kautta ulkona sijaitsevien kelojen luokse kaapelihyllyä pitkin (liite 2).

### 3.2 Kaapelin mitoittaminen

Kaapeli, jota käytetään STATCOMin VSC-moduulien kolmiokytkennän rakenteessa, on yksijohtiminen keskijännitevoimakaapeli. Jännitetaso on 6 kV ja aluksi oletetaan, että kolmiovirta olisi 1 kA luokkaa. Johtimen valintaan vaikutti myös osittainen ulkoasennus sekä piiriin tulevien Hall-anturien koko. Kustannussyistä tahdottiin käyttää jo olemassa olevia Hall-antureita, joiden sisähalkaisija oli 60 mm. Johtimen oli pysyttävä siis tarpeeksi pienenä, että sen asentaminen ja taivuttaminen pienessä tilassa ei olisi ongelma ja, että 60 mm Hall-antureita pystyttäisiin hyödyntämään.

REKA Kaapeli valmistaa HXCMK 6/10 kV 400mm<sup>2</sup> keskijännitevoimakaapelia. Johdin on valmistettu kuparista ja on PEX-eristeinen, mikä mahdollistaa sen ulkokäytön.

Johtimen teknisiä tietoja löytyy taulukosta 1. Kaapelin virrankestoisuudesta huomataan, ettei se kestä 1 kA virtaa. STATCOM-laitteistolla pystytään määrittämään kolmiovirran suuruus, joten tässä vaiheessa on tehtävä kompromissi ja valita virtakestoisuudeltaan pienempi kaapeli.

TAULUKKO 1. HXCMK 1x400/35 -kaapelin teknisiä tietoja (Liite 3)

	1x400/35 S.nro. 118240
Johtimen halkaisija (mm)	23,2
Kaapelin halkaisija (mm)	39
Minimi taivutussäde	
- käsittelyn ja asentamisen aikana (m)	0,59
- paikalleen asennettaessa taivuttamalla kerran (m)	0,43
Johtimen korkein resistanssi ( $\Omega$ /km)	0,047
Induktanssi (mH/km)	
- kaapelit pyramidina	0,29
- kaapelit vaakatasossa koskettaen toisiaan	0,48
Kapasitanssi ( $\mu$ F/km)	0,54
Virtakestoisuus	
Kaapeli ilmassa (+25°C) Johtimen lämpötila +90°C (A)	
- kaapelit pyramidina	835
- kaapelit vaakatasossa koskettaen toisiaan	785

Johtimien poikkipinnan suuruuteen vaikuttaa ensisijaisesti kuormitusvirta ja sen aiheuttama lämpeneminen. Johtimien kuormitettavuuteen vaikuttavat johdinmateriaali, eristämateriaali, ympäristön lämpötila, asennustapa sekä muiden virtapiirien läheisyys. (Tiainen 2010, s.43).

ABB:n TTT-käsikirjasta löytyy taulukko (kuva 5), jossa annetaan erikokoisten PEX-eristeisten yksijohdinkaapeleiden jatkuvan kuormavirran sallitut arvot ampeereina. Taulukossa esitetään myös eri asennustavat ja kaapelimateriaali.

Johtimen poikkipinta mm <sup>2</sup>	Kuormitusvirta							
	A							
	Kaapelit ilmassa				Kaapelit maassa			
	tasossa		kolmiossa		tasossa		kolmiossa	
	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al
50	255	205	250	195	220	170	205	155
70	320	255	295	235	270	215	255	200
95	380	310	355	280	315	250	295	235
120	430	350	410	325	345	280	335	265
150	480	395	465	370	385	315	380	300
185	535	440	535	425	425	350	425	330
240	615	515	620	490	485	395	485	385
300	685	580	705	565	530	440	545	435
400	785	680	835	680	590	500	625	510
500	870	755	940	775	645	550	695	570
630	960	840	1035	880	700	610	755	635
800	-	1010	-	1010	-	650	-	695

KUVA 5. ABB:n kaapelien kuormitettavuus taulukko (TTT-käsikirja 2000)

Suuri tekijä kaapelien kuormitettavuuden selvittämisessä on asennustapa. Taulukoissa esitetään yleensä kaapelin kuormitettavuus ilmaan tai maahan asennettuna. Maahan asennuksella tarkoitetaan kaapelin upottamista maaperään, joka heikentää kaapelin jäähtymistä, kun kaapelia kuormitetaan. Standardien mukaan maahan asennettua kaapelia ei voi kuormittaa, niin että johtimen lämpötila ylittäisi + 65 °C vaurioiden välttämiseksi.

Ilmaan asennettu kaapeli pääsee jäähtymään paljon paremmin kuin maakaapeli. Tämän takia kaapelia voidaan kuormittaa siten, että johtimen käyttölämpötila on + 90 °C. Ilma-asennus ei tarkoita ainoastaan vapaasti ilmaan asennettuja kaapeleita, vaan myös kaapelitikkaille asennetut kaapelit pystyvät jäähtymään riittävästi. Voimakaapelit on hyvä asentaa omille tikkailleen muiden kaapelihyllyjen ja -tikkaiden yläpuolelle.

Kaapelien asennustavat ilmaan jaotellaan kahteen eri asennustapaan F ja G. Seuraavaksi on lueteltu vaatimukset näille asennustavoille (taulukko 2):

## TAULUKKO 2. Asennustapojen F ja G erittely

Kaapeleiden asennustavat	
<b>F</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- yksijohtimiset kaapelit koskettavat toisiaan ilma-asennuksessa</li> <li>- vapaa välimatka seinästä vähintään kaapelin halkaisija</li> </ul>
<b>G</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- yksijohtimiset kaapelit ilma-asennuksessa</li> <li>- vapaa välimatka kaapeleiden välillä vähintään kaapelin halkaisija</li> </ul>

Vertailun vuoksi myös SFS 6000 löytyy taulukko A.52.6 (kuva 6), jossa asennustapojen E, F ja G kuormitettavuudet ampeereina PEX ja ERP -eristeisille kuparijohtimille.

Johtimen nimellinen poikkipinta mm <sup>2</sup>	Taulukon A.52-1 mukainen referenssiasennustapa				
	Monijohdinkaapeli		Yksijohdinkaapeli		
	Kolme kuormitettua johdinta	Kolme kuormitettua johdinta kolmiossa	Kolme kuormitettua johdinta tasossa		
			Koskettaen	Erillään	
			Vaakatasossa	Pystytasossa	
	E	F	F	G	G
1	2	3	4	5	6
1,5	24	-	-	-	-
2,5	33	-	-	-	-
4	44	-	-	-	-
6	56	-	-	-	-
10	78	-	-	-	-
16	104	-	-	-	-
25	132	140	147	189	167
35	164	176	183	235	209
50	200	215	225	286	256
70	256	279	290	367	331
95	310	341	356	447	405
120	370	398	416	520	472
150	415	462	483	600	548
185	474	530	554	687	629
240	560	631	659	812	747
300	646	731	765	938	866
400	-	856	902	1128	1048
500	-	984	1038	1303	1216
630	-	1132	1197	1512	1416

KUVA 6. Johdinten kuormitettavuus eri asennustavoilla (SFS 6000 s.272 taulukko A.52.6)

Valmistajan ilmoittama virrankestoisuus on lähempänä ABB:n taulukkoa kuin SFS 6000:n. Taulukko A.52.6 kuitenkin ilmoittaa, että erilaisella asennustavalla johtimen kuormitettavuus saataisiin nostettua 1 kA:in tuntumaan. Taulukoiden ilmoittamat virrat

eivät ole lopullisia kuormitusvirran arvoja. Asennustavan lisäksi on otettava muista seikoista riippuvat korjauskertoimet huomioon, kuten kaapeleiden määrä kaapelihyllyllä ja ilman lämpötila. Taulukossa 3 on nähtävissä korjauskertoimet eri johtimien lämpötiloille.

TAULUKKO 3. Lämpötilasta aiheutuvat korjauskertoimet (ABB TTT 2000)

Johtimen- lämpötila °C	Ilman lämpötila °C							
	10	15	20	25	30	35	40	45
90	1,12	1,08	1,04	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80
80	1,14	1,09	1,05	1,00	0,95	0,89	0,84	0,77
70	1,18	1,12	1,06	1,00	0,93	0,86	0,79	0,71
65	1,20	1,14	1,07	1,00	0,93	0,85	0,77	0,68
60	1,22	1,16	1,07	1,00	0,92	0,85	0,75	0,65

Virtapiirien tai monijohdinkaapeleiden lukumäärien sekä sijoituksen vaikutukset korjauskertoimiin huomioidaan taulukon 4 avulla. Korjauskertoimet valitaan epäedullisimman asennuskohdan mukaisesti, sillä lämpötilan vaikutukset johtimien kuormitukseen ovat tällöin suurimmat.

TAULUKKO 4. Vierekkäisten virtapiirien korjauskertoimet (taulukko 52.11 D1:2012 s.224)

Sijoitus (kaapelit koskettavat toisiaan)	Virtapiirien tai monijohdinkaapeleiden lukumäärä											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	12	16	20
Nipussa ilmassa, pinnalla, upotettuna tai kotelon sisällä	1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,45	0,41	0,38
Yhdessä kerroksessa seinällä, lattialla tai rei'ittämättömällä	1,00	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,71			
Yhdessä kerroksessa kiinnitettynä suoraan puukaton alapuolelle	0,95	0,85	0,72	0,68	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61			
Yhdessä kerroksessa rei'itetyllä kaapelihyllyllä vaaka- tai pystysuunnassa	1,00	0,88	0,82	0,77	0,75	0,73	0,73	0,72	0,72			
Yhdessä kerroksessa tikkailla, tuilla tai kiinnikkeillä	1,00	0,87	0,82	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78			

Johtimia tulee 6 kappaletta kaapelitikkaille kolmioon yhteen kerrokseen (asennustapa F) ja ilmanlämpötilaksi arvioidaan  $+25^{\circ}\text{C}$ . Johtimen lämpötila on  $+90^{\circ}\text{C}$  ja sen kuormitettavuus lasketaan kaavalla

$$I' = k_1 \cdot k_2 \cdot I \quad (5)$$

jossa

$I'$  on sallittu kuormitusvirta

$I$  = taulukon mukainen kuormitusvirta

$k_n$  = eri korjauskertoimet

Kaavaan sijoitetaan lämpötilan ja virtapiirien lukumäärän korjauskertoimet ja selville saadaan kuormitusvirta  $I'$ .

$$I' = 0,79 \cdot 1 \cdot 835 \text{ A}$$

$$I' = 659,65 \text{ A}$$

Kaapelia voidaan siis kuormittaa noin 660 A virralla, kun se asennetaan paikalleen. Ta-  
voitellusta 1 kA jäätin 340 A, mutta teoriassa optimaalisissa olosuhteissa kaapeli pystyisi  
kestämään lyhytkestoisesti 1 kA virran, jos sitä edeltävä tai sen jälkeinen kuormitus olisi  
riittävän pieni, jotta johtimen lämpötila pääsisi laskemaan ja lämpövaikutukset eivät ai-  
heuttaisi vaurioita. STATCOM-laitteen käyttö tulee olemaan jaksottaista testikäyttöä.  
Eliniäksi sille on arvioitu noin 5 vuotta. Näin ollen johtimen alimitoitus ei merkittävästi  
vaaranna käytettävyyttä, koska johdin ei altistu ylisuurille virroille pitkäkestoisesti.

### 3.3 Esilatauspiiri

STATCOM-laitteiston jännitelähdemuuntimien jännitevälipiirien tasasähkökondensaat-  
torit täytyy ladata ennen niiden käyttämistä jännitelähteinä. Latausta ei voi suorittaa suo-  
raan verkon kautta, vaan jännitelähdemuuntimia täytyy edeltää esilatauspiiri, jonka tar-  
koituksena on rajoittaa aluksi kondensaattoreille kulkevaa virtaa päällekytkentätilan-  
teessa, ettei syöttävästä verkosta katsottuna aiheudu äkillistä virtapiikkiä. Virran kulkua  
rajoitetaan vastuksilla ja niiden ohitus toteutetaan erottimella

### 3.3.1 Kondensaattorit ja latausvastus

Kyseessä olevan STATCOM-demonstraattorin jännitelähdemuuntimet sisältävät 8 alimoduulia, jotka sisältävät oman kondensaattorinsa, joista jännitelähteet muodostuvat. Kondensaattori ja vastus muodostavat yhdessä RC-piirin. Kondensaattorin latautumiseen vaikuttaa aikavakio  $\tau$ , joka saadaan vastuksen ja kondensaattorin arvojen tulona

$$\tau = R \cdot C \quad (6)$$

Aikavakiolla ilmaistaan ajanjaksoa, jolloin kondensaattorin jännitteen muutos on 63 % syöttävän jännitteen suuruudesta. Viiden aikavakion aikana kondensaattori on varautunut täyteen. Varauksen nostamiseen kuluva aika määrittää latausvastuksen ominaisuudet. Latausvastus mitoitettiin siten, että se pystyy hallitsemaan itsensä läpikulkevan energiamäärän.

Yrityksellä oli 15 k $\Omega$ :in latausvastuksia joidenka kelpoisuutta tutkittiin opinnäytetyön toimeksiantajayrityksen työntekijän Jari Lavapuron tekemien simulointitulosten perusteella tehdyssä STATCOM demonstrator Simulation study -raportissa. Valittujen vastusten täytyisi rajoittaa latausvirtaa tarpeeksi matalaksi jakeluverkon suunnalta tarkasteltuna ja kestää kondensaattorien latautumisen aikana vastuksissa lämmöksi muuntuva energian määrä. Kyseisen latausvastuksen maksimi energian määrä on 34 kJ, jonka jälkeen vastuksen on levättävä 360 sekunnin ajan. Latausvastuksen kelpoisuutta simuloitiin jakeluverkon 1,1 kertaisella nimellisjännitteellä (Lavapuro J. 2017).

Latausvastusten mitoittamisesta laaditun raportin simulointitulosten perusteella selvisi, että STATCOM-demonstraattorin käynnistyksessä latausvirta on suuruudeltaan hyvin pieni 0,44 ampeeria, kun käytetään 15 k $\Omega$ :in vastuksia. Esilatauspiirin latausvastuksen suurin teho syntyy käynnistyshetkellä ja sen arvoksi saadaan 2909 wattia. Kondensaattoreiden latausaika alle 1 ampeerinvirralla kestää 120 sekuntia, joka johtaa siihen, että 120 sekunnin kohdalla vastuksen läpi on kulkenut energiaa 34,3 kJ:n verran, mikä on hieman suurempi kuin vastuksen kilpiarvoissa ilmoitetaan. Latauksen kestäessä yli 30 sekuntia jännitemuuntimen diodisilta aiheuttaa merkittävää säröä syöttävään verkkoon. 15 k $\Omega$ :in vastus ei siis sovellu STATCOM-demonstraattorille. Tämän arvion pohjalta päätettiin,

että käytettäisiin 300 – 600  $\Omega$ :in vastuksia, jolloin kondensaattorien lataus kestäisi 1 – 2 sekuntia eikä syöttävän muuntajan 48 A:n nimellisvirtaa ylitettäisi. Latausvastuiksi päätettiin valita resistanssiltaan 350  $\Omega$ :in vastuksen joiden energian kestoisuus on 45 kJ. (Lavapuro J. 2017).

### 3.3.2 Erotin

Erottimet on tarkoitettu muodostamaan turvallinen avausväli erotettavan virtapiirin ja muun laitoksen välille. Erottimen on pystyttävä suljettuna johtamaan vaurioitumatta, avautumatta ja liiaksi lämpenemättä kaikki virtapiirissä esiintyvät kuormitus- ja oikosulkuvirrat. Erotinta ei ole tarkoitettu kuormitetun virtapiirin avaamiseen tai sulkemiseen. Avaaminen ja sulkeminen saa tapahtua pääsääntöisesti vain jännitteettömänä. (Korpinen L.).

Osana STATCOM-demonstraattoria erottimen käyttö poikkeaa sen alkuperäisestä tarkoituksesta. Erottimella halutaan sulkea latausvastuksen rinnalle kytkettävä virtareitti, jota pitkin virta pääsee kulkemaan jännitelähdemuuntimille rajoittamatta, kun sen kondensaattorit ovat latautuneet tarpeeksi. Erotin tullaan asentamaan sisätiloihin ja sen on virta- ja jännitekestoisuudeltaan täsmättävä valitun kaapelin kanssa. Erottimen ohjauksen on toimittava etäältä, sillä testitila on jännitteinen laitteiston käydessä.

Tehtaan jakeluverkon muissa kohdissa on käytetty ABB:n valmistamia sisätiloihin tarkoitettuja OJON-erottimia. Demonstraattorin esilatauspiireissä päädyttiin käyttämään saman mallin erottimia. Valitut erottimet ovat tyyppiä OJON 3-10/1000. Erotin on kolmivaiheinen ja on tarkoitettu 10/12 kV jännitetasolle ja sen nimellisvirta on 1,0 kA:a. OJON-erottimeen saa lisävarusteena UEMC 40 B2-moottorihjaimen, joka hoitaa auki-kiinni -ohjauksen. (ABB. OJON Indoor Type Disconnectors Catalogue).

Moottorihjain toimii DC-kestomagneettimoottorilla. Syöttö tapahtuu AC-sähköllä yksivaiheisesti 230 V vaihejännitteellä, jonka moottorihjaimen omat suuntaajat muuttavat tasajännitteeksi. Moottorihjaimen kestopagneettimoottori suojataan valmistajan suosittelemalla nimellisvirraltaan 1 A automaattivarokkeella, joka on tyyppiä S202 K1. Moottorihjaimen avulla erottimen ohjaus pystytään toteuttamaan etänä. (UEMC 40 ABD Motor operating Device Installation, Operating and Recycling Guide).

## 4 STATCOM SIMULOINTI

Opinnäytetyön myöhempää osiota varten STATCOM-laitteiston käytössä syntyvistä virroista täytyy tietää muutamia kriittisiä seikkoja. Jakeluverkon suojauksen osalta haluttiin tietää mahdollinen käynnistysvirta laitteistolle ja oikosulkuvirta. Nämä ovat johtimien kuormitettavuuden lisäksi tärkeimmät rajaavat tekijät, kun tahdotaan tietää loisvirran määrä, joka voi kulkea jakeluverkon ja demonstraattorin välillä. Tulokset virroille saatiin MatLab -ohjelman simulink-sovellusta käyttäen, jolla kyseessä oleva STATCOM-demonstraattori mallinnettiin. Simuloinnit suoritti toimeksiantajayrityksen työntekijä Jari Lavapuro. Lavapuron tekemistä STATCOM Demonstrator Simulation Study- ja Startup and Fault Study – raporteista selvisi tulosten lisäksi menetelmä vikavirtojen tutkimiseen. Tässä luvussa selvitetään STATCOM-demonstraattoriin liittyvien raporttien sisältöä opinnäytetyön kannalta merkittävien tekijöiden osalta.

### 4.1 Käynnistys- käyttötilanteet

STATCOM-demonstraattorin jännitelähdemuuntimet koostuvat 8 alimoduulista ja ne ovat keskenään kolmiokytkettyjä ja niitä syötettiin muuntosuhteeltaan 20/6 kV-muuntajalla. Muuntajan ensiöpuolen kytkentäpiste oli 20 kV:n kokoomakiskolla ja jännitelähdemuuntimia syötettiin 6 kV:n toisiopuolelta (Lavapuro J. 2017).

Simuloinnin rajoittavaksi tekijäksi määräytyi 500 kVA näennäisteho, joka voitaisiin vaihtaa jakeluverkon välillä. Tehon määrä on hyvin pieni jännitelähdemuuttajien tuottamaan maksimitheoon nähden. Verkon kuormitusta tutkittiin tuottamalla nolla-sekvenssivirtoja ja kytkemällä shunttilaite STATCOMin rinnalle.

Nolla-sekvenssivirta on yksi kolmesta symmetrisestä komponentista, jota käytetään tutkiessa epäsymmetrisiä vikatilanteita. Nolla-sekvenssivirta koostuu vikavirran DC-komponenteista, joiden vaihekulma ja osoittimen pituudet ovat yhtä suuret. Käytännössä nolla-sekvenssivirtaa ei ole olemassa, vaan se toimii matemaattisena apuvälineenä. Virran aaltomuodon ollessa ei-sinimäistä kolmas yliaalto ja sen kerrannaiset käyttäytyvät nolla-sekvenssivirran omaisesti (Electrical Fault Calculation Positive...). Shunttilaitteella luodaan resistanssiltaan matala kulkureitti virralle STATCOM-laitteiston rinnalle,

jotta osa virrasta saadaan jaettua kahden kulkureitin kesken. Tämän tarkoitus oli tutkia voidaanko demonstraattorin rinnalla käyttää shuntti-laitetta.

Nolla-sekvenssivirta vaati STATCOM-demonstraattorin jännitelähdemuuntimien piirissä korkean kolmiovirran, jonka napaisuutta täytyi vaihtaa nopeissa jaksoissa. Tästä johtuen syntyi, ei sinimainen virran käyrämuoto. STATCOMin toiminnan kannalta virran poikkeaminen sinimuodosta on ristiriidassa sen perustoimintaperiaatteen kanssa.

Demonstraattorin rinnalla käytettävä shunttilaite nosti esiin itseensä liittyviä ongelmia. Shuntti-laitteen on oltava mitoitettu oikein ja sitä ohjaavien kytkinlaitteiden täytyy olla tarkoitukseen sopivat. Verkon lyhytkestoinen ylivirta voi aiheuttaa ongelmia shuntin kytkentälaitteille, koska STATCOM-demonstraattorin omien kytkinlaitteiden vastinaika on paljon lyhyempi. Kytkinlaitteiden sopivuutta ei ole vielä selvitetty, mutta mikäli shunttia halutaan käyttää STATCOMin rinnalla, on selvitettävä vastinajoista johtuvat ongelmat.

Molemmilla menetelmillä ilmeni ongelmia jännitelähdemuuntimien tuottamien harmonisten yliaaltojen osalta, kun simuloinnissa ei käytetty suodatinta. STATCOM toimi moitteettomasti ja pysyi vakaana huolimatta pienestä hienosäädöstä ja 20 kV:n kokoomakiskon säröytymisestä pienellä oikosulkuteholla. Suurin kolmiovirran arvo oli 27,8 A ja suurin muuntajan toisiovirta 48,1 A, joka redusoituna ensiöpuolelle on 14,3 A, kun maksimi arvo teholle, joka vaihdettiin verkon välillä oli 500 kVA.

Simuloinnissa ilmenneistä ongelmista riippumatta käytetyt menetelmät osoittautuivat toimiviksi. Yliaaltojen vaikutukset on tutkittava, jos ja kun edellä mainittuja ratkaisuja tahdotaan käyttää. (Lavapuro J. 2017).

## 4.2 Vikatilanteet

Vikatilanteita simuloidessa päädyttiin käyttämään myös nolla-sekvenssivirta -periaatetta. Pohjana toimi sama simulink STATCOM-malli pienillä muutoksilla. Tehtaan jakeluverkko on kytketty maastaerotettuun 20 kV-sähköverkkoon, jonka oikosulkuteho on aseteltu liittymän mukaisesti 103 ja 187 MVA välille, kun käytettiin Tampereen sähkölaitoksen antamia pienimpiä ja suurimpia kolmivaiheisia oikosulkuvirtoja 3,0 kA ja 5,4 kA. Myös kolmiokytkennässä käytetyt kaapelit jännitelähdemuuntimien välillä huomioitiin.

Todennäköisimpinä vikatilanteina jännitelähdemuuntimilla pidettiin yksi-, kaksi- ja kolmivaiheisia oikosulkuja. Yksivaiheinen oikosulku tarkoittaisi tässä tapauksessa yksivaiheista maasulkua, jonka vaikutus maasta erotetulla verkolla on vikavirran puolesta minimaalinen, sillä maasulkuvirralla ei löydy paluureittiä takaisin verkkoon. Kaikki kolme vikatilannetta simuloidaan kahdella vikatilanteita edeltävillä jännitteillä, jotka ovat 0,9- ja 1,1- kertaiset nimellisjännitteeseen nähden.

Tilanne, jossa vikatilanteita voisi ilmetä, on jännitelähdemuuntimien kytkinlaitteiden toiminta. Jännitelähdemuuntimien ohjaus alkaa ajanhetkellä  $t = 0,1$  s, jolloin kytkinlaitteet aloittavat toimintansa ja vika tapahtuu ajanhetkellä  $t = 0,5$  s, jolloin kytkinlaitteet voivat toimia väärin. Vikatilanteet ja niiden tulokset löytyvät listattuna liitteestä 4. Suurin kolmivaiheinen oikosulkuvirta on 4,32 kA ja pienin kaksivaiheinen oikosulkuvirta 1,5 kA. Yksivaiheisissa vikatilanteissa huomattiin, että vikavirran arvo on pieni muihin vikatilanteisiin nähden.

## 5 OIKOSULKUVIRTASUOJAUS

Oikosulkusuojauksen tavoite on estää johdoille ja laitteille aiheutuvat vauriot oikosulku-tilanteessa sekä erottaa vioittunut osa muusta verkosta. Toimiva oikosulkusuojaus takaa järjestelmän turvallisuuden myös vikatilanteissa. Keskijänniteverkon suojaus toteutetaan käänteisaika- tai vakioaikaylivirtareilla. Tätä varten on hyvä tietää oikosulkuvirrat tarvittavissa pisteissä, kuten kojeistojen kiskostoissa ja muuntajien oikosulut sekä kuinka niiden suojaus tulee toteuttaa.

### 5.1 Muuntajalähdön suojaus

Suojauksena käytettävä ylivirtarele suojaa ensisijaisesti syöttöjohtoa ja muuntajan yläjännitepuolta. Ylivirtarele on asetettava ainakin kaksiportaiseksi niin, että oikosulut ensiössä ja syöttöjohdossa pikalaukaistaan. Hitaampi laukaisuporras suojaa muuntajan alajännitepuolta ja sen kiskostoa. (Mörsky J. s.191). Keskijännitesuojan selektiivisyys ei ole erittäin tärkeää, jos jakelumuuntaja syöttää vain yhtä pääkeskusta. Jos muuntaja syöttää kahta pääkeskusta, niin tulee selektiivisyys ottaa huomioon.

Suojauksen virta- ja aika-asettelujen suunnittelussa pitää ottaa huomioon suojan vaikutusalueen suurimmat ja pienimmät oikosulkuvirrat, selektiivisyyden toteutuminen sekä verkon komponenttien oikosulkukestoisuus.

Jännitteettömän muuntajan kytkeminen on myös huomioitava suojauksessa muuntajan kytkentävirtasysäyksen takia. Kytkentävirtasysäyksen arvoja on vaikea määrittellä, koska suureet ovat riippuvaisia monesta tekijästä. Suureet voidaan kuitenkin arvioida taulukosta 5 löytyvien keskimääräisten mitattujen kytkentävirtojen arvojen joukosta. (Mörsky J. s.191–192).

TAULUKKO 5. Mitattuja kytkentävirtasysäysten arvoja muuntajille (Mörsky J. s.191)

Muuntajan teho	Muuntajan kytkentävirta		Virran puolittumis- aika
	Syötön kytkentä yläjännitenapoihin	Syötön kytkentä alajännitenapoihin	
MVA	$xI_n$	$xI_n$	s
1	7	12	0,1-0,2
5	5	9	0,2-0,5
10	4	8	0,5-1
50	3,5	7,5	1,2–7,2

Kytkevävirrat vaihtelevat 5 – 12 kertaisten nimellisvirtojen väliltä. Virran puolittumisaika on minimissään 0,1 s ja maksimissaan 7,2 s riippuen muuntajan tehosta. Muuntajia voi kuormittaa 1,5-kertaisella nimellisvirrallaan (Mörsky J. s.191) hetkellisesti, kun huomioidaan sen jäähtyminen. Tarpeen vaatiessa muuntajien ylikuormitusominaisuutta voidaan hyödyntää asettelemalla suojarle sen mukaisesti.

## 5.2 Kiskosuojaus

Asemalla sattuvat viat ovat suojauksen kannalta kiskovikoja, jos ne ovat virtamuuntajista katsottuna kiskon puolella, ja johtovikoja, jos ne ovat johdon puolella. Virtamuuntajien sijainti vaikuttaa siis siihen, mitkä viat kuuluvat asema- ja mitkä johtovikoihin. Mikäli käytetään rengasvirtamuuntajia lähtevien kaapelien vaihevirtojen mittaamiseen, kuuluvat kaapelipääteet kiskosuojan suojausalueeseen. Kiskoviassa kaikki kiskoon liitetyt katkaisijat saavat laukaisukäskyn, ja kisko jää jännitteettömäksi. (Mörsky J. s.207).

Hyvä kiskosuojaus edellyttää nopeaa toimintaa vikatilanteissa ja hyvää selektiivisyyttä. Suojat eivät saa toimia kiskon ulkopuolisissa vioissa. Kiskosuojauksen on oltava käyttövarma ja sovelluttava useisiin kiskojärjestelmiin sekä sillä on oltava muutos- ja laajenusmahdollisuudet. (Mörsky J. s.208).

### 5.3 Jakeluverkon johtosuojaus

Suojaus voidaan toteuttaa ylivirtareleillä. Virtaselektiivisen suojauksen toteuttamista varten täytyy tuntea verkon eri osissa tapahtuvien vikojen vikavirrat. Suojareleen virta-asettelu voidaan silloin tehdä niin, ettei se ulotu seuraavan suojareleen toiminta-alueelle. Tällöin suojaus ei kuitenkaan ole aukoton, vaan tarvittaisiin varasuojauksia. Virtaselektiivisen suojauksen edellytyksenä ovat verkon oikosulkuimpedanssierot. (ABB, Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000).

### 5.4 Aikaselektiivinen suojaus

Teollisuusverkon lyhyillä johdoilla oikosulkuvirtojen arvojen erot ovat pieniä ja suojauksen toimintaa virran suhteen eri suojausalueiden välillä on vaikea porrastaa. Tällaisissa tapauksissa joudutaan suojauksesta tekemään aikaselektiivinen. Aikaselektiivisyyden perusideana on porrastaa releiden toiminta-aikoja siten, että lähimpänä vikaa oleva rele toimii ensin. Yleensä tämä tarkoittaa sitä, että verkon syöttösunnasta katsottuna järjestykseltään viimeinen rele toimii ensimmäiseksi. (Willman, J. 2006)

Peräkkäisten suojausportaiden toiminta-aikojen erotusta kutsutaan porrassajaksi, jonka oikea valinta on aikaselektiivisyyden edellytys. Vikavirran muutosilmiöt sekä mittamuuntajien virheet ja epätarkkuudet aiheuttavat suojauksen toiminnassa viivettä, joka on huomioitava. Selektiivisyyden varmistamiseksi täytyy huomioida, ettei porrassaikojen kasvattaminen hidasta liikaa kaukaisimman releen toiminta-aikaa oikosulkuvirtojen ollessa suurimpia sen toiminta-alueella. Yleisimpiä releiden porrassaikoja ovat 0,15 s numeerisilla releillä, 0,3 s staattisilla releillä sekä 0,5s mekaanisilla releillä. Jos suojauksessa käytetään samanlaisia numeerisia releitä, niin voidaan olettaa niiden havahtuvan samanaikaisesti. Tällaisissa tapauksissa vakioaikaisille suojuille porrassaika voidaan määrittää kaavalla 7

$$\Delta t_{DT} = 2 \cdot t_E + t_R + t_{CB} + t_M \quad (7)$$

jossa

$\Delta t_{DT}$  on porrassaika

$t_E$  on releen toiminta-ajan toleranssi

$t_{CB}$  on katkaisijan toiminta-aika

$t_R$  on retardaatioaika

$t_M$  on varmuusmarginaali

Käänteisaikasuojauksessa käytetään pidempiä porrassaikoja kuin vakioaikasuojauksessa. Suurin syy tähän on virtamittauksen epätarkkuus. Porrassaika käänteisaikaisille suojille saadaan kaavalla 8

$$\Delta t_{IDMT} = t_1 \cdot \left( \frac{1 + E_1/100}{1 - E_2/100} - 1 \right) + t_R + t_{CB} + t_M \quad (8)$$

jossa

$\Delta t_{IDMT}$  on porrassaika

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

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

$t_{CB}$  on katkaisijan toiminta-aika

$t_R$  on retardaatioaika

$t_M$  on varmuusmarginaali

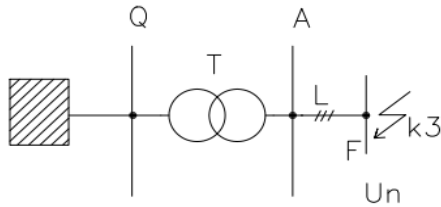
$t_1$  on vikakohtaa lähempänä olevan releen laskennallinen toiminta-aika

Suojauksessa käytettyjen releiden ollessa erilaisia täytyy kummankin releen toiminta-ajan toleranssi huomioida erikseen ja vikatilanteesta kauimmaisen releen retardaatioaikaa on käytettävä. Retardaatioajalla tarkoitetaan releen palautumisnopeutta. Katkaisijan toiminta-aika on se aika mikä vikaa lähempänä olevan katkaisijan kokonaistoiminta-aika on. Kokonaistoiminta-aika koostuu katkaisijan aukikytkentäajasta ja valokaaren sammuttamisen ajasta huomioiden toleranssit. (ABB, Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000, s. 21 - 26)

## 5.5 Oikosulkuvirtojen laskentaan tarvittavia suureita

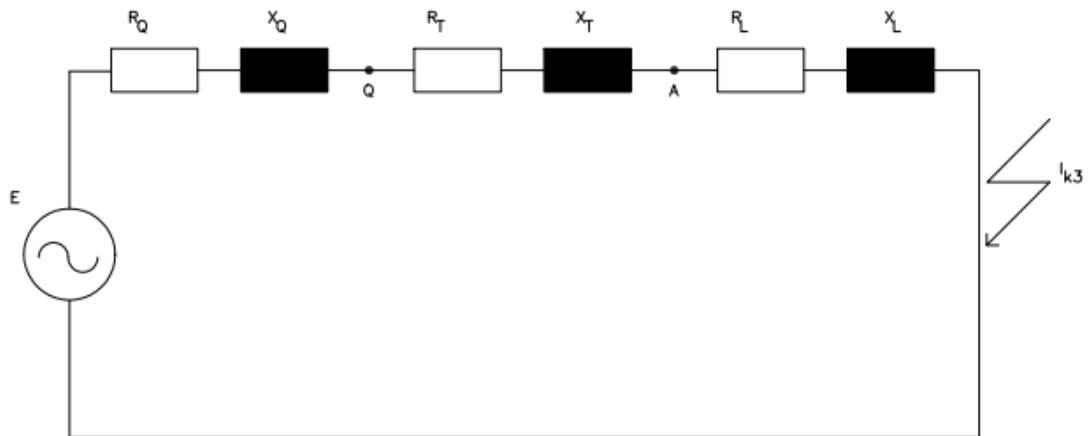
Oikosulkuvirrat lasketaan yksivaiheisen sijaiskytkennän avulla. Siinä kaikki vikavirtaa syöttävät lähteet ja muut komponentit kuvataan oikosulkuimpedanssilla ja vikapaikkaa

kuvataan ekvivalenttisella jännitelähteellä (SFS-EN 60909). Kuvassa 7 on yksivaiheinen sijaiskytkentä sähköverkosta, jossa Q on sähköverkon ja muuntajan T liitännätpiste. A on muuntajan alajännitepuolen ja voimakaapelin L liitännätpiste. Vika k3 tapahtuu jakelukiskolla pisteessä F, jonka nimellijännite on  $U_N$ .



KUVA 7. Esimerkki tarkasteltavasta verkosta, jossa syöttävän verkon liitännätpiste Q, muuntaja T, kiskosto A, kaapeli L ja vikapaikka F

Esimerkin sähköverkko ennen vikapaikkaa F jaetaan oikosulkuresistansseiksi  $R$  ja oikosulkureaktansseihin  $X$  kokonais oikosulkuimpedanssin selvittämistä varten (kuva 8).



KUVA 8. Yksivaiheinen sijaiskytkentä kuvan 7 verkosta, jossa oikosulkuimpedanssi  $Z_k$  muodostuu oikosulkuresistanssien ja -reaktanssien osoitinsummasta

Yksivaiheisen sijaiskytkennän perusteella voidaan laskea kolmivaiheinen oikosulkuvirta (D1:2012 s.88), kun tiedetään verkon nimellijännite ja oikosulkuresistanssin ja -reaktanssin muodostama oikosulkuimpedanssi.

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (9)$$

jossa

$I''_k$  on kolmivaiheinen oikosulkuvirta

$c$  on taulukkoarvo

$U_n$  on nimellijännite

$Z_k$  on oikosulkuimpedanssi

$R_k$  on oikosulkuresistanssi

$X_k$  on oikosulkureaktanssi

Kaavaan 9 on sijoitettava kertoimen  $c$  arvo taulukosta 6 nimellijännitteen perusteella. Kerroin  $c$  ottaa huomioon vikavirtapiirin jännitelähteen impedanssin osuuden kokonaisimpedanssista (D1:2012 s.88).

TAULUKKO 6. Kertoimet  $c_{\max}$  ja  $c_{\min}$  jännitetason mukaan (SFS-EN 60909)

Nimellijännite $U_n$	Maksimioikosulkuvirta $c_{\max}$	Minimioikosulkuvirta $c_{\min}$
pienjännite 100 V – 1000 V a) 230 V / 400 V b) muut jännitteet	1,00 1,05	0,95 1,00
keskijännite 1 kV – 35 kV	1,10	1,00
suurjännite 35 kV – 230 kV	1,10	1,00

Tässä työssä tutkitun tehtaan keskijänniteverkon osaa, johon sisältyy STATCOM ja sitä syöttävän muuntajan lähtö. Tästä syystä komponenttien impedanssien laskennassa otetaan huomioon syöttävä verkko, muuntajat ja kaapelit. (IEC 60909 standardi)

Syöttävän verkon oikosulkuimpedanssi  $Z_Q$  lasketaan kaavalla 10

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} \quad (10)$$

jossa

$c$  on jännitetasoa vastaava taulukkoarvo

$U_{nQ}$  on syöttävän verkon jännite

$I''_{kQ}$  on syöttävän verkon oikosulkuvirta (arvo, joka saadaan jakeluverkkoyhtiöltä)

Syöttävän verkon oikosulkuimpedanssi voidaan jakaa oikosulkuresistanssiksi ja – reaktanssiksi kaavoilla 11 ja 12, jos verkon jännite on alle 35 kV ja resistanssin ja reaktanssin suhdetta ei tunneta

$$X_{kQ} = 0,955 \cdot Z_Q \quad (11)$$

$$R_{kQ} = 0,1 \cdot Z_Q \quad (12)$$

Muuntajan yläjännitepuolelta syöttävän verkon oikosulkuimpedanssi redusoituna alajännitepuolelle selvitetään kaavoilla 13 ja 14.

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} \cdot \frac{1}{\mu_r^2} \quad (13)$$

$$\mu_r = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} \quad (14)$$

jossa

$\mu_r$  on muuntosuhde

$U_{1n}$  on muuntajan ensiöpuolen jännite

$U_{2n}$  on muuntajan toisiopuolen jännite

Sähköverkkoja laskettaessa ovat kaikki tarkasteltavat suureet käsiteltävä samassa jänniteportaassa. Muiden jänniteportaiden suureet on redusoitava valittuun jänniteportaaseen. Jännitteet redusoidaan kertomalla ne muuntajan muuntosuhteella

$$U'_2 = \left( \frac{U_{1n}}{U_{2n}} \right) \cdot U_2 \quad (15)$$

jossa

$U'_2$  on alajännitepuolen jännite redusoituna yläjännitepuolelle

$U_2$  on alajännitepuolen jännite

$U_{1n}$  on muuntajan ensiöpuolen jännite

$U_{2n}$  on muuntajan toisiopuolen jännite

Virrat redusoidaan kertomalla ne muuntosuhteen käänteisarvolla

$$I'_2 = \left( \frac{U_{2n}}{U_{1n}} \right) \cdot I_2 \quad (16)$$

jossa

$I'_2$  on alajännitepuolen virta redusoituna yläjännitepuolelle

$I_2$  on alajännitepuolen virta

Impedanssit redusoidaan kertomalle ne muuntosuhteen neliöllä

$$Z'_2 = \left( \frac{U_{1n}}{U_{2n}} \right)^2 \cdot Z_2 \quad (17)$$

jossa

$Z'_2$  on alajännitepuolen impedanssi redusoituna yläjännitepuolelle

$Z_2$  on impedanssi alajännitepuolella

Muuntajan oikosulkuimpedanssi  $Z_k$ , -resistanssi  $R_k$  ja -reaktanssi  $X_k$  selvitetään muuntajan kilpiarvojen perusteella kaavoilla 18, 19 ja 20 (Hietalahti L. Muuntajat ja sähkökoneet s.29).

$$Z_k = \frac{u_k}{100 \%} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad (18)$$

$$R_k = \frac{r_k}{100 \%} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{P_k}{3 \cdot I_n^2} \quad (19)$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (20)$$

jossa

$U_n$  on nimellisjännite

$I_n$  on nimellisvirta

$S_n$  on nimellinäennäisteho

$P_k$  on kuormituskokeen tehohäviöt

$u_k$  on suhteellinen oikosulkuimpedanssi

$r_k$  on suhteellinen oikosulkuresistanssi

Kaapeleiden resistanssi- ja reaktanssiarvot saadaan valmistajien tarjoamista tiedoista. Arvot esitetään pituusyksikköä kohden. Kaapelien oikosulkuimpedanssi  $Z_L$ , -resistanssi  $R_L$  ja -reaktanssi  $X_L$  lasketaan kaavoilla 21, 22 ja 23.

$$Z_L = \sqrt{R_L^2 + X_L^2} \quad (21)$$

$$R_L = r \cdot l \quad (22)$$

$$X_L = x \cdot l \quad (23)$$

jossa

$r$  on kaapelin tasavirtaresistanssi (+90 °C) pituusyksikköä kohti

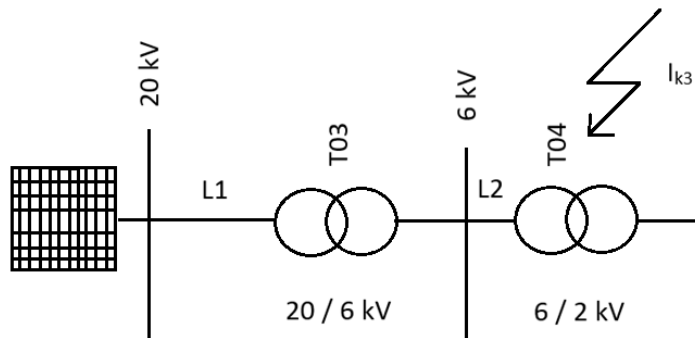
$x$  on kaapelin reaktanssi pituusyksikköä kohti

$l$  on kaapelin pituus

## 5.6 Esimerkki oikosulkuvirtalaskennasta

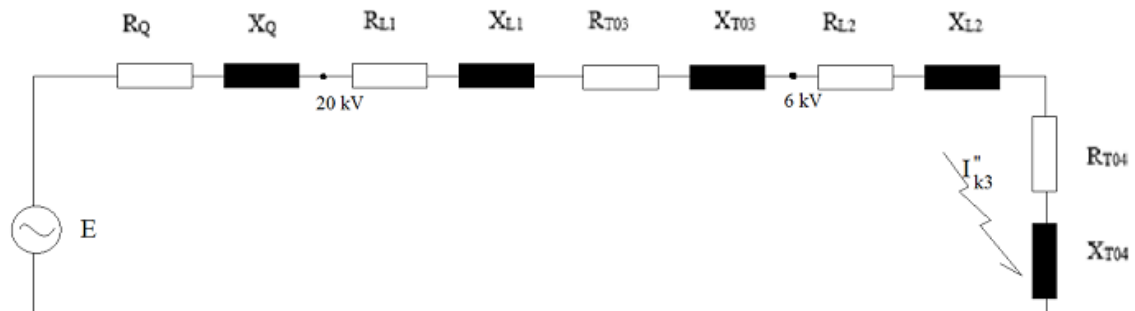
Tässä kappaleessa esitetään tehtaan jakeluverkon keskijänniteverkon 6 kV kojeiston muuntajan T04 ensiöpuolen oikosulkuvirta. Tampereen sähkölaitos on ilmoittanut tehtaan liittymän suurimmaksi kolmivaiheiseksi oikosulkuvirraksi 5,4 kA.

Oikosulkuvirtojen selvittämiseksi tarvitaan verkkokomponenttien oikosulkuresistanssien ja -reaktanssien arvot, joilla voidaan selvittää oikosulkuimpedanssi vikapaikassa. Muuntajista tarvittavat tiedot saadaan niiden kilpiarvoista ja syöttävän verkon oikosulkuimpedanssi saadaan liittymän oikosulkuvirran perusteella. Kaapeleiden resistanssina käytetään kuormitetun kaapelin (+90 °C) resistanssiarvoa. Kertoimella  $c_{\min}$  saadaan syöttävän verkon maksimioikosulkua vastaava oikosulkuimpedanssi. Tehtaan jakeluverkon yksivaiheisesta sijaiskytkennästä on kuvan 9 mukainen.



KUVA 9. Vikavirtapiiri syöttävältä verkolta muuntajalle T04

Yksivaiheisen sijaiskytkennän perusteella sähköverkon osat jaetaan oikosulkuresistanssiin ja -reaktanssiin kuvan 10 mukaisesti.



KUVA 10. Yksivaiheinen sijaiskytkentä kuvan 9 verkosta, jossa oikosulkuimpedanssi  $Z_k$  muodostuu oikosulkuresistanssien ja -reaktanssien osoitinsummasta.

Verkon komponenttien resistanssien ja reaktanssien avulla saadaan oikosulkuimpedanssin summa vikapaikassa. Esimerkin kuviteltu vika tapahtui muuntajan T04 ensiössä ja tämän takia on muistettava redusoida oikosulkuimpedanssien arvot 6 kV tasolle. Verkosta, muuntajasta T03 ja kaapeloinnista johtuva oikosulkuresistanssi ja -reaktanssi on redusoitava ja lisättävä muuntajan T04 ja sen kaapeloinnin oikosulkuresistanssi ja -reaktanssi arvoihin lopullisen oikosulkuimpedanssin selvittämiseksi (liite 4).

Kun piirin oikosulkuimpedanssi on saatu laskettua, niin kaavaa 9 käyttämällä lasketaan maksimioikosulkuvirta vikapaikassa. Suurimmaksi kolmivaiheiseksi oikosulkuvirraksi muuntajan T04 ensiössä saatiin 1,42 kA:a (liite 4). Loputkin oikosulkuvirrat laskettiin samalla periaatteella. Laskutoimitukset ja tulokset 20 kV-kojeiston kiskolle, muuntajan T03 ensiölle ja 6 kV -kiskolle on kirjattu liitteisiin 5, 6 ja 7.

Taulukkoon 7 on kerätty liitteissä 5, 6, 7 ja 8 laskettujen oikosulkuimpedanssien ja -virtojen arvoja. Sulkeissa olevat 20 kV-verkon arvot on redusoitu 6 kV:n ja muuntajien vikapaikka on niiden yläjännitepuolella.

TAULUKKO 7. Oikosulkulaskennan tuloksia

Vikapaikka	$Z_k$ ( $\Omega$ )	$I''_{k3}$ (kA)	$I_{k2}$ (kA)
20 kV-kiskosto	(2,05) 0,18	(4,17) 13,9	(3,61) 12,0
Muuntaja T03	(9,65) 0,86	(1,32) 4,40	(1,14) 3,81
6 kV-kiskosto	0,88	4,55	3,94
Muuntaja T04	2,01	1,89	1,64

## 6 TEHTAAN KESKIJÄNNITEVERKON SUOJAUS

Teollisuusverkon lyhyiden johdinpituuksien takia ja tästä johtuvien oikosulkuimpedanssien alhaisten eroavaisuuksien vuoksi STATCOM-laitteiston suojaus toteutetaan aika-selektiivisesti. Suojareleet ja niiden asettelut myös rajaavat mahdollisuudet jakeluverkon kompensoinnille laitteistolla.

### 6.1 Verkon suojaus yleisesti

Koko tehtaan pääkatkaisijan ohjaamisessa toimii ylivirta- ja maasulkurele VAMP 140. Samanlaiset suojareleet löytyvät myös 20 kV- ja 6 kV-kojeiston katkaisijoilta. 20 kV kojeistosta syötetään muuntajaa T03, jonka muuntosuhde on 20/6 kV. Muuntaja T03 syöttää vuorostaan 6 kV kojeistoa, josta saadaan testitilan syöttö STATCOM-demonstraattoria varten. 6 kV kojeistoon kuuluu STATCOM-syötön lisäksi muuntaja T04.

### 6.2 Verkon rakenne

Tehdas liittyy Tampereen sähkölaitoksen maasta erotettuun 20 kV sähköverkkoon. Tampereen sähkölaitos on ilmoittanut, että liittymän maksimi oikosulkuvirta, joka on kolmevaiheinen oikosulku, on 5,4 kA ja pienin mahdollinen kaksivaiheinen oikosulkuvirta 2,3 kA.

Pääkeskukselta lähtee syötöt tehtaan prosessia pyörittäville muuntajille T01 ja T02, jotka syöttävät keskuksia PK1 ja PK2. Näiden lisäksi pääkeskuksen kokoomakiskostolta kulkee kaapelointi kennojen 7, 8 ja 9 kiskostolle, mistä lähtevät syötöt testitilojen muuntajille T03 ja T06.

Tarkasteltavana on 20 kV:in keskijännitekojeisto, jossa on 6 kV kojeistoa syöttävä jakelumuuntaja T03, jonka kytkentäryhmä Ynd11 ja nimellisteho 3000 kVA. Lisäksi 6 kV kojeistossa on jakelumuuntaja T04, nimellisteho 500 kVA ja kytkentäryhmä Dyn11. STATCOM-demonstraattoria syötetään 6 kV kiskolta. Jakelukaavio on nähtävissä liitteessä 1.

## **6.3 Verkon komponentit**

Tehtaan jakeluverkon kannalta tärkeimpiä komponentteja ovat oikosulkuvirtoihin vaikuttavat tekijät kuten kaapelointi ja muuntajat. Näiden tekijöiden perusteella voidaan määrittää katkaisijoita ohjaavat suojareleet. Suojareleet saavat mittaustietonsa mittamuuntajien kuten virtamuuntajien avulla.

### **6.3.1 Katkaisijat**

Katkaisijan läpi kulkeva oikosulkuvirta määrää suurimman katkaisuvirran. Tehtaan pääkatkaisijana 4.Q0 toimii Merlin Gerin SFSet -katkaisija (liite 9), jonka katkaisukyky on 16 kA. 20 kV-kojeiston katkaisija on ABB:n Uniswitch CBC SF6 eristeinen katkaisija (liite 10) ja sen katkaisukyky on 20 kA. 6 kV -kojeiston katkaisija 2.Q0 on tyyppiä HD4/S (liite 11), jonka katkaisukyky on 25 kA.

### **6.3.2 Muuntajat**

Jakeluverkon 20 kV-kiskostolla sijaitseva muuntaja T03 on öljyeristeinen kolmivaihemuuntaja. STATCOMin rinnalla 6 kV-kojeiston kiskostolla sijaitseva muuntaja T04 on kaksikääinen tyhjiöeristetty kuivamuuntaja. Muuntajien tekniset tiedot löytyvät liitteistä 12 ja 13

### **6.3.3 Virtamuuntajat**

Mittamuuntajat ovat muuntajia joiden tehtävänä on muuttaa mitattavan suureen arvo so-pivalle tasolle mittareita ja suojareleitä varten. Mittamuuntajilla on erilaiset sydänrakenteet niiden käyttötarkoituksesta riippuen.

Virtamuuntajat tarvitsevat kaksi erillistä sydäntä mittaus- ja suojaustarkoitukseen, koska niiden vaatimukset ovat erilaiset. Mittaussydäntä käytetään energian mittaukseen ja suojaussydäntä käytetään oikosulkusuojauksen virranmittaukseen. Sekä mittaus- että suo-

jaustarkoituksiin tarkoitetuille virtamuuntajille on määritelty tarkkuusluokat. Tarkkuusluokka ilmoitetaan numeroarvona, joka antaa suoran virran mittauksessa syntyvän suurimman sallitun virtavirheen suuruuden. (Mörsky J. s.101-103).

Virtamuuntajan tarkkuus pohjautuu sen nimellistaakkaan. Virtamuuntajan taakka tarkoittaa toisioliittimien väliin kytketyssä kokonaisimpedanssissa kuluvaan tehoa nimellisvirralla. Mitä suurempi on toision nimellisvirta, sitä suurempi nimellistaakka tarvitaan, koska toisiokaapelien kuluttama teho kasvaa verrannollisena virran neliönä. (Mörsky J. s.106).

Virtamuuntajien tarkkuuden lisäksi on muistettava muuntajien rautasydämelle ominainen kyllästyminen. Rautasydämen kyllästyessä virtamuuntajan kyky mitata virran tarkkaa suuruutta suojarielelle heikkenee, mikä voi johtaa suojauskeinon toimimattomuuteen. Tästä syystä ensiövirtaa ei kannata valita turhan suureksi, vaan on valittava kuormitusvirran kannalta riittävä arvo ilman suuria marginaaleja. (Mörsky J. s.105-106).

### **6.3.4 Kaapeli**

Tehtaan jakeluverkon syöttö pääkeskukselta 20 kV-kojeistolle on toteutettu tyypin AHXAMK-W 3x120/35 -kaapelilla. Kaapelin suurin termien oikosulkuvirta yhden sekunnin ajan on 11,3 kA ja pienimmillään 2,8 kA. Kaapeli kestää suurimman lasketun oikosulkuvirran termisen vaikutuksen, suojauskeinon ollessa riittävän nopea. Kaapelin tiedot löytyvät liitteestä 15.

## **6.4 Ylivirtasuojauksen tarkastelu**

Ylivirtasuojauksen tarkastelussa on kerätty tarvittavia verkon ja suojauskeinon tietoja. Kootut tiedot ovat verkon nimelliskuormat, kuormien kytkentävirrasyötöt, suojalaitteiden nimellis-, asettelu-, ja toiminta-arvot, kojeiston ja keskuksien oikosulkuvirrat sekä kaapelit ja niiden termiset kestoisuudet.

Tehtaan prosessien syöttö tapahtuu pääasiallisesti muuntajien T01 ja T02 syöttämiltä pääkeskuksilta PK1 ja PK2. Tehtaan henkilökunnan mukaan tarkkaa prosessin ottamaa tehoa

ei tiedetä, mutta se pysyy kuitenkin tehtaan toiminnan kannalta lähes vakiona tehtaan prosessin ollessa käynnissä. Koko tehtaan nimelliskuorma ei saa ylittää 70 A, joka on liittymän pääkatkaisijan yläraja. Tämän ylärajan on asettanut Tampereen sähkölaitos.

Muuntajien T06 ja T03 lähdöt ovat eri testitilojen syöttöjä. Niiden teho vaihtelee testauksista riippuen, mutta testitiloja ei tulla käyttämään keskenään yhtäaikaisesti. Syöttö pääkatkaisijalta 4.Q0 muuntajalle T04 kulkee kokoomakiskostoa ja kaapelia pitkin.

Muuntajien kytkentävirrät arvioidaan taulukosta 5 muuntajien nimellistehoa suuremman luokan mukaan. Suurimpana oikosulkuvirtana käytetään vikavirtalaskennan maksimi kolmivaiheista oikosulkuvirtaa. Pienimpänä oikosulkuvirtana käytetään kaksivaiheista oikosulkuvirtaa.

## 6.5 Relesuojaus

Osa tehtaan keskijänniteverkon oikosulkusuojaus toteutetaan VAMP 140 ylivirtareleillä, jotka sijaitsevat pääkatkaisijalla 4.Q0, 20 kV-kojeiston ja 6 kV-kojeiston katkaisijoilla 8.Q1 ja 2.Q0. Rele on käyttötarkoitukseltaan sopiva sähkölaitos-, teollisuus-, laiva- ja off-shore sovelluksiin. Se on tarkoitettu syöttökiskojen ylivirta- ja maasulkusuojaukseen. Kyseessä on täysin numeerinen rele, joka tunnistaa virran suuruuden, muttei sen suuntaa tai laatua. Virran mittausta releille on toteutettu kaikista kolmesta vaiheesta virtamuuntajien kautta. (VAMP 140 -käyttöohjeet).

Ylivirtareleen asetteluvirta muodostuu asettelukertoimien ja virtamuuntajan ensiövirran tulona. Ylivirtareleen hidastettua porrasta merkitään  $I>$  ja hetkellisporrasta  $I>>$  nopein porrasta on  $I>>>$ . Alin porrasta  $I>$  voidaan konfiguroida toimimaan vakioaika- tai käänteisaikatoiminnallisena. VAMP 140-releillä käytettävissä ovat standardin IEC 60255-3 mukaiset neljä ominaiskäyrää: NI (Normal Inverse), VI (Very Inverse), EI (Extremely Inverse) ja LTI (Long Time Inverse). Portaat  $I>>$  ja  $I>>>$  ovat vakioaikatoimintaisia. (VAMP 140 -käyttö- ja konfigurointiohje).

Vakioaikaylivirtarele havahtuu, kun mittausvirta ylittää releen asetteluarvon ja toimii kun se on ollut havahtuneena asetteluajan. Käänteisaikaylivirtareleen toiminta-aika on käänteinen virtaan nähden eli se toimii sitä nopeammin mitä suurempi vikavirta on.

Standardin IEC 60255-3 määrittelemien käänteisaikakäyrien käänteisaikahidasteinen laukaisuaika  $t_{TRIP}$  lasketaan yhtälöllä:

$$t_{TRIP} = \frac{A \cdot k}{\left(\frac{I}{I >}\right)^p - 1} \quad (20)$$

jossa

$I$  on verkon vikavirta

$I >$  on releelle aseteltu havahtumisvirta

$A$ ,  $p$  ovat kertoimia, jotka määräytyvät sen perusteella mitä käänteisaikakäyrästä käytetään

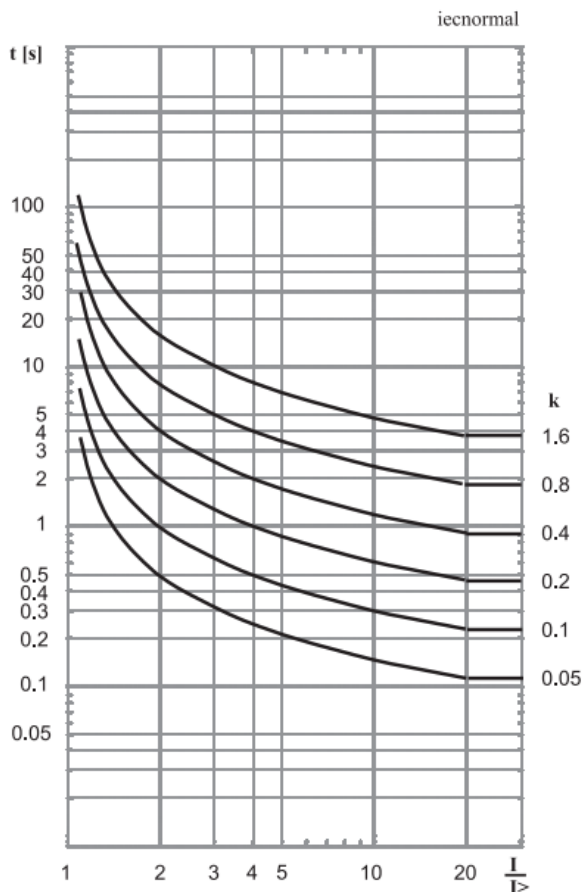
$k$  on aseteltu aikakerroin

Taulukosta 8 löytyy tarvittavat kertoimet  $A$  ja  $p$  kullekin käänteisaikakäyrälle. Kertoimet ovat IEC 60255-3 -standardin mukaiset (VAMP 140 -käyttö- ja konfigurointiohje).

TAULUKKO 8. IEC 60255-3 kertoimet  $A$  ja  $p$ .

Käänteisaikakäyrä	$A$	$p$
<i>Normal Inverse</i>	0,14	0,02
<i>Very Inverse</i>	13,5	1
<i>Extremely Inverse</i>	80	2
<i>Long Time Inverse</i>	120	1

Aseteltava aikakerroin  $k$  voidaan asetella VAMP 140 -käyttöohjeissakin esitettyjen toimintakäyrien perusteella. Käyrät on määritelty IEC 60255-3 standardista ja VAMP 140 releellä aikakerroin voidaan asetella portaattomasti 0,05 ja 3,20 väliltä. Releen vakioaikatoiminnon toiminta-aika on valittavissa 0,08 – 300,00 s väliltä 0,02 s portaalla. Kuvassa 12 on esimerkki Normal Inverse -toimintakäyrästä.



KUVA 11. Käänteisaikatoiminnassa käytettävissä olevia toimintakäyriä (VAMP 140 - käyttö- ja konfigurointiohje).

20 kV kojeiston suojareleillä on käytössä kaksi ensimmäistä porrasta  $I>$  ja  $I>>$ . Alempi porras  $I>$  toimii Normal Inverse -käänteisaikatoiminnalla.  $I>>$  on konfiguroitu vakioaikatoimintaiseksi (DT). 6 kV-kojeiston suojareleellä on käytössä kaikki kolme porrasta,  $I>$ ,  $I>>$ , ja  $I>>>$ , jotka ovat vakioaikatoimintaisia.

## 6.6 Selektiivisyys

Suoja-alueet muodostuvat suojareleiden ohjaamista katkaisijoista. Vierekkäisten suoja-alueiden peittäessä toisensa saadaan aikaan aukoton suojaus. Suojauksen toimiessa vain omalla suojaus-alueellaan tapahtuvissa vioissa on kyseessä absoluuttisesti selektiivinen suojaus. Suoja-alueet muodostuvat esimerkiksi johdoista, muuntajista, generaattoreista ja moottoreista.

## 6.7 Selektiivisyystarkastelu

Ylivirtasuojauksen releasettelut on syytä tarkastaa, koska testitilaan tulee uusi laitteisto ja sen käyttö riippuu siitä, kuinka paljon virtaa on mahdollista siirtää jakeluverkkoa pitkin. Tämä on tärkein seikka STATCOM-laitteiston kannalta. Selektiivisyystarkastelun pohjalta selvitetään mahdolliset muutokset suojarleiden asetteluille.

Jakeluverkolle (liite 1) tehdään selektiivisyystarkastelu. Tarkastelussa keskitytään STATCOM-laitteiston suojaukseen. Käsiteltävänä on tehtaan pääkeskus, 20 kV keskijännitekojeisto ja 6 kV -kojeisto. Tehtaan pienjännitepuolen keskuksat PK1 ja PK2 jätetään tarkastelun ulkopuolelle, kuin myös toisen testitilan muuntajalähtö.

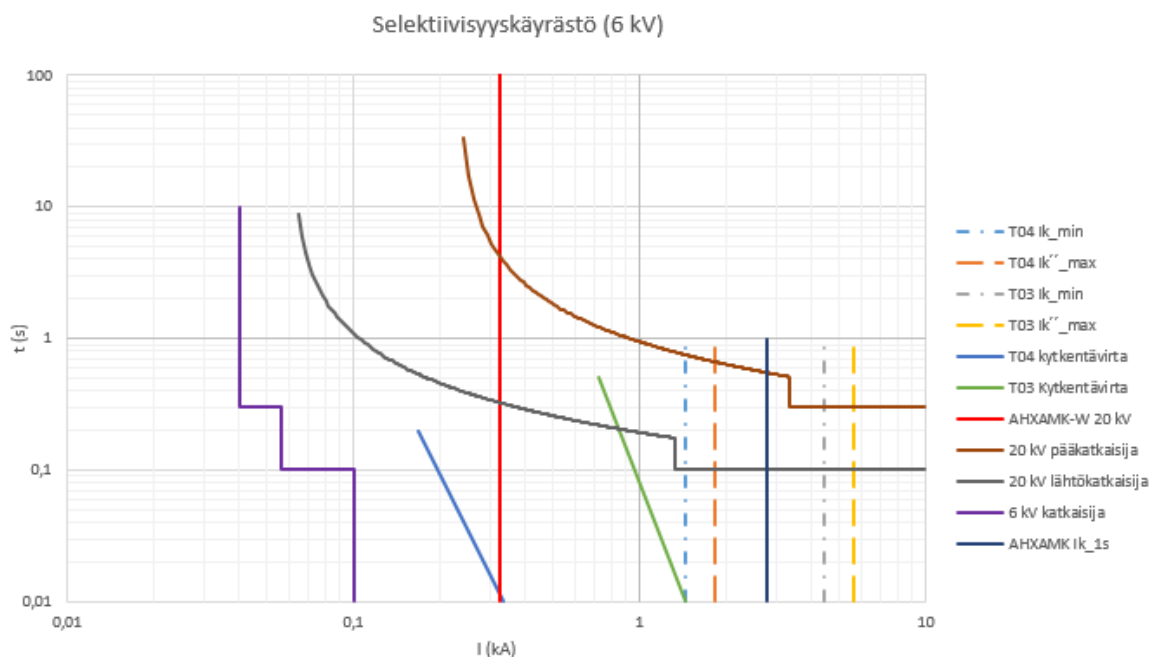
Seuraavaksi esitetään tämän hetkiset lähtötiedot tarkasteltavista kohteista. Tärkeimpiä lähtötietotarpeita ovat liittymän johtolähtökatkaisijan asettelu, liittymän oikosulkuvirta, kojeistojen releiden asettelu, kojeistojen laitetiedot, jakelumuuntajien tekniset tiedot ja kaapelointi. Selektiivisyystarkastelu tehdään ST 53.13 -kortin antaman esimerkin mukaisesti. Suojareleiden vanhat asettelut ja laitetiedot löytyvät liitteestä 14. Taulukossa 9 on esimerkki pääkatkaisijan laitetiedoista ja suojarleiden vanhoista asetteluista.

TAULUKKO 9. Pääkatkaisijan suojauksen lähtötietojen esittely

Tehtaan liittymä	
jakelujännite	20 kV
pääkatkaisija	Merlin Gerin SFset
pääkatkaisijan suojarle	VAMP 140
I >	70 A
käyrä	Normal Inverse
k	0,2
I >>	1000 A
t >>	0,30 s
suojauksen virtamuuntajat	50/5/5 A
suurin 3-vaiheinen oikosulkuvirta asiakkaan liittymässä	5,4 kA

Vallitsevien releasettelujen avulla muodostettiin ylivirtasuojille kuvaajat kuvan 13 kaavioon. 20 kV:n arvot on redusoitu 6 kV jännitetasolle. Ylivirtasuojien toimintakäyrät alkavat tehtaan sähköliittymän pääkatkaisijasta ja päättyvät 6 kV -kojeiston katkaisijaan. Myös muuntajien suurimmista ja pienimmistä ensiöoikosulkuvirroista, kytkentävirtasysäyksistä ja syöttökaapelin virrankestoisuudesta on tehty kuvaajat.

Sähkösyötön vastakkaisesta suunnasta, eli vasemmalta oikealle luettuna kuvaajat ovat seuraavat: 6 kV-katkaisijan releasettelu, 20 kV-lähtökatkaisijan releasettelu, muuntajan T04 kytkentävirtasysäys, 20 kV-pääkatkaisijan releasettelu, kaapelin AHXAMK-W 3x120/35 kuormitettavuus, T03 kytkentävirtasysäys, T04 pienin kaksivaiheinen oikosulkuvirta, T04 suurin kolmivaiheinen oikosulkuvirta, kaapelin AHXAMK-W yhden sekunnin oikosulkukestoisuus, T03 pienin kaksivaiheinen oikosulkuvirta ja T03 suurin kolmivaiheinen oikosulkuvirta. Muuntajien kytkentävirtasysäykset on arvioitu taulukon 5 pohjalta, hieman suuremmille muuntajille kuin on kyseessä.



KUVA 12. 6 kV jännitetasoon redusoitu selektiivisyyskäyrästä.

Sähkölaitoksen johtolähtökatkaisijan ylivirtasuojauksen toimintarajat ovat yksi rajoittava tekijä asiakkaan ylivirtasuojauksen toteuttamiselle. Tässä tapauksessa on ilmoitettu, että tehtaan pääkatkaisijan kuorma ei saa ylittää sen 70 ampeerin virta-asettelua. Asiakkaan verkossa tapahtuva vika ei saa aiheuttaa sähkölaitoksen suuntaan toimenpiteitä.

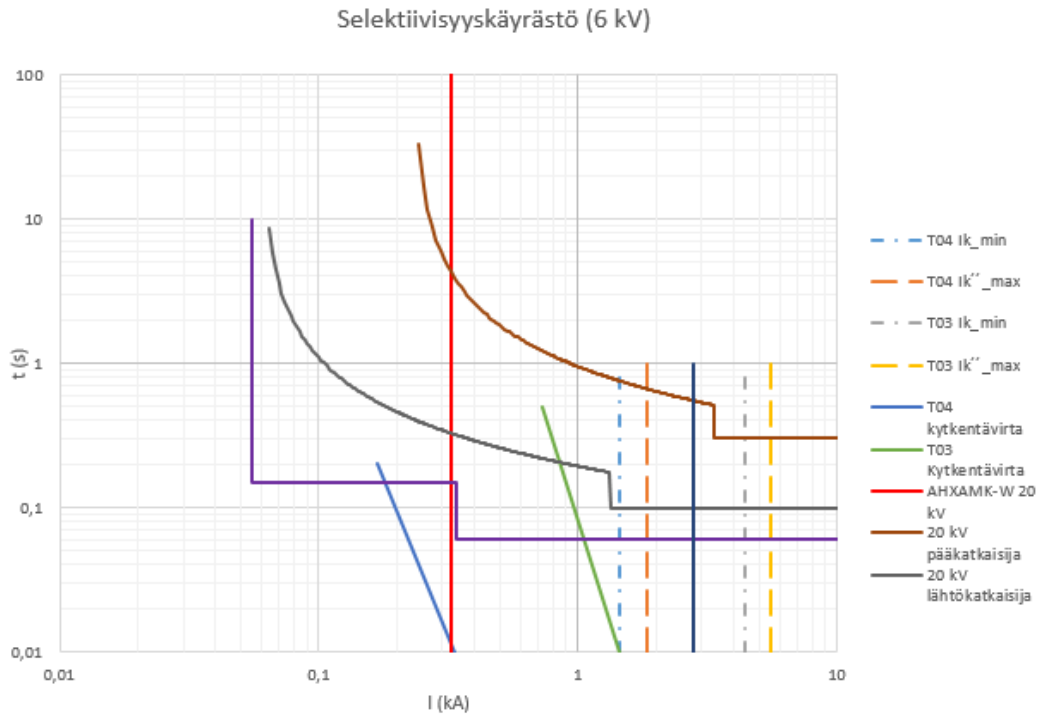
Muuntajan T03 oikosulkuvirrat eivät kykene laukaisemaan pääkatkaisijaa, kun muuntajaa suojataan sen lämpötilan mittaukseen perustuvalla suojauksella. Kyseinen suoja toimii ennen pääkatkaisijaa, eikä tehtaan muu sähkönjakelu häiriinny. Muuntajan T04 ensiöoikosulun tapahtuessa 6 kV kojeiston katkaisija ehtii toimia ennen 20 kV kojeiston katkaisijaa. Muuntajien T03 ja T04 ylikuormitettavuutta ei päästä hyödyntämään johtuen pääkatkaisijan asetteluista. Koska muuntajien kytkentävirtasysäystä ei tiedetty, päätettiin ne arvioida yläkanttiin. Tästä johtuen etenkin muuntaja T04 aiheuttaa releasetteluiden kannalta ongelmia, sillä 6 kV:n releen laukaisuporras  $I_{>>>}$  on alhainen. Kaapelin 1 sekunnin oikosulkukestoisuus on 2,8 kA, jonka suuruiset tai suuremmat virrat katkaistaan riittävän nopeasti. Kaapeloinnin suojaus toteutuu hyvin. STATCOM-laitteistossa syntyvät oikosulkuvirrat tapahtuvat 6 kV jännitetasossa ja ovat suuruudeltaan 1,84...4,32 kA luokkaa. Myös nämä vikavirrat ovat riittävän suuria toimivaan oikosulkusuojaukseen.

20 kV kojeiston suojareleen asettelu mahdollistaa tällä hetkellä 18 A virran kulun testitilan piirissä. 6 kV puolelle redusoituna kyseessä on 60 ampeerin virta, jota suojarele rajoittaa 40 ampeerin tasolle. 40 ampeeria STATCOM-demonstraattorin kolmiokytkennän sisällä vastaa n. 23 ampeeria, kun vaihevirta muunnetaan kolmiovirraksi (Tarkka P. & Hietalahti L. Piirianalyysi 2).

## 6.8 Laitteiston uuden suojauksen parametrit

20 kV ja 6 kV lähtöjen releiden uudet asetellut tehdään STATCOM-simulointien, muuntajien kytkentävirtasysäysten ja oikosulkuvirtojen sekä kaapeleiden kestoisuuden perusteella. Muuntajien ylikuormitusta ei päästä hyödyntämään sillä 20 kV kiskostoon ei voida tehtaan pääkatkaisijan asettelu takia syöttää suurempaa virtaa STATCOM:ilta, kuin katkaisijan releen asettelu sallii. Pääkatkaisijan ylivirtareleen aseteluihin ei kosketa ja ne pidetään ennallaan. Mahdolliset muutokset tehdään 2.Q0-katkaisijan suojareleelle ja 8.Q0-katkaisijan releelle.

Kuvassa 14 on selektiivisyyskäyrästä uusilla releasetteluilla. Muuntajan T04 kytkentävirtasysäyksen takia 6 kV-katkaisijan suojareleen  $I_{>>>}$  laukaisuporras poistettiin.



KUVA 13. Ehdotus suoja-releiden uusille asetteluille

Uusissa suoja-asetteluissa on haluttu maksimoida jakeluverkon kuormitettavuus. Kaavan 7 avulla selvitettyä porrasaikaa käytettiin apuna, kun uudet releasettelut määritettiin muutetulle portaalille suojauksen toiminnan takaamiseksi. Vanhojen ja uusien suoja-releiden asetteluiden vertailu on kirjattu alapuolella olevaan taulukkoon 10.

TAULUKKO 10. Katkaisijan 2.Q0 suoja-releen vanhat asettelut ja ehdotukset uusille

	Virtamuunta- jan muunto- suhde	I>		I>>		I>>>	
		x I <sub>N</sub> (A)	t (s)	x I <sub>N</sub> (A)	t (s)	x I <sub>N</sub> (A)	t (s)
<b>Nykyinen aset- telu</b>	100/5 A	0,40	0,3	0,56	0,15	1	0,10
<b>Korjausehdo- tus</b>	100/5 A	0,55	0,15	3,40	0,6	-	-

## 7 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli perehtyä STATCOM-demonstraattorin toimintaan ja tehdä laitevalintoja sekä suunnitella kaapelointia. Toimeksiantajan kannalta merkittävin osa opinnäytetyöstä oli demonstraattori-laitteiston suojausten selektiivisyyden tarkastelu, joka oli myös yksi työn päätavoitteista. STATCOM-laitteiston käyttötarkoitukseen, rakenteeseen ja toimintaperiaatteeseen tutustuttiin kansainvälisen kirjallisuuden ja tieteellisten artikkeleiden avulla. Demonstraattorin osalta tarkempia yksityiskohtia käytiin läpi toimeksiantajayrityksen yhteyshenkilön kanssa. Laitevalinnat ja kaapelin mitoittaminen tapahtui noudattaen laitteiston ja toimeksiantajan vaatimuksia. Mitoitus onnistuttiin suorittamaan, siten, että esitetyt vaatimukset täyttyivät ja noudattaen nykypäivän standardeja.

Selektiivisyyttä tutkittaessa kävi ilmi, että muuntajan T04 kytkeväävirtasysäys saattaisi aiheuttaa ongelmia katkaisijan 2.Q0 suojausalueen asetteluiden kannalta, vaikka kytkentävirtasysäyksen suuruus arvioitiin yläkanttiin. Mahdollisen ongelman saisi ratkaistua poistamalla I>>> -laukaisuporras käytöstä, sillä kaapelin virtakestoisuus on niin suuri, että suurimmatkaan oikosulut eivät ehdi aiheuttamaan vaurioita, jos vika katkaistaan viimeistään 0,30 sekunnin kuluessa. Muutokset pyrittiin tekemään porraskaikojen noudattaen, jotta releet ja katkaisijat saisivat tarpeeksi aikaa toimiakseen virheellisten laukaisujen välttämiseksi.

Katkaisijan 2.Q0 suojausalueen I>-portaan havahtumisvirtaa nostettiin 40 ampeerista 55 ampeeriin ja laukaisuaikaa laskettiin 150 millisekuntiin. I>>-portaan havahtumisvirtaa nostettiin 340 A ja laukaisuaikaa pidennettiin 600 millisekuntiin. Näin mahdollistettaisiin suurempi kapasiteetti STATCOM-demonstraattorin käytettäväksi ja estämään muuntajan T04 kytkeväävirtasysäyksen aiheuttama katkaisu. Tehty muutos ei heikennä suojausten selektiivisyyttä.

Suojausten pitäisi toimia siten, että 6 kV- kiskoston lähdöissä tapahtuvat viat eivät laukaisisi 20 kV-kiskoston suojausalueita katkaisten suuremman osan verkosta pimeäksi kuin on tarpeen. Tehtaan sähköjakelun kannalta katkaisijan 8Q.0 laukeaminen ei ole erityisen vaarallista, sillä sen lähdössä ei ole muuta syöttöä tällä hetkellä kuin 6 kV-kiskosto STATCOMin lähtöä varten. Epämiellyttävintä on tehtaan liittymän pääkatkaisijan avau-

tuminen, joka katkaisisi koko tehtaan jakeluverkon sähkösyötön. Pahimmassa vikatapauksessa, jos tehtaan pääkatkaisija ei toimisi, vika ulottuisi sähköverkkoon asti ja sähköverkon oma suojaus voi toimiessaan katkaista suurenkin osan Myllypuron alueesta jännitteettömäksi.

Tämän hetkisillä asetteluilla ei päästä hyödyntämään STATCOM-demonstraattoria sen nimellisteholla vaan joudutaan tyytymään melko pieneen loistehonkompensointiin laitteiston kapasiteettiin nähden. Muuntajan T03 ylivirtareleen asettelua muuttamalla saataisiin STATCOMin verkkoon syöttämä virta suuremmaksi. Tehtaan tuotannon prosessien vaatima teho on vakio, mutta sen tarkkaa kulutusta ei tällä hetkellä ole tiedossa. Tarkoituksena on lisätä tehtaan pääkeskukselle mittarit tuotannon tehonkäytön selvittämiseksi. Tällöin voitaisiin 6- ja 20 kV-kojeistojen releet asettaa siten, että STATCOM voisi tuottaa enemmän loistehoa tehtaan jakeluverkkoon.

Ylivirtasuojauksessa käytetyt numeeriset releet ovat samanlaisia, mikä mahdollistaa tarkkojen porrassaikojen määrittämisen ja niiden avulla aikaselektiivisyys voidaan asettaa tarkasti, mikä mahdollistaisi jakeluverkon suuremman kuormittamisen. Samoilla VAMP 140 -releillä on mahdollista asettaa lukitustoiminta, jossa havahtunut rele antaa lukituskäskyn ylemmälle suojareleelle, ettei tämä toimisi.

Kun tehtaan tuotantoprosessin kuluttama teho saadaan tulevaisuudessa tietoon, niin jatkotutkimuksen aiheena olisi hyvä selvittää suojareleiden uudelleenasettelun mahdollisuudet. Tämä vaatisi virtamuuntajien läheisempää tutkimista tarkkojen porrassaikojen selvittämiseksi 20 kV -pää- ja lähtökatkaisijan käänteisaikaportaiden osalta.

## LÄHTEET

118824 HXCMK 10 kV 1x400-35.pdf

ABB Teknisiä Tietoja ja Taulukoita. 2000. Vaasa: Suomalaiset ABB-yhtiöt

ABB. OJON Indoor Type Disconnectors Catalogue. Saatavissa: <http://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/isolators-switches-disconnectors/indoor-switches/disconnectors/iec-indoor-disconnector-ojon>

ABB. UEMC 40 ABD Motor operating device Installation, operating and recycling guide. Saatavissa: <http://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/isolators-switches-disconnectors/indoor-switches/disconnectors/iec-indoor-disconnector-ojon>

Acharya, N. 2005. Facts about Flexible AC Transmission Systems. Luettu 17.4.2017. [https://www.researchgate.net/publication/43516579\\_Facts\\_about\\_flexible\\_AC\\_transmission\\_systems\\_FACTS\\_controllers\\_Practical\\_installations\\_and\\_benefits](https://www.researchgate.net/publication/43516579_Facts_about_flexible_AC_transmission_systems_FACTS_controllers_Practical_installations_and_benefits)

D1:2012 Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. 2012. Sähköinfo Oy. Espoo: Painokurki Oy

Electrical Fault Calculation Positive... Luettu 20.5.2017. <https://www.electrical4u.com/electrical-fault-calculation-positive-negative-zero-sequence-impedance/>

Hietalahti, L. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka. Vantaa: Hansaprint Oy

Hietalahti, L. 2011. Tehoelektroniikan perusteet. Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka Vantaa: Hansaprint Oy

Hingorani N G, Gyugyi L. Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC transmission Systems. IEEE Press, Piscataway NJ, 2000

IEC 60255-3

Korpinen L. Muuntajat ja sähkölaitteet. Luettu 5.5.2017 [www.leenakorpinen.fi/archive/svt\\_opus/9muuntajat\\_ja\\_sahkolaitteet.pdf](http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/9muuntajat_ja_sahkolaitteet.pdf)

Lavapuro J. 2017. STATCOM demonstrator Simulation study -raportti

Lavapuro J. 2017. STATCOM demonstrator Startup and fault study -raportti

Mörsky J. Relesuojaustekniikka. 1992 Otatieto. Hämeenlinna: Karisto Oy.

SFS 6000 Pienjännitesähköasennukset ja sähköturvallisuus 2012. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 60909

ST 53.13. Kiinteistön sähköverkon suojauksen selektiivisyys. Luettu 10.3.2017

STATCOM: future-proofing reactive power compensation. Luettu 20.5.2017.  
<https://www.gegridsolutions.com/press/gepress/STATCOM.htm>

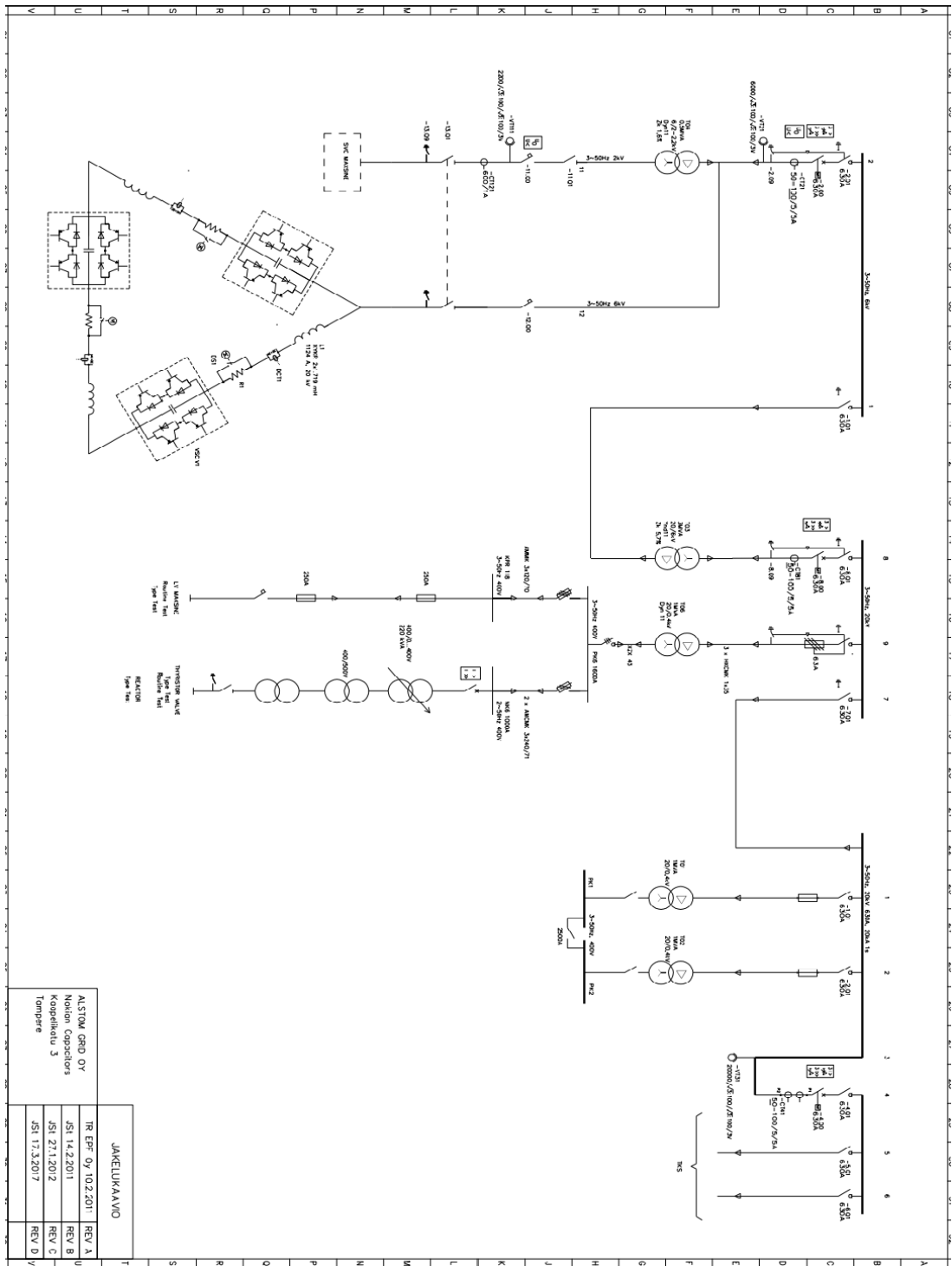
STATCOM, STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR, 2011. Luettu 20.5.2017.  
<http://www.powerqualityworld.com/2011/09/statcom-static-synchronous-compensator.html>

Tarkka, P. Hietalahti, L. 2003. Piirianalyysi 2. Edita Prima Oy

VAMP 140 Ylivirta- ja maasulkurele, käyttö- ja konfigurointiohje.

Willman J. 2006. Suurjänniteverkon suojaus teollisuudessa. Luettu 27.4.2017.  
[http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb254.nsf/0/94d474926060008ac1257162004b9ff7/\\$file/PRES\\_Juha\\_Willman\\_Verkon\\_suojaus\\_ja\\_mitoitus.pdf](http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb254.nsf/0/94d474926060008ac1257162004b9ff7/$file/PRES_Juha_Willman_Verkon_suojaus_ja_mitoitus.pdf)

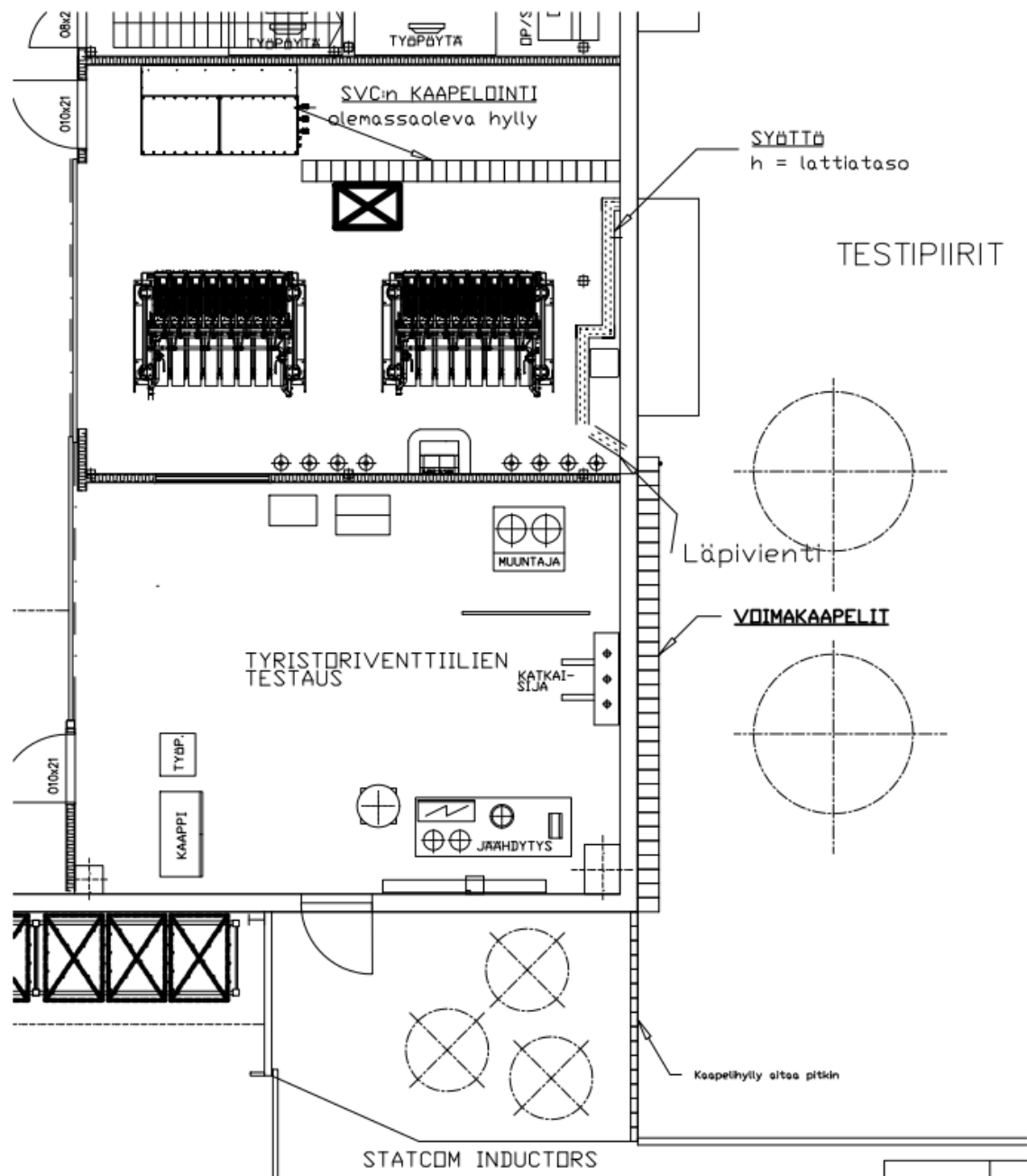
Liite 1. Jakelukaavio



JAKELUKAAVIO	
IR EPF 09/10.2.2011	REV A
JSI 14.2.2011	REV B
JSI 27.1.2012	REV C
JSI 17.3.2017	REV D

ALSTOM GRID OY  
 Notion Capacitors  
 Koppeliäntie 3  
 Tampere

Liite 2. STATCOM-testitilan layout.



Liite 3.Voimakaapelin teknisiätietoja. (<https://www.reka.fi>)

**REKA**  
C A B L E S

TECHNICAL SPECIFICATION

14.1.2013 AnPi

**HXCMK**

Page 2/2

6/10(12) kV

HD 620 S2:2010 Part 10 Section F

Product code: 1188240

### Technical details

	<b>1x400/35 1188240</b>
Nominal diameter of conductor (mm)	23,2
Nominal cross section of metallic screen (mm <sup>2</sup> )	35
Nominal thickness of sheath (mm)	2,2
Diameter of cable, approx. (mm)	39
Weight of cable, approx. (kg/km)	4600
Maximum forces during installation when pulling by	
- pulling stocking (kN)	8,0
- pulling-eye (kN)	20,0
Minimum bending radii	
- during handling and installation (m)	0,59
- in case of one smooth bending to final position (m)	0,43
Max resistance of conductor at +20 °C (Ω/km)	0,0470
Max resistance of metallic screen at +20 °C (Ω/km)	0,6
Inductance (mH/km) <sup>1</sup>	
- cables in trefoil formation	0,29
- cables in flat formation	0,48
Capacitance (μF/km) <sup>1</sup>	0,54
Charging current (A/km) <sup>2</sup>	1,0
Earth fault current (A/km) <sup>2</sup>	2,9
Current ratings (according to HD 620 S2:2010 part 10 section F) Cables in ground +15 °C, laying depth 0,7 m, conductor temperature +65 °C, metallic screen both ends bonded (A)	
- trefoil formation	625
- flat formation	590
Cables in air of +25 °C, conductor temperature +90 °C, metallic screen both ends bonded (A)	
- trefoil formation	835
- flat formation	785
Max 1 second thermal short-circuit current (kA)	
- conductor (temp. at the beginning +90 °C, final temp. +250 °C)	57,1
- metallic screen (temp. at the beginning +80 °C, final temp. +250 °C)	5,2

1) Calculated value, for guidance only

2) Calculated value for guidance, with operational voltage U = 10 kV

Liite 4. Simulointitulokset. (Lavapuro J. 2017. STATCOM demonstrator start up and fault study)

Startup and fault study

Revision B

Table 4 Fault cases

Case number	Fault type	SCL (MVA)	Pre-fault V (pu)	VSC delta current ref (pu)	20kV V <sub>1</sub> (kV)	20kV V <sub>2</sub> (kV)	20kV I <sub>1</sub> (kA)	20kV I <sub>2</sub> (kA)	6kV V <sub>0</sub> (kV)	6kV I <sub>1</sub> (kA)	6kV I <sub>2</sub> (kA)
1	3	103	1.1	0	8.43	0	1.1	0	0.29	3.67	0
2	2	103	1.1	0	10.25	1.82	0.55	0.55	0.2	1.84	1.84
3	1	103	1.1	0	12.66	0.06	0	0	3.8	0	0
4	3	103	1.1	0.5	8.43	0	1.1	0	0.57	3.67	0
5	2	103	1.1	0.5	10.56	2.13	0.55	0.55	0.53	1.84	1.84
6	1	103	1.1	0.5	12.7	0.05	0	0	3.82	0.01	0
7	3	187	1.1	0	9.93	0	1.3	0	0.38	4.32	0
8	2	187	1.1	0	11.25	1.32	0.65	0.65	0.18	2.16	2.16
9	1	187	1.1	0	12.73	0.06	0	0	3.78	0	0
10	3	187	1.1	0.5	9.93	0	1.3	0	0.57	4.32	0
11	2	187	1.1	0.5	11.32	1.39	0.65	0.65	0.54	2.16	2.16
12	1	187	1.1	0.5	12.73	0.05	0	0	3.81	0.01	0
13	3	103	0.9	0	6.9	0	0.9	0	0.17	3	0
14	2	103	0.9	0	8.44	1.54	0.45	0.45	0.17	1.5	1.5
15	1	103	0.9	0	10.4	0.05	0	0	3.13	0	0
16	3	103	0.9	0.5	6.9	0	0.9	0	0.54	3	0
17	2	103	0.9	0.5	8.64	1.75	0.45	0.45	0.55	1.5	1.5
18	1	103	0.9	0.5	10.39	0.06	0	0	3.11	0.01	0
19	3	187	0.9	0	8.13	0	1.06	0	0.21	3.54	0
20	2	187	0.9	0	9.31	1.19	0.53	0.53	0.18	1.77	1.77
21	1	187	0.9	0	10.41	0.05	0	0	3.1	0	0
22	3	187	0.9	0.5	8.13	0	1.06	0	0.53	3.54	0
23	2	187	0.9	0.5	9.26	1.14	0.53	0.53	0.54	1.77	1.77
24	1	187	0.9	0.5	10.41	0.05	0	0	3.1	0.01	0

## Liite 5. Oikosulkuvirta 20 kV-kiskostolla

Syöttäväverkko Q	$I''_{kQ} = 5,4 \text{ kA}$ $Z_{Qmin} = \frac{c_{min} \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} = \frac{1,0 \cdot 20 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot 5,4 \text{ kA}} \approx 2,14 \Omega$
Kaapeli L1 AHXAMK-W 3x120+35	$l = 0,01 \text{ km}$ $r = 0,253 \Omega/\text{km}$ $x = 0,12 \Omega/\text{km}$ $R_{L1} = 2,53 \text{ m}\Omega$ $X_{L1} = 0,12 \text{ m}\Omega$ $Z_{L1} = \sqrt{R_{L1}^2 + X_{L1}^2} = \sqrt{(2,53^2 + 0,12^2) \text{ m}\Omega} = 2,533 \text{ m}\Omega$
Kokonaisoikosul- kuimpedanssi ennen 20 kV-kiskostoa	$Z_{20kV} = Z_{Qmin} + Z_{L1}$ $= \sqrt{(2,53 \cdot 10^{-3} \Omega + 0,214 \Omega)^2 + (0,12 \cdot 10^{-3} \Omega + 2,044 \Omega)^2}$ $= \sqrt{(0,217^2 + 2,035^2) \Omega}$
Oikosulkuvirta 20 kV-kiskolla	$I''_k = \frac{1,1 \cdot 20 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(0,217^2 + 2,035^2) \Omega}} = 4,17 \text{ kA}$

## Liite 6. Oikosulkuvirta muuntajan T03 yläjännitepuolella

Muuntaja T03	$u_k = 5,7\%$ $S_n = 3000 \text{ kVA}$ $U_n = 20 \text{ kV}$ $P_k = 20,2 \text{ kW}$ $I_n = 86,60 \text{ A}$ $Z_n = \frac{U_n^2}{S_n} = 133,33 \Omega$ $Z_{kT03} = \frac{u_k}{100\%} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{5,7\%}{100\%} \cdot \frac{(20 \cdot 10^3 \text{ V})^2}{3000 \cdot 10^3 \text{ VA}} = 7,6 \Omega$ $r_k = \frac{P_k}{S_n} \cdot 100\% = \frac{20200 \text{ W}}{3000 \cdot 10^3 \text{ VA}} \cdot 100\% = 0,67\%$ $R_k = \frac{r_k}{100\%} \cdot Z_n = \frac{P_k}{3 \cdot I_n^2} = \frac{20200 \text{ W}}{3 \cdot (86,60 \text{ A})^2} \approx 0,90 \Omega$ $X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{(7,6 \Omega)^2 - (0,90 \Omega)^2} = 7,55 \Omega$
Kokonaisoikosulkuimpedanssi muuntajalla T03	$Z_{T03} = Z_{Qmin} + Z_{L1} + Z_{kT03}$ $= \sqrt{(2,53 \cdot 10^{-3} \Omega + 0,214 \Omega + 0,90 \Omega)^2 + (0,12 \cdot 10^{-3} \Omega + 2,044 \Omega + 7,55 \Omega)^2}$ $= \sqrt{(1,117^2 + 9,585^2)} \Omega$
Oikosulkuvirta muuntajan T03 yläjännitepuolella	$I_k'' = \frac{1,1 \cdot 20 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(1,117^2 + 9,585^2) \Omega}} = 1,316 \text{ kA}$

## Liite 7. Oikosulkuvirta 6 kV-kiskostolla

Kaapeli L2 AHXAMK-W 3x120+35	$l = 0,053 \text{ km}$ $r = 0,253 \text{ } \Omega/\text{km}$ $x = 0,12 \text{ } \Omega/\text{km}$ $R_{L2} = 13,4 \text{ m}\Omega$ $X_{L2} = 6,36 \text{ m}\Omega$ $Z_{L2} = \sqrt{R_{L2}^2 + X_{L2}^2} = \sqrt{(13,4^2 + 6,36^2) \text{ m}\Omega} = 14,83 \text{ m}\Omega$
Kokonaisoikosul- kuimpedanssi 6 kV- kiskostolla	$Z_{k_{6kV}} = Z_{L2} + Z'_{20kV}$ $= \sqrt{(14,83 \cdot 10^{-3} + (0,09 \cdot 1,117))^2 + (6,36 \cdot 10^{-3} + (0,09 \cdot 9,585))^2}$
Oikosulkuvirta 6 kV- kiskolla	$I_k'' = \frac{1,1 \cdot 6 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(0,115^2 + 0,869^2) \Omega}} = 4,347 \text{ kA}$


## Liite 8. Oikosulkuvirta muuntajan T04 yläjännitepuolella

Muuntaja T04	$u_k = 1,6 \%$ $S_n = 500 \text{ kVA}$ $U_n = 6 \text{ kV}$ $P_k = 2700 \text{ kW}$ $I_n = 48,0 \text{ A}$ $Z_n = \frac{U_n^2}{S_n} = 72 \Omega$ $Z_{k_{T04}} = \frac{u_k}{100 \%} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{1,6 \%}{100 \%} \cdot \frac{(6 \cdot 10^3 \text{ V})^2}{500 \cdot 10^3 \text{ VA}} = 1,152 \Omega$ $r_k = \frac{P_k}{S_n} \cdot 100 \% = \frac{2700 \text{ W}}{500 \cdot 10^3 \text{ VA}} \cdot 100 \% = 0,54 \%$ $R_k = \frac{r_k}{100 \%} \cdot Z_n = \frac{P_k}{3 \cdot I_n^2} = \frac{2700 \text{ W}}{3 \cdot (48,0 \text{ A})^2} \approx 0,39 \Omega$ $X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{(1,152 \Omega)^2 - (0,39 \Omega)^2} = 1,08 \Omega$
Kokonaisoikosulkuimpedanssi muuntajalla T04	$Z_{T03} = Z_{6kV} + Z_{k_{T03}}$ $= \sqrt{(0,115 + 0,39)^2 \Omega + (0,869 + 1,08)^2 \Omega}$ $= \sqrt{(0,505)^2 \Omega + (1,949)^2 \Omega}$
Oikosulkuvirta muuntajan T04 yläjännitepuolella	$I_k'' = \frac{1,1 \cdot 6 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(0,505^2 + 1,949^2) \Omega}} = 1,892 \text{ kA}$

## Liite 9. Merlin Gerin SFset -katkaisijan kilpiarvot

<b>MERLIN GERIN SFset</b>		
U	24	kV
U <sub>w</sub>	125	kV
I <sub>sc</sub>	16	kA
I <sub>n</sub>	630	A

## Liite 10. Uniswitch CBC -kojeiston kilpiarvot

<b>ABB</b>	
Serial number	1VF 1 631411
Production year	<b>2007</b>
Project number	<b>102565</b>
IEC 62271-200	
<b>UNISWITCH</b>	<b>CBC</b>
Instruction manual	UNIS14FI
Voltage	24 kV
Frequency	50 Hz
Lightning impulse withstand voltage	125 kV
Power frequency withstand voltage	50 kV
Normal current busbar	630 A
Normal current circuit	630 A
Short-time withstand current	20 kA, 1 s
Peak withstand current	50 kA
Rated filling level for insulation	145 kPa
Minimum functional level for insulation	130 kPa
Insulation fluid and mass	SF6: 0,5 kg
Internal arc classification	
Accessibility type code	
Arc test current	20 kA, 1 s
	
MADE in ABB	

Liite 11. HD4/S Circuit-Breaker -katkaisijan kilpiarvot

CIRCUIT-BREAKER		IEC 62271-100	
HD4/S 24.06.20		CEI 17-1	
CLASSIFICATION	E2,M2,C2	PR. YEAR 2007	
SN	1VC1AH00007698		
M	MASS	90	Kg
Ur	VOLTAGE	24	kV
Up	LIGHTING IMPULSE WITHSTAND VOLTAGE	125	kV
Ud	POWER FREQUENCY WITHSTAND VOLTAGE	50	kV
fr	FREQUENCY	50/60	Hz
Ir	NORMAL CURRENT	630	A
	WITH FORCED VENTILATION BY ABB DESIGN		A
Ik	SHORT TIME WITHSTAND CURRENT	20	kA
tk	DURATION OF SHORT CIRCUIT	3	s
Isc	SHORT CIRCUIT BREAKING CURRENT	25	20
	MAKING CAPACITY (PEAK VALUE)	63	50
	AT THE VOLTAGE OF	12	24
	D.C. COMPONENT	< =	35
Ic	CABLE-CHARGING BREAKING CURRENT	31,5	A
P <sub>rm</sub>	SF6 FILLING PRESSURE AT 20° C	0,380	MPa
m	SF6 MASS FOR CIRCUIT-BREAKER	0,282	Kg
	OPERATING SEQUENCE	O-0,3S-CO-15S-CO	
ELECTRICAL DIAGRAM 1VCD400018 (E0641)			
FIG.07 FIG.11 FIG.33			
			
ESH9		OPERATING MECHANISM	
-MO124 V			
Made by ABB			

## Liite 12. Muuntajan T04 tekniset tiedot



## TECHNICAL DATA SHEET

Doc. Number E070108  
Design number 20000

Description	Date	Prepared by
Rev. A Preliminary for offer	08.01.2007	JK
Rev. B Cable entries.	19.02.2007	JK
Rev. C -	-	-

**GENERAL DATA**

<i>Project</i>	Test transformer for MaxSine active filters
<i>Customer reference</i>	Nokian Capacitors / Heikki Stenius. Specification "6-2 kV trafo spec" dated 07-01-04.
<i>Application</i>	2-winding isolation transformer
<i>Transformer type</i>	Vacuum pressure impregnated dry type transformer
<i>Cooling method</i>	AN, convection cooled
<i>Final location of the transformer</i>	< 1000 m above sea-level
<i>Standards</i>	IEC 60076, IEC60726
<i>Certification</i>	-

**WINDING DATA**

	Primary HV	Secondary LV
<i>Rated power</i>	500 kVA	500 kVA
<i>Service factor</i>	S1	S1
<i>Connection symbol</i>	D	yn11
<i>Rated voltage (on no-load)</i>	6000 V	2000 V
<i>Tappings</i>	-	2200 V
<i>Voltage on 4/4 load, p.f. 0,95</i>	1,000x Un	1981 V
<i>Voltage on 4/4 load, p.f. 0,80</i>	1,000x Un	1974 V
<i>Rated current</i>	48 A	144 A (131A @ 2200V)
<i>Material</i>	Copper	Aluminium
<i>Temperature rise class</i>	F / 100 K	F / 100 K
<i>Insulation class</i>	H / 180°C	H / 180°C
<i>Insulation level</i>	LI60AC20	LI40AC10
<i>Impedance</i>	-	1,6 % (at 500 kVA) Short-circuit reactance max 1,5 %
<i>Impregnation</i>	Vacuum pressure	Vacuum pressure

**ADDITIONAL TECHNICAL DATA**

<i>Rated frequency</i>	60 Hz
<i>Max ambient temperature</i>	45°C
<i>Inrush current</i>	45 x In
<i>Noise pressure level</i>	66 dB(A) / 1 m
<i>No-load losses</i>	2300 W
<i>Load losses</i>	2700 W (at 120°C, 6/2 kV voltage ratio, sinusoidal current)
	3300 W (at 120°C, 6/2 kV voltage ratio, with 100Ap-p / 7kHz ripple current)
<i>Losses to environment</i>	5600 W
<i>Water data (if AFWF cooled)</i>	-
<i>Weight</i>	3300 kg

## Liite 13. Muuntajan T03 kilpiarvot

Toiminnot Eteen Tulosta Ohje Muistio Ul  
 Tervasaari LAITTEEN TIEDOT LR31B0  
 MASTER 12.08.2005 09:50 Ver. 10.02.2000 12:4

Laitenumero	110096	Laji	T03 Jakelumuuntaja		v m h l
Konepaikka	800055		PK8 MUUNTAJAT + KATKAISIJAT		X
Sähköpiiri			Koje	Nimike	
Tehtävä	varalla		Sijainti	IVON ASEMA	
Keskuslähtö				Toimittaja	
Tyyppi	KTMU24X7129			Hank./valm.v.	/ 1970
Valm.nro	5067626			Takuu päättyy	
Valmistaja	STRÖMBERG			Asiakirja	
Valm.kok.pi					
Nimellisteho	3000 kVA	Kytk.ryhmä	YNd11	Taajuus	50 Hz
Ensiojännite	20000	V Käämikyt		Kok. paino	7300 kg
Ensiovirta	86.6 A	Toisiojänn.	6000 V	Nost.paino	kg
Vaihteluväli	+2*2.5%	Toisiovirta	289 A	Ölj. paino	1600 kg
Öljyn laatu	DIALA OIL DX		Mitat	2200*1170	
Jäähdytystapa	ONAN		Tyhjäk.häv. (Po)	2.35	
	Zk	Uk 5.7	Kuorm.häv. (Pk)	20.2	kW
Huomautus	STANDARD IEC 76/1967	Io:0.4%		RL /	EH

SQL0010I Tiedot muutettu.

## Liite 14. Suojareleiden asettelut

## Tehtaan liittymä

- jakelujännite 20 kV
- pääkatkaisija Merlin Gerin SFset, jossa suojareleenä VAMP 140
  - I > 70 A
  - käyrä Normal Inverse
  - k 0,2
  - I >> 1000 A
  - t >> 0,30 s
  - suojauksen virtamuuntajat 50/5/5A
- suurin 3-vaiheinen oikosulkuvirta asiakkaan liittymässä 5,4 kA

## Kojesto 8

- käyttöjännite 20 kV
- pääkatkaisija ABB Uniswitch CBC, jossa suojareleenä VAMP 140
  - I > 18 A
  - käyrä Normal Inverse
  - k 0,08
  - I >> 400 A
  - t >> 0,10 s
  - suojauksen virtamuuntajat 50/5/5A
- muuntajan syöttökaapeli AHXAMK-W 3 x 120/35

## Muuntaja T03

- öljyristeinen
- teho S 3000 kVA
- oikosulkuimpedanssi 5,7 %
- muuntosuhde 20/6 kV

## Kojesto 2

- käyttöjännite 6 kV
- pääkatkaisija ABB CB HD4/S, jossa suojareleenä VAMP 140
  - I > 40 A
  - t > 0,30 s

I >> 56 A

t >> 0,15 s

I >>> 100 A

t >>> 0,10 s

suojauksen virtamuuntajat 100/5/5A

- muuntajan syöttökaapeli AHXAMK-W 3 x 120/35

#### Muuntaja T04

- kuivamuuntaja
- teho S 500 kVA
- oikosulkuimpedanssi 1,6 %
- muuntosuhde 6/2 – 2,2 kV

## Liite 15. AHXAMK-W -keskijännitekaapelin teknisiä tietoja

	1x120/35 S.nro. 0622433
Nominal diameter of conductor (mm)	23,2
Diameter of cable (mm)	39
Minimum bending radii	
- during handling and installation (m)	0,59
- in case of one smooth bending to final position (m)	0,43
Max. resistance of conductor ( $\Omega/\text{km}$ )	0,047
Inductance (mH/km)	
- cables in trefoil	0,38
Capacitance ( $\mu\text{F}/\text{km}$ )	0,23
Current rating	
Cables in air of +25°C conductor temperature +90°C (A)	325
Current rating	
Cables underground, conductor temperature +65°C (A)	265
Thermal short-circuit current of conductor, 1 s (kA)	11,3
Thermal short-circuit current of metallic screen, 1 s (kA)	2,8