



## **IED-LAITTEIDEN HORISONTAALISTEN GOOSE- JA SV-VIESTIEN KOESTAMINEN**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan diplomityö

2022

Vesa Aitto-oja

Tarkastajat: Apulaisprofessori Jukka Lassila

Tutkijatohtori Janne Karppanen

Ohjaaja: DI Juho Jaakkola

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Sähkötekniikka

Vesa Aitto-oja

### **IED- laitteiden horisontaalisten GOOSE- ja SV-viestien koestaminen**

Sähkötekniikan diplomityö

2022

88 sivua, 28 kuvaa ja 7 taulukkoa

Tarkastajat: Apulaisprofessori Jukka Lassila ja tutkijatohtori Janne Karppanen

Ohjaaja: DI Juho Jaakkola

Avainsanat: OMICRON, GOOSE, SV, IEC 61850

Tämä diplomityö käsittelee neljä aihekokonaisuutta, jotka liittyvät sähköasemien käyttöön- otto- ja kausikoestukseen. Ensimmäisen aihekokonaisuuden tavoitteena oli kartoittaa nyky- päivän ja tulevaisuuden sähköasemien koestustapoja sekä verrata eri toisiokoestuslaitteiden käytettävyyttä tulevaisuuden sähköasemien koestuksiin. Vertailussa oli mukana yrityksen oma koestuslaite. Toisen aihekokonaisuuden tavoitteena oli selvittää IEC 61850 -standardin ja aikakriittisten GOOSE- ja SV-kommunikaatioprotokollien vaikutukset sähköasemalle. Näille kommunikaatioprotokollille tutkittiin eri käyttöönotto- ja kausikoestustapoja. Kol- mannessa aihekokonaisuudessa kerrottiin IEC 61850 -standardin mukainen suojareiden konfigurointiprosessi ja tavoitteena oli esittää ratkaisumalli kausikoestuksen tuomaan haas- teeseen suojareiden ollessa sähkössä koestuksen aikana. Neljännessä aihekokonaisuudessa esiteltiin projektikohde, jossa testattiin GOOSE- ja SV-kommunikaatioprotokollien koesta- mista. Lisäksi esiteltiin etenemisjärjestys sähköasemien käyttöönotto-koestukseen.

Tarkasteluiden perusteella todettiin tulevaisuuden sähköasemien itsevalvontaominaisuuksien lisääntyvän ja yrityksen toisiokoestuslaitteen olevan kilpailukykyinen. Lisäksi yrityksen koestuslaitteella kyetään koestamaan myös tulevaisuuden sähköasemia, kunhan investoi- daan tarvittaviin koestuslisensseihin. Toisen aihekokonaisuuden tuloksena luotiin käyttöoh- jeet erään koestuslaitevalmistajan ohjelmiin, joilla GOOSE- ja SV-kommunikaatioprotokol- lat voidaan koestaa. Kolmannen aihekokonaisuuden tuloksena toteutettiin konfiguroinnin avulla ratkaisumalli, jolla helpotetaan sähköasemien kausikoestusta. Neljännen aihekoko- naisuuden käytännönkoestusten perusteella varmistuttiin koestusohjelmien sisäisten käyttö- ohjeiden toimivuudesta.

## ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Vesa Aitto-oja

### **Testing the horizontal GOOSE and SV messages of IED devices**

Master's thesis

2022

88 pages, 28 figures and 7 tables

Examiners: Assoc Prof. Jukka Lassila and D.Sc. (Tech.) Janne Karppanen

Supervisor: M.Sc. (Tech.) Juho Jaakkola

Keywords: OMICRON, GOOSE, SV, IEC 61850

This Master's Thesis consists of four topics related to commissioning and maintenance testing of electrical substations. The goal of the first topic was to elaborate the present and the future testing methods of substations and compare the usability of different secondary injection devices in future substation testing. A device owned by the company was involved in the comparison. The goal of the second topic was to investigate the effects of IEC 61850 standard and time-critical GOOSE and SV communication protocols to a substation. Different commissioning and maintenance testing procedures were studied on these communication protocols. The third topic described the protective relay configuration process based on the IEC 61850 standard. The goal was to present a solution to the challenge when the protective relays are electrified during testing. The fourth topic introduced a project site where the GOOSE and SV communication protocols were tested. Additionally, an order of progress was formed, which defines how a commissioning testing can be executed at a substation.

The results from the first topic pointed out that the future substations' self-monitoring capabilities are increasing, and the secondary injection device of the company is competent. Additionally, the testing device of the company is capable of testing the future substations, as long as appropriate testing licenses are invested in. As a result from the second topic, instructions to a certain testing device manufacturer's software program were made. The instructions describe how the GOOSE and SV communication protocols can be tested. Based on the elaboration of the third topic, a configuration model was made, which makes the maintenance testing of substations easier. The practical testing in the fourth topic insured that the instructions to the testing programs function correctly.

## KIITOKSET/ ACKNOWLEDGEMENTS

Tämä diplomityö toteutettiin Destia Oy:n Jakelu- ja teollisuusverkot-yksikölle. Haluan kiittää työni ohjaajaa Jakelu- ja teollisuusverkot-yksikön suunnittelupäällikköä Juho Jaakkolaa mielenkiintoisen aiheen antamisesta ja asiantuntevista neuvoista kysymysten herätessä työtä tehdessä. Lisäksi haluan kiittää koestajaamme Aleksii Ukkolaa, joka myös antoi asiantuntevia neuvoja, ja oli suuressa roolissa tehdessämme käytännönkoestuksia projektikohteessa. Kiitokset myös Janne Karppaselle ja Jukka Lassilalle, jotka toimivat työni tarkastajina. Teidän kommenttien kautta sain rakennettua ehjän kokonaisuuden. Myös teidän kärsivällisyytenne aikataulumuutosten ilmetessä rohkaisi jatkamaan työtä eteenpäin. Lopuksi haluan kiittää työkavereitani ja läheisiäni. Teidän kannustuksenne ja tukenne toivat jaksamista työn kirjoittamiseen.

Oulu, 20.2.2022

Vesa Aitto-oja

## LYHENNELUETTELO

APDU	SV-kommunikaatioprotokollan kehysrakenteen osa, joka sisältää yksityiskohtaisia tietoja SV-viesteistä (Application Protocol Data Unit)
APPID	IED-laitteen yksilöintitunnus (Application Identifier)
ASDU	SV-kommunikaatioprotokollan kehysrakenteen osa, joka sisältää yksittäiselle solmulle merkityksellistä tietoa (Application Service Data Unit)
AVTS	Meggerin koestuksien automatisointiin oleva lisäohjelma (Advanced Visual Test Software)
CFI	Kommunikaatioprotokollan kehysrakenteen osa, jolla erotellaan näytteistetyt arvot matalamman prioriteetin väyläkuormasta (Canonical Format Indicator)
CID	Konfigurointityökalun tiedosto, joka sisältää IED-laitteen tiedot yksilöllisesti (Configured IED Description)
FCS	SV-kommunikaatioprotokollan kehysrakenteen osa, jonka avulla voidaan havaita mahdolliset virheet SV-viestin rakenteessa (Frame Check Sequence)
GOOSE	IEC 61850 -standardin määrittelemä kommunikaatioprotokolla (Generic Object Oriented Substation Events)
ICD	Konfigurointityökalun tiedosto, joka sisältää tietoja loogisista laitteista, loogisista solmuista sekä tunnistetiedot GOOSEsta ja SV:stä (IED Capabilities Description)
IED	Laite, joka kykenee vastaanottamaan ja lähettämään tietoa, esimerkiksi digitaalinen suojarole (Intelligent Electronic Device)
IID	Tiedosto, jonka avulla välitetään yhden IED-laitteen tietoa IED-laitteen konfiguraatiotyökalun ja järjestelmän konfiguraatiotyökalun välillä. (Instantied IED Description)
JaTe	Destia Oy:n Jakelu- ja teollisuusverkkoyksikkö

KJ	Jännitetaso, joka Suomessa on yleensä 20 kV. Joissakin paikoissa 10 kV. (Keskijännite)
MAC	IEC 61850 -standardin kommunikaatioprotokollien yksilöivä osoitejärjestelmä (Medium Acces Control)
MMS	IEC 61850 -standardin määrittelemä asematason kommunikaatioprotokolla (Manufacturing Message Specification)
MU	Laite, joka muuttaa analogiset tiedot digitaalisiksi (Merging Unit)
PCP	Kommunikaatioprotokollan kehysrakenteen osa, jolla erotellaan näytteistetyt arvot matalamman prioriteetin väyläkuormasta (Priority Code Point)
PTP	Aikasynkronointimenetelmä (Precision Time Control)
RTMS	Meggerin koestuslaitteiden koestusohjelma (Relay Test Management Software)
SCD	Tiedosto, joka sisältää täydelliset tiedot sähköasemasta (Substation Configuration Description)
SCL	IEC 61850 -standardin määrittelemä sähköaseman konfiguraation kuvauskieli (Substation Configuration Description Language)
SED	Konfigurointityökalun tiedosto, jonka avulla voidaan välittää tietoja eri projektien välillä (System Exchange Description)
SNTP	Aikasynkronointimenetelmä (Simple Network Time Protocol)
SPS	IEC 61850 -standardin mukainen tietoluokka (Single Point Status)
SSD	Konfigurointityökalun tiedosto, joka sisältää tietoja loogisista solmuista ja kertoo sähköaseman rakenteen (System Specification Description)
SV	IEC 61850 -standardin määrittelemä kommunikaatioprotokolla (Sampled Values)

SVPDU	SV-kommunikaatioprotokollan kehysrakenteen osa, joka sisältää mittaustiedot (SV Protocol Data Unit)
TCI	Kommunikaatioprotokollan kehysrakenteen osa, joka sisältää PCP-, CFI- ja VID-kentät (Tag Control Information)
TPID	Yksilöi kommunikaatioprotokollatyypin viestin kehysrakenteessa (Tag Protocol Identifier)
VID	Kommunikaatioprotokollan kehysrakenteen osa, jolla erotellaan näytteistetyt arvot matalamman prioriteetin väyläkuormasta (VLAN Identifier)
VLAN	Virtuaalilähiverkko (Virtual Local Area Network)
XML	Sähköaseman konfiguraation kuvauskieli, johon SCL-kieli pohjautuu (Extensible Markup Language)

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Lyhenneluettelo

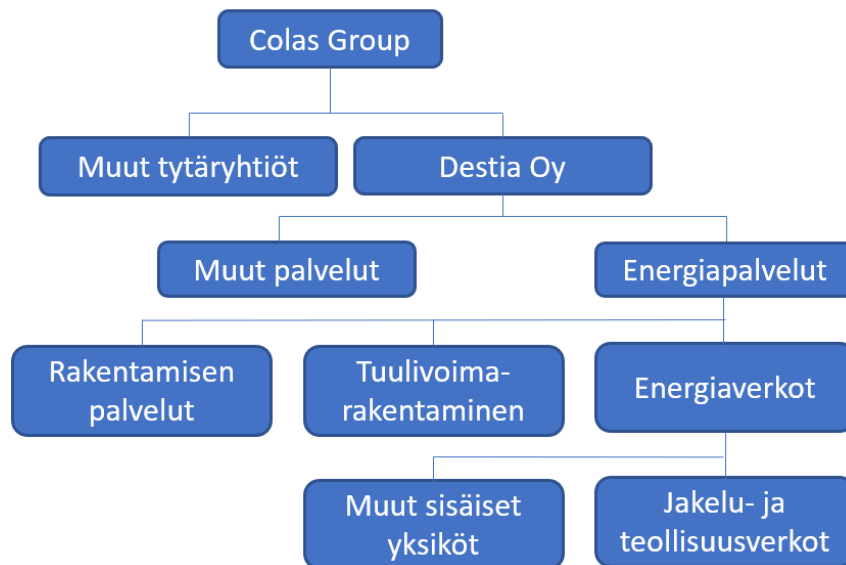
1	Johdanto.....	10
1.1	Taustaa .....	10
1.2	Työn tavoitteet .....	12
1.3	Työn rajaus ja rakenne .....	13
1.4	Tutkielman aineisto ja tutkimusmenetelmät .....	14
2	Sähköasemien koestus .....	16
2.1	Sähköturvallisuuslain vaikutukset koestuksiin .....	16
2.2	Koestusten nykytilanne ja koestustavat .....	18
2.2.1	Käyttöönottokoestukset nykytilanteessa.....	21
2.2.2	Määräaikaiskoestukset eli kausikoestukset nykytilanteessa .....	22
2.3	Koestusten tulevaisuus .....	23
2.4	Markkinoilla olevat toisiokoestuslaitteet .....	25
2.5	Koestuslaitevalmistajien koestusohjelmat .....	30
2.5.1	OMICRON Test Universe .....	30
2.5.2	Doble Protection Suite .....	31
2.5.3	Manta Onboard Software.....	32
2.5.4	Megger Relay Test Management- ja Advanced Visual Test Software.....	33
2.5.5	Yhteenvedo koestuslaitteista ja -ohjelmista.....	34
2.6	JaTe-yksikön koestuslaitteet ja käytettävyys tulevaisuudessa .....	35
3	IEC 61850 -standardi sähköasemalla .....	40
3.1	IEC 61850 -standardi .....	40
3.2	IEC 61850 -standardin mukainen tietomalli .....	42
3.3	IEC 61850 -standardin mukainen viestiliikenne .....	44
3.3.1	GOOSE-kommunikaatioprotokolla .....	46

3.3.2	SV-kommunikaatioprotokolla .....	53
3.4	Aikasykronoinnin merkitys sähköasemilla .....	56
3.5	GOOSE- ja SV-viestit käyttöönotto-koetuksessa .....	57
3.6	GOOSE- ja SV-viestit kausikoetuksessa .....	60
4	Suojareleiden konfigurointi .....	64
4.1	IEC 61850 -standardin mukainen konfigurointiprosessi.....	64
4.2	Käyttöönotto- ja kausikoetuksen vaikutukset suojareleiden konfigurointiin .....	66
5	Projektikohteen käytännönkoetukset .....	71
5.1	Projektikohde .....	71
5.2	Koestuksien toteutusjärjestys projektikohteessa .....	73
5.3	GOOSE Configuration -ohjelman testaus ja toiminta-aikojen vertailu .....	76
5.4	SV Configuration -ohjelman testaus .....	79
6	Johtopäätökset .....	81
7	Yhteenveto.....	87
	Lähdeluettelo .....	

# 1 Johdanto

## 1.1 Taustaa

Diplomityö toteutetaan Ranskalaisen Colas Groupin tytäryhtiön Destia Oy:n Energiaverkot-liiketoimintaryhmän Jakelu- ja teollisuusverkot-yksikölle (JaTe). Destia Oy on Suomen suurin infra-alan yhtiö, jonka toiminta koostuu laaja-alaisesti maanalaisesta rakentamisesta aina maanpäälliseen rakentamiseen saakka. Destia Oy:n organisaatio koostuu eri palveluista, jotka taas koostuvat eri liiketoimintaryhmistä. Liiketoimintaryhmät sisältävät eri yksiköjä. Lisäksi yksiköjen sisällä voi olla vielä sisäisiä yksiköjä. Kuvassa 1.1 Destian organisaatiokaavio, josta jätetty Colasin muut tytäryhtiöt, Destia Oy:n muut palvelut ja Energiaverkot-liiketoimintaryhmän muut sisäiset yksiköt havainnollistamatta.

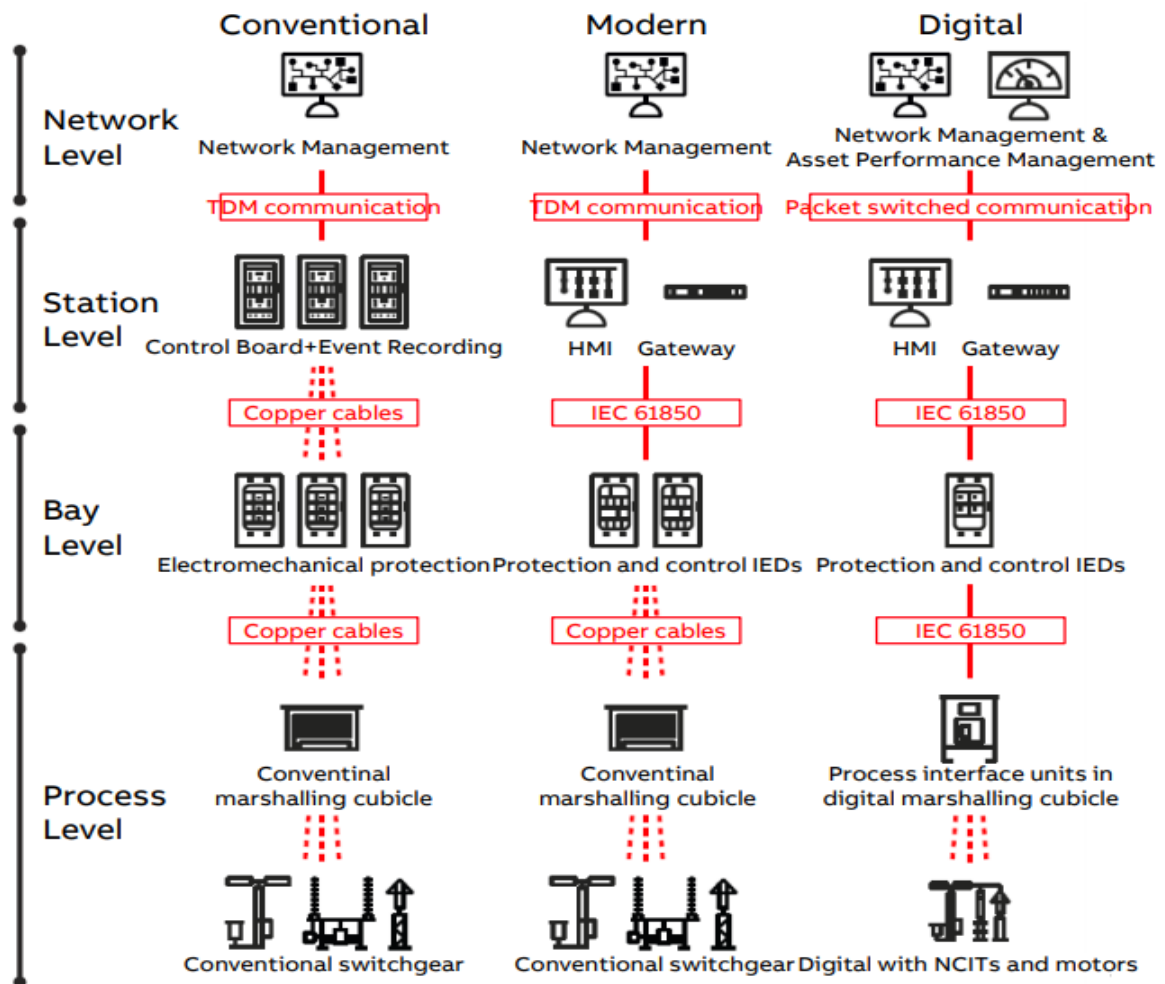


Kuva 1.1 Destian organisaatiokaavio.

Kuvassa 1.1 JaTe:n sijainti Destian organisaatiokaaviossa. Tämän diplomityön päätavoitteena on vastata JaTe:n kasvavaan tarpeeseen ymmärtää yhä syvemmin sähköasemien relekoestuksissa vastaan tulevat digitaaliset suojausratkaisut, jotta koestukset voidaan suorittaa turvallisesti ja oikeaoppisesti. Asiaa on tärkeä tutkia myös siksi, koska digitalisaatio tulee

lisääntymään sähköasemilla jatkuvasti, jolloin perinteiset koestusmenetelmät eivät ole enää mahdollisia.

Sähköasema määritelmänä on sähkön jakelu- tai siirtoverkossa kohta, jossa voidaan esimerkiksi muuntaa jännitettä tai suorittaa kytkentöjä. Sähköasema sisältää muuntajia, kiskostoja ja erilaisia laitteita sekä kojeita. Sähköasemalla tärkeimpiä laitteita ovat muuntajat, katkaisijat, erottimet ja mittamuuntajat. (Elovaara & Haarla, 2011) Nykyiset sähköasemat voidaan jaotella kolmeen eri luokkaan kuvan 1.2 mukaisesti.



Kuva 1.2. Vasemmalla perinteinen sähköasema, keskellä osittain digitaalinen sähköasema ja oikealla digitaalinen sähköasema. (ABB, 2020)

Ensimmäisenä ja yleisimpänä ovat perinteiset sähköasemat, joissa suojausjärjestelmän tiedonsiirto tapahtuu kuparikaapeleilla. Toisena ovat osittain digitaaliset sähköasemat, joissa

käytetään osittain IEC 61850 -standardipohjaista väyläkommunikointia, mutta pääasiassa suojausjärjestelmän kommunikointi tapahtuu kuparikaapeloinnilla. Kolmantena ovat digitaaliset sähköasemat, joissa kommunikointi tapahtuu prosessitasolta asematasolle Ethernet-kaapeloinnilla IEC 61850 -standardin mukaisesti. Digitaalisissa sähköasemissa kuparikaapelointi rajoittuu lähinnä vaihto- ja tasasähkökeskuksiin, mittausarvon siirtoon analogisesti MU-laitteelle (Merging Unit) ja katkaisijan apukoskettimille sekä laukaisukeloille. Työn kannalta perehdytään IEC 61850 -standardipohjaiseen osittain digitalisoituun sähköasemaan sekä täysin digitaaliseen sähköasemaan. Perinteisiä sähköasemia sivutaan kertomalla mitä eri koestusmenetelmiä on käytössä.

Sähköasemien digitaalisiin suojausratkaisuihin kuuluu tällä hetkellä ja yhä suuremmissa määrin IED-laitteet (Intelligent Electronic Device), joita ovat esimerkiksi suojareleet. Tällaiset suojareleet kykenevät vastaanottamaan toisesta lähteestä ohjaukaskäskyjä sekä tietoa ja lisäksi lähettämään tietoa ulkopuolisille lähteille, jolloin sähköasemalta saadaan monipuolisempaa tietoa tapahtumista. IED-laitteissa yleisimpänä ja tyypillisimpänä kommunikaatiostandardina käytetään tiedonsiirrossa IEC 61850 -standardin mukaisia sovittuja tietomalleja ja kommunikaatioprotokollia. (McDonald, 2003) Tosin teollisuusympäristössä yleisimpänä kommunikaatioprotokollana käytetään Modbus-protokollaa. Tässä työssä keskitytään IEC 61850 -standardissa käytettäviin GOOSE- (Generic Object Oriented Substation Events) ja SV-kommunikaatioprotokolliin (Sampled Values) asemaväylätasolla sekä näiden protokollien koestamiseen.

## 1.2 Työn tavoitteet

Työ rakentuu neljästä aihekokonaisuudesta. Työn ensimmäisessä aihekokonaisuudessa tavoitteena on kartoittaa sähköasemien koestustavat nykypäivänä ja tulevaisuudessa. Koestustapojen tarkastelussa keskitytään relekoestukseen. Lisäksi tarkastellaan, miten digitalisoituminen tulee vaikuttamaan koestusjärjestelyihin. Relekoestukseen liittyen selvitetään, millaisilla koestuslaitteilla saadaan koestukset kattavasti suoritettua.

Toisen aihekokonaisuuden tavoitteena on kertoa IEC 61850 -kommunikaatiostandardista ja tämän jälkeen tutkia syvemmin standardin mukainen tietomalli sekä standardin GOOSE- ja SV-kommunikaatioprotokollat. Painopisteenä on asemaväylätaso. Tämän tavoitteen

tarkoituksena on saada selkeä kuva kyseisistä kommunikaatioprotokollista ja näiden koestamisesta, jolloin voitaisiin luoda JaTelle sisäinen ohjeistus niiden käytöstä, käyttäytymisestä ja koestamisesta.

Kolmannen aihekokonaisuuden tavoitteena on tutkia IEC 61850 -standardin mukaista suo- jareleiden konfigurointiprosessia ja kartoittaa sen vaikutuksia kausikoestukseen sekä GOOSE- ja SV-kommunikointiprotokolliin. Neljännessä aihekokonaisuudessa tavoitteena on hyödyntää edellä käsiteltyjä aihekokonaisuuksia meneillään olevassa projektissa eli siirtää tutkittu tieto käytännön tasolle. Mahdollisiin ongelmatilanteisiin etsitään ratkaisumalleja, joilla voidaan helpottaa esimerkiksi koestajien työtä kausikoestusvaiheessa.

### 1.3 Työn rajaus ja rakenne

Työ rajataan tutkimuskysymyksien asetteluilla:

- Mitä koestustapoja ja -menetelmiä on käytössä nykyisillä ja tulevaisuuden sähköasemilla?
- Mitä koestuslaitteita on markkinoilla?
- Mitä koestuslaitteita JaTe omistaa, ja mikä on niiden käytettävyys tulevaisuudessa?
- Mikä on IEC 61850 -standardi ja kuinka se liittyy sähköasemiin sekä JaTeen?
- Mikä on GOOSE- ja SV-viestien rooli sähköasemalla?
- Miten GOOSE- ja SV-viestit voidaan koestaa sähköaseman käyttöönotto- ja kausikoestuksessa?
- Millainen on IEC 61850 -standardin mukainen konfigurointiprosessi suo- jareleille?
- Kuinka kausikoestuksen haasteisiin voidaan vastata konfiguroinnin avulla?

Diplomityön luvussa kaksi kerrotaan sähköasemien koestustavat tällä hetkellä ja pohditaan koestustapojen muutoksia tulevaisuudessa digitalisoitumisen lisääntyessä. Luvussa kaksi tarkastellaan myös markkinoilla olevia koestuslaitteita ja näiden sovelluksia. Lisäksi tehdään myös selvitys JaTen koestuslaitteista ja sovelluksista sekä tarkastellaan näiden käytettä- vyyttä tulevaisuuden näkökulmasta.

Luvussa kolme esitellään IEC 61850 -standardin perusajatus ja sen vaikutukset koestuksen nykytilanteeseen ja tulevaisuuteen. Luvussa kolme tarkastellaan myös, kuinka IEC 61850 -

standardi vaikuttaa JaTen käyttöön- ja kausikoestuksiin. Näiden lisäksi luvussa kolme perehdytään syvemmin IEC 61580 -standardin GOOSE- ja SV-kommunikaatioprotokolliin.

Neljännessä luvussa kerrotaan IED-pohjaisten suojareleiden konfigurointia sekä konfigurointiprosessia IEC61850 -standardin mukaisesti. Neljännessä luvussa tarkastellaan myös, kuinka konfigurointiprosessi eroaa digitaalisen ja analogisen horisontaalisen viestinnässä. Lisäksi neljännessä luvussa tutkitaan kausikoestuksen vaikutuksia konfigurointiin ja esitetään ratkaisuehdotuksia muun muassa ABB:n toimittaman KJ-kojeiston (Keskijännite) syöttökentän katkaisijan vikasuojalaukaisukäskyn sekä ylivirtalukitussignaalin koestamiseen kausikoestuksessa.

Viidennessä luvussa esitetään muuntamoprojekti, jossa hyödynnetään aikaisempien lukujen aiheita. Projektissa perehdytään suojareleiden koestukseen ja näistä GOOSE-viestien havaitsemiseen asemaväylätasolla. Toisena perehtymisen aiheena on digitaalisten virta- ja jännitearvojen syöttö SV-kommunikaatioprotokollalla. Kommunikaatioprotokollien tulkitsemiseen ja koestukseen luodaan JaTelle sisäiset ohjeistukset koskien OMICRONin Test Universe -ohjelmassa olevien GOOSE – ja SV Configuration -ohjelmien käyttöä. JaTen sisäisiä ohjeistuksia pystytään hyödyntämään sitten jatkossa myös muissa koestuksissa ja käyttötilanteissa, kun kyseessä on GOOSE- ja SV-kommunikaatioprotokollat. Lisäksi työn aikana ilmeneviin ongelmatilanteisiin etsitään ratkaisumallit.

Kuudennessa luvussa tehdään johtopäätökset ja lopuksi pohditaan mahdollisia jatkotutkimusten aiheita, joita työn edetessä herää. Seitsemännessä luvussa tehdään yhteenveto.

#### 1.4 Tutkielman aineisto ja tutkimusmenetelmät

Luvuissa kaksi, kolme ja neljä tutkimusmenetelmänä käytetään pääosin kirjallisuustutkimusta. Kirjallisuustutkimus koostuu valmiista aineistoista ja tutkimuskysymyksistä. Kirjallisuustutkimusta on järkevä käyttää, koska sen avulla saadaan tutkittua ja analysoitua monipuolisesti kyseisiä lukuja. Kirjallisuustutkimuksen lisäksi tutkimusmenetelmänä käytetään asiantuntijahaastattelua, jotta saadaan mahdollisimman selkeä kuva yrityksen sisäisistä menetelmistä ja laitteistoista koestuksen osalta. Asiantuntijahaastatteluilla saadaan myös

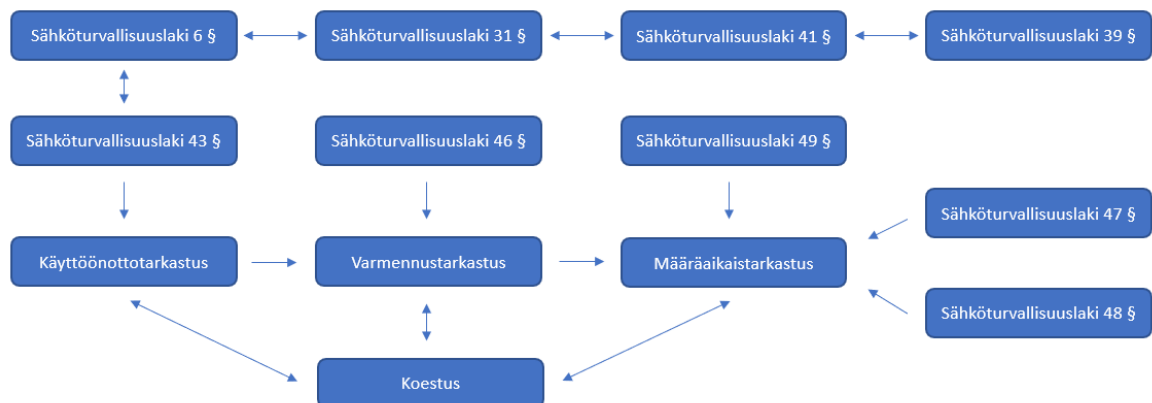
käytäntöön liittyviä kysymysasetteluja, jolloin työn sisältö saadaan vastaamaan paremmin yrityksen tarpeita. Luvussa viisi asetetaan aiemmissa luvuissa esiteltävät koetus- ja konfiguraatoratkaisut käytännön tasolle suurehkolla muuntamalla, joka toimii tämän diplomityön projektikohteena. Tutkimusaineistoina toimii pääosin tieteelliset julkaisut, yritysten tuottamat aineistot ja asiantuntijahaastattelut.

## 2 Sähköasemien koestus

Tässä luvussa kerrotaan sähköturvallisuuslain näkökulma sähköasemien koestamiseen. Toisena aiheena on sähköasemien koestamisen tilanne nykypäivänä ja tulevaisuudessa. Kolmantena aiheena tarkastellaan markkinoilla olevia toisiokoestuslaitteita ja verrataan niitä JaTen toisiokoestuslaitteeseen. Lopuksi esitellään JaTen koestuslaitteet ja pohditaan niiden käytettävyyttä tulevaisuudessa.

### 2.1 Sähköturvallisuuslain vaikutukset koestuksiin

Sähköasemilla koestuksien avulla kyetään ennaltaehkäisemään mahdollisia vikoja, jolloin yhteiskunnalle saadaan tuotettua sekä jaettua mahdollisimman luotettavasti sähköenergiaa. Yhteiskunta pitää sähköturvallisuuslain avulla huolen, että tämä luotettavuus säilyy. Kaaviokuvasta 2.1 voidaan nähdä, kuinka sähköturvallisuuslaki 16.12.2016/1135 velvoittaa suorittamaan koestukset sähköasemilla niiden rakennus- ja käyttövaiheessa.



Kuva 2.1. Sähköturvallisuuslain pykälät, jotka määrittelevät koestukset sähköasemilla.

Sähköturvallisuuslain 6. § vaatii sähkölaitteiden ja -laitteistojen suunnittelun, rakentamisen, valmistuksen ja korjauksen sellaiseksi, että niistä ei aiheudu henkeä, terveyttä tai omaisuutta uhkaavaa vaaraa. Samat asiat pätevät myös näiden huollettavuudelle ja käytölle. 31. §:ssä on vielä lisätty olennaisia turvallisuusvaatimuksia, jotka määrittelevät muun muassa, että

laitteistojen täytyy olla keskenään yhteensopivia. Sähköturvallisuuslain 41. § tekee vielä yhteenvedon sähkölaitteistojen suunnittelusta ja rakentamisesta, jossa määritellään, että sähkölaitteisto on oltava suunniteltu ja rakennettu 31. §:n turvallisuusvaatimusten ja 39. §:n sähkömagneettista yhteensopivuutta koskevien olennaisten vaatimusten mukaisesti. Sähköturvallisuuslain 43. §:ssä määritellään, että sähkölaitteiston saa ottaa vasta sitten käyttöön, kun käyttöönottotarkastuksessa on riittävän suuressa laajuudessa tehty selvitykset, ettei sähkölaitteisto aiheuta 6. §:ssä määritettyjä vaaroja tai häiriöitä. Käyttöönottotarkastuksen jälkeen sähköturvallisuuslain 46. §:ssä vaaditaan varmennustarkastuksen tekemistä, jolla voidaan varmistua siitä, että sähkölaitteistolle on tehty riittävä sekä asianmukainen käyttöönottotarkastus. 47. § määrittelee sähkölaitteiston haltijan vastuut turvallisuudesta ja sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta. Tämä tarkoittaa sähkölaitteiston kunnan ja turvallisuuden tarkailua sekä riittävän nopeaa havaittujen vikojen ja puutteiden poistamista. 48. §:ssä määritellään, että sähkölaitteiston haltijan on ylläpidettävä sähköturvallisuutta tekemällä kunnossapito-ohjelma, jota noudatetaan. 49. §:ssä vaaditaan määräaikaistarkastusten tekoa sähkölaitteistolle, jolla myös varmistutaan sähkölaitteiston turvallisesta käyttämisestä ja kunnossapidosta. Lisäksi sähköturvallisuuslaki vaatii, että kaikista sähkölaitteistolle tehdyistä tarkastuksista on laadittava tarkastuspöytäkirjat sähkölaitteiston haltijalle. (Finlex, 2018) Kaikki nämä edellä mainitut sähköturvallisuuslain kohdat osoittavat siis koestamisen tarpeellisuuden eri sähkölaitteistoille.

Sähköturvallisuuslakiin peilaten sähkönjakeluverkot täytyy siis suunnitella ja rakentaa siten, että voidaan varmistaa vikatilanteiden sattuessa sähköjen hallittu katkaisu. Hallitun katkaisun saavuttamiseksi täytyy rakentaa jakeluverkolle suojausjärjestelmä, joka koostuu standardin SFS-IEC 60050-448 mukaan suojauslaitteista, mittamuuntajista, johdotuksista ja laukaisupiirin tehonlähteistä, mutta ei katkaisijoista. Katkaisijat ovat kuitenkin merkittävä osa suojausjärjestelmää, koska suojausohjain ohjaa vikaa lähimpänä olevan katkaisijan auki, jolloin saadaan vika rajattua pienemmälle alueelle. Koestuksen kannalta katkaisijatkin täytyy siis ottaa huomioon. Lisäksi suojausjärjestelmään voi kuulua tiedonsiirtojärjestelmä ja jälleenykyntäautomatiikka. Standardissa SFS-IEC 60050-448 suojauksella tarkoitetaan vikojen tai muiden epänormaalien olosuhteiden havaitsemista voimajärjestelmässä, jotta ne voidaan selvittää ja näin ollen myös poistaa. Suojauksen toimimattomuus altistaa sähköverkon sähköturvallisuuslain määrittelemille vaaroille, terveille sähköverkon osille aiheutuville jännitekuopille sekä jakeluverkon termiselle ja mekaaniselle rasitukselle. Voimajärjestelmän

kannalta on siis tärkeää, että suojaus toimii nopeasti, luotettavasti ja selektiivisesti. Suojauksen toimivuus varmistetaan ensimmäisen kerran käyttöönotto-koestuksella ja tämän jälkeen suoritettavilla määräaikaiskoestuksilla eli niin sanotuilla kausikoestuksilla. Koestukset suorittavat siihen koulutettu ammattihenkilöstö, jolla on riittävä ammattitaito ja ymmärrys siihen, kuinka eri laitteistokokonaisuudet käyttäytyvät. (Elovaara & Haarla, 2011), (Mörsky, 1992), (SUOMEN STANDARDISOIMISLIITTO SFS, 2002)

## 2.2 Koestusten nykytilanne ja koestustavat

Sähköasemilla on monia eri suojareleityyppejä käytössä. Vanhimmat suojareleet ovat sähkömekaanisia eli niiden rakenteesta löytyy liikkuvia osia. Sähkömekaanisten releiden toimintaperiaate perustuu virran kasvun aiheuttamaan magneettikentän kasvuun, joka liikuttaa releen mekaanisia osia. (Haarla, 2021) Sähkömekaaniset releet ovat siitä huonoja, että ne ovat hitaita ja epätarkkoja.

Staattiset releet sisältävät yksittäisiä elektronisia komponentteja ja mikropiirejä sisältäviä kytkentöjä. Mekaanisiin releisiin verrattuna staattiset releet toimivat paljon nopeammin ja tarkemmin. Staattisten releiden heikkoutena ovat ylijännitteelle sekä sähkömagneettisille häiriöille oleva herkkyys sekä aputehon jatkuva tarve. (Mörsky, 1992) Näillä releillä voidaan toteuttaa myös monipuolisempia suojauskokonaisuuksia.

Staattisten releiden jälkeen kehittyi puolijohdereleet, joiden asennukset olivat 1970–1980-luvulla. Näillä releillä pystyi jo toteuttamaan monimutkaisempia toimintoja mikroprosessori-kehityksen myötä. Puolijohdereleet koostuivat eräänlaisiin telineisiin asennetuista virtapiirikorteista toisin kuin mekaaniset ja staattiset releet, jotka olivat kiinteästi asennettu kytkentätauluun. Koestuksen ja testauksen kannalta puolijohdereleet olivat jo edistysaskel, koska ne voitiin irrottaa kotelosta helposti. (Gill, 2009) Ajanjaksoa voidaan pitää kuitenkin lyhyenä puolijohdereleillä, koska digitaaliset IED-releet tulivat markkinoille 1980-luvulla.

Nykyaikaisimmat releet ovat mikroprosessorilla varustettuja niin sanottuja IED-releitä. Suojaustoimintojen lisäksi IED-releissä on mahdollista toteuttaa eri mittaus- ja ohjaustoimintoja (Mörsky, 1992). IED-releet kykenevät kommunikoimaan ylemmän tason

automaationjärjestelmään eli vertikaalisesti ja muiden IED-laitteiden kanssa samalla kommunikaatiotasolla, jolloin puhutaan horisontaalisesta kommunikaatiosta. (de Mesmaeker, 2005) IED-releisiin voidaan siirtää mittamuuntajalta tietyn kommunikaatioprotokollan avulla mittaustietoja, joiden perusteella rele suorittaa toiminnon, kuten esimerkiksi ylijännitesuojan toimimisen.

Vaikka suojareleitä on monenlaisia, niiden perimmäinen tarkoitus ja toiminta ei ole muuttunut vuosien saatossa. Näin ollen koestuksetkin ovat jo perinteisille kuparikaapeloiduille sähkömekaanisille -, staattisille - ja numeerisille releille vakiintuneet vuosikymmeniä sitten. Lisäksi tähän voidaan myös lisätä IED-suojareleiden koestukset silloin, kun suojausjärjestelmän kommunikointi ja toiminnat ovat toteutettu kuparikaapeloinnilla.

Suojareleiden osalta koestukset voidaan jakaa ajallisesti kahteen osaan:

- Releiden koestus ennen käyttöönottoa, jolla varmistetaan siitä, että suojauksen toimivat suunnitellulla tavalla.
- Käytössä olevien releiden toimintavalmiuden koestus. Kauppa- ja teollisuusministeriön päätöksellä verkonhaltijansähköverkolle ja luokan 3 sähkölaitteistolle tarkastukset on tehtävä viiden vuoden välein.

Ennen suojareleiden käyttöönottoa tehtävillä koestuksilla ei ole vaikutusta sähkön laatuun. Määräaikaiskoestukset eli kausikoestukset, joissa tehdään releiden toimintavalmiuden koestuksia voivat aiheuttaa sähkön toimituksen keskeytyksiä, mutta tämä on ehkäistävissä suunnitellulla, jossa tarvittava teho syötetään muilta sähköasemilta. (Monni, 2015), (Mörsky, 1992) Eli, jos meinataan suorittaa kausikoestus ilman sähkötoimituksen keskeytystä, niin tämä täytyy ennakoida jo sähköaseman suunnittelu- ja rakennusvaiheessa.

Koestustapoja sähkömekaanisten ja staattisten releiden suojauskokonaisuuksiin on monia. Kaikissa koestustavoissa on omat riskinsä, joten toteutustapa pohjautuu siihen, millaisissa olosuhteissa koestetaan. Suojareleet koestetaan asettelualueen alimmilla ja ylimmillä arvoilla. (Mörsky, 1992) Koestusarvot tulevat verkkoyhtiöltä tai laitteiston haltijalta, joka vastaa asetteluista sähköturvallisuuden näkökulmasta. Koestamalla varmistetaan, että suoja toimii annetuilla asetteluarvoilla ja se toimii releen valmistajan tarkoittamalla tavalla. (Jaakkola, 2022)

Suojauksen koestustapoja ovat muun muassa ensiökoestus, toisiokoestus, valehäiriökoestus ja pelkän suojareleen koestus. Suojauksen ensiökoestuksessa koestusvirta ja -jännite syötetään mittamuuntajien ensiön kautta. Ensiökoestuksessa toiminta tarkastetaan siihen asti, että katkaisija toimii. Suojauksen toisiokoestuksessa koestusvirta ja -jännite syötetään mittamuuntajien auki olevaan toisiopuoleen ja tarkkaillaan releen toimintaa eri koestusarvoilla. Toisiokoestuksessa laukaisupiirin kunto voidaan tehdä mittaamalla tai laukaisemalla katkaisija. Suojauksen valehäiriökoestuksessa luodaan tarkoituksellinen vika ensiöpuolelle, kuten oikosulku jännitteiseen johtoon. Tässä koestuksessa vikavirta mitataan virtamuuntajan ja -mittarin avulla. (Mörsky, 1992) Valehäiriökoestus on mahdollista tehdä myös toisiopuolelle. Tyypillisesti katkeilevan maasulkusuojan toiminta testataan syöttämällä koestuslaitteella vika toisiopuolelle ja toteamalla releen toiminta. (Jaakkola, 2022) Lisäksi on pelkkä suojareleen koestus, jossa rele irrotetaan omakseen suojauskokonaisuudesta ja kytketään koestuslaitteistoon. Näin saadaan tarvittavat kosketusvirrat ja -jännitteet. (Mörsky, 1992)

Ensiökoestuksella saadaan suoritettua kattavin koestus, koska sillä saadaan selville kaikkien toisiinsa liittyvien suojauslaitteiden toimivuus. Koestuslaitteella syötettävällä ensiövirralla nähdään muun muassa releiden toiminta, toisiopiriin eheys, katkaisijan toiminta, jälleenkytkentöjen toiminta, hälytysten toiminta, muuntosuhteen oikeellisuus ja löysät liitokset. Käytännössä monesti suoritetaan kuitenkin toisiokoestus, koska se on helpompi ja turvallisempi toteuttaa. Ensiökoestus vaatii myös jännitekatkoksen. Lisäksi toisiokoestuksessa ei tarvita niin suuria jännitteitä ja virtoja, joten koestuslaitteiden ei tarvitse olla niin suuria ja kalliita. Toisiopiireihin päästään myös helpommin käsiksi relekaappien avattavien riviliittimien kautta. Koestusten jälkeen täytyy huolehtia siitä, että kytkennät puretaan huolellisesti ja oikeassa järjestyksessä. Ennen jännitteiden kytkemistä täytyy muistaa purkaa maadoitukset ja varmistaa, että releillä on oikeat toiminta-arvot. (Mörsky, 1992)

IED-releissä koestus voidaan jakaa kolmeen eri kategoriaan:

- Steady-state koestus
- Dynamic koestus
- End-to-end koestus

Steady-state koestus on yleisin menetelmä IED-releen koestuksessa. Testissä muutellaan virta-, jännite- tai taajuusarvoja, jonka jälkeen katsotaan missä vaiheessa rele reagoi, kun

arvot nousevat tai laskevat aseteltujen arvojen ulkopuolelle. Tällä voidaan helposti todeta, että asiakkaan vaatimat asetteluarvot ovat releissä oikein. (Gill, 2009)

Dynamic koestuksessa pyritään kuvaamaan todellisia sähköjärjestelmän tilanteita. Relettä kuormitetaan nimellisjännitteellä ja -virralla ennen vian syntymistä. Vikatila voidaan simuloida esimerkiksi pitämällä rele normaalissa kuormitustilassa ja sitten asettaa vika-arvot. Kyseinen koestus voidaan luoda valmiilla ohjelmalla, jolloin nähdään muun muassa releen toiminta-ajat. (Gill, 2009), (Werstiuk, 2010)

End-to-end koestus on lähes samanlainen, kuin Dynamic koestus. Erona näissä koestuksissa on kuitenkin se, että end-to-end koestuksessa rele on kytkettynä kaikkiin laitteisiin, joihin se normaalitilassakin on kytkettynä eli esimerkiksi katkaisijaan, tietoliikennelaitteisiin ja muihin apulaitteisiin. Viat toistetaan kahden sähköaseman välillä kulkevan syöttöjohdon molemmissa päissä samanaikaisesti, jolloin saadaan toiminta-ajat kaikille laitteille, jotka ovat syöttöjohdon välissä. Viat luodaan testisarjoilla, jotka ovat tarkasti yleensä GPS-signaalin avulla asetettu samanaikaisesti toimivaksi. (Gill, 2009), (Werstiuk, 2010)

### 2.2.1 Käyttöönottokoestukset nykytilanteessa

Käyttöönottokoestukset voidaan ajatella jaettavaksi kolmeen eri kokonaisuuteen, jotka ovat piirikoestus, suojarelekoestus ja tietoliikenne- sekä hälytyskoestus. Esimerkiksi JaTe toteuttaa koestuksen tässä järjestyksessä eli ensin piirikoestus, jonka jälkeen koestetaan suojareleet ja lopuksi varmistutaan tietoliikenteen ja hälytysten toimivuudesta. (Ukkola, 2021)

Piirikoestukseen voidaan luokitella muun muassa erottimet, mittamuuntajat, katkaisijat ja akustot. Piirikoestuksella varmistutaan siitä, että esimerkiksi sähköasema on rakennettu suunnitelmien mukaisesti ja sen kojeistot ovat valmistajan ohjeiden mukaisesti rakennettu. Piirikoestuksessa koestetaan muun muassa omakäyttöjärjestelmä ja tasasähköjärjestelmä. Omakäyttöjärjestelmä sisältää sähköasemalla tarvittavan 230/400V:n vaihtosähkön. Omakäyttöjärjestelmään liittyy oleellisesti tasasähköjärjestelmä, sillä omakäyttökeskus syöttää normaalitilanteessa tasasähköjärjestelmää. Tasasähköjärjestelmän merkittävämpänä kuluttajana on suojareleet, jotka tarvitsevat apusähköä omalle teholähteelle. Jokaisella

tasasähkökeskuksella on akusto, joka varmistaa sähkönjakelun, jos esimerkiksi omakäyttökeskuksella on vika. Näin ollen myös akustot tarkistetaan käyttöönottokeistuksessa. Lisäksi suoritetaan kaikkien kaapeleiden eristysvastusmittaukset ja tarkastetaan, että kaikki johdotukset ovat kytketty kuvien mukaisesti. Johdotustarkastuksiin kuuluvat myös maadoitusten ja maadoituskaavioiden tarkistaminen. Piirikoestuksessa mittamuuntajilta tarkastetaan muun muassa oikeat muuntosuhteet, nimellisarvot, napaisuudet sekä toisiopiirit releille ja mitta-reille. Piirikoestuksessa testataan myös laitteiden ohjausten, lukitusten ja merkinantojen toimivuus paikallisesta ohjauspisteestä (kammella tai releohjauksella) sekä kaukokäyttöjärjestelmästä. (Mackey, 2019), (Mörsky, 1992), (Ukkola, 2021)

Suojareleiden käyttöönottokeistuksen aikana suoritetaan eri toimintoja, joilla pyritään jäljittelemään eri käyttö- ja vikatilanteita. Näiden käyttö- ja vikatilanteiden aikana saadaan mitattua ja testattua kaikki suojareleet niiden oikeanlaisen toiminnan varmistamiseksi. Tietoliikenne- ja hälytyskoestuksessa koestetaan kaikki mittaus-, laukaisu-, tiedonsiirtoyhteydet sekä hälytys- ja valvontajärjestelmät. Nämä testataan siten, että niistä tulee myös ilmoitukset kaukokäyttöjärjestelmään, kuten esimerkiksi SCADAan. Käytännössä siis kaikki, mitä sähköasema sisältää niin mitataan, tutkitaan silmämääräisesti ja testataan käyttöönottokeistuksen aikana. (Ukkola, 2021)

### 2.2.2 Määräaikaiskoestukset eli kausikoestukset nykytilanteessa

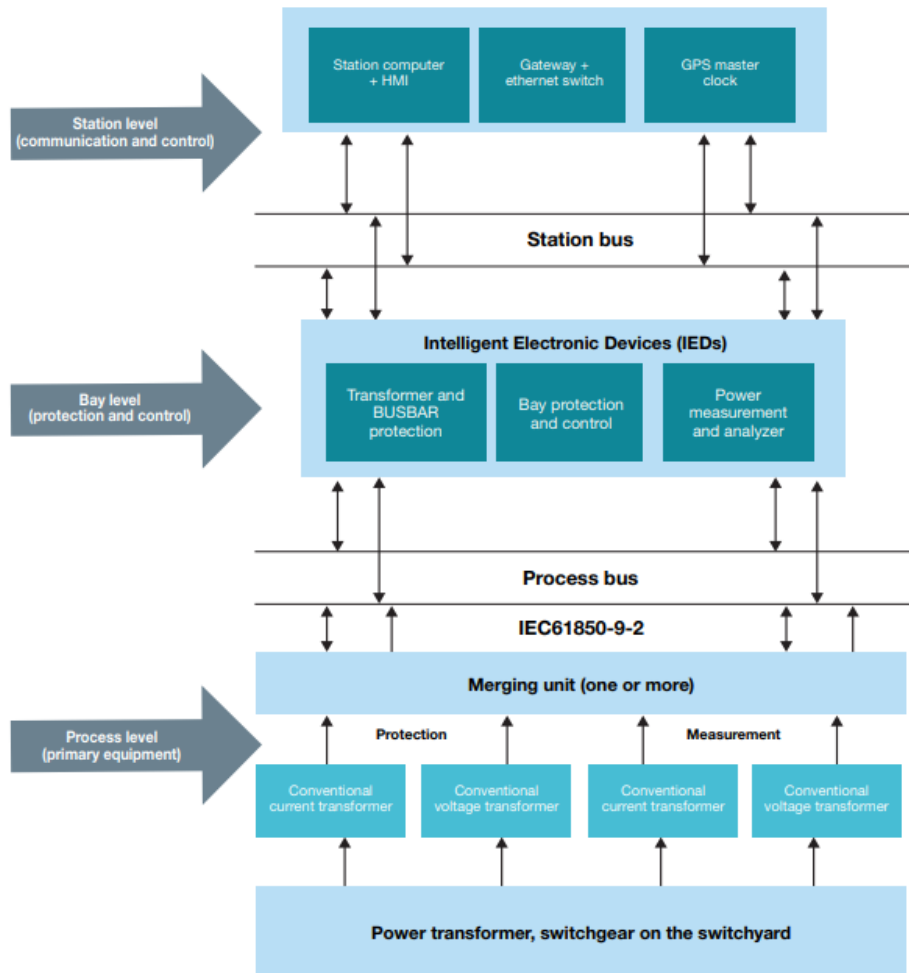
Kuten luvun kaksi alussa todettiin, sähkölaitteistoja on koestettava määräajoin sekä silloin, jos suojaus- tai mittauspiireissä tehdään muutoksia, esimerkiksi suojareleiden konfiguraatioita muutetaan. Sähköasemilla sähkölaitteistojen määräaikaiskoestaminen keskittyy suurimmaksi osaksi suojareleisiin ja niiden toimintavalmiuden varmistamiseen. Suojareleen tarvitsee yleensä toimia vain harvoin pitkän käyttöikänsä aikana. Suojareleiden toiminnan kannalta haittana ovat ympäristön pölyisyys ja likaisuus sekä käytöstä johtuva mekaaninen että sähköinen rasitus. Lisäksi esimerkiksi staattisten releiden elektroniikka on herkkä häiriö- ja ylijännitteelle, jolloin ne voivat aiheuttaa virhetoimintoja ja vikoja staattisten releiden piireille. Varsinkin sähkömekaanisille releille käyttämättömyys, ympäristön pölyisyys sekä likaisuus aiheuttavat liikkuvien osien jumiutumista. Digitaalisissa releissä on itsevalvont ominaisuus, jolla voidaan testata kriittisten osien oikea toiminta. Itsevalvontatestauksen aikana releen havaitessa epänormaalia käyttäytymistä se voi sulkea ulostulokoskettimen,

lähettää viestin tai muun ilmoituksen viasta. Itsevalvontatestauksen virheellisestä toiminnasta rele poistaa laukaisu- ja ohjaustoiminnot, jolloin rele on korvattava käytöstä. Määräaikaiskoestuksessa tulee sisällyttää releille samanlaiset testit, kuin käyttöönottokoestuksessa, jolloin simuloidaan normaaleja käyttöolosuhteita. Sähkömekaanisia ja staattisia releitä on hyvä koestaa tiheämmin, kuin digitaalisia releitä niiden liikkuvien osien ja herkemman elektroniikan vuoksi. Suurin osa suojareleiden valmistajista on manuaalisissa määritellyt tarvittavan koestusvälin. Releille on myös mahdollista laskea luotettavuuslaskennalla koestusten välinen raja, jolla kokonaiskustannukset minimoituvat, mutta yleisesti ottaen koestusvälien pituus määräytyy kokemusperäisesti. (Gill, 2009), (Mörsky, 1992) Esimerkiksi JaTen eräs asiakas vaatii kuuden vuoden koestusvälin releille, joissa on itsevalvontaominaisuus ja muille releille kolmen vuoden koestusvälin (Ukkola, 2021).

### 2.3 Koestusten tulevaisuus

Merkittäväksi tekijäksi koestuksen kannalta tulevaisuudessa tulee olemaan digitaaliset sähköasemat. Nykyisillä sähköasemilla käytetään kuparikaapelointia siirtämään analogisesti mittausravot esimerkiksi suojattavan kohteen virtamuuntajalta. Virtamuuntajan toisiopiiri on kytketty suoraan suojareleen liittimille, jolloin kuparikaapelointiaste on huomattava, kun miettii, kuinka paljon suojattavia kohteita sähköasemalla on. (Sreenivasa, 2019) Digitaalisilla sähköasemilla käytetään IEC 61850 -standardin määrittelemää konseptia, jossa mittamuuntajien analogiset arvot muokataan mittamuuntajien lähellä MU-laitteella digitaalisiksi ja välitetään tieto Ethernet-yhteydellä IED-suojareleille SV-kommunikaatioprotokollaa käyttäen. Tällä tavoin kuparikaapelointi mittamuuntajien ja suojareleiden välillä voidaan korvata Ethernet-kaapeloinnilla, joka vähentää kuparikaapeloinnin määrää merkittävästi. IED-releiden kannalta tämä tarkoittaa käytännössä vain konfigurointia, jossa yksilöidään jokaiselle releelle oma mittamuuntaja, jota valvoa, ohjata ja suojata. Ethernet-kaapeloinnilla saavutetaan myös se hyöty, että uusien releiden kytkemiseen ei tarvita ylimääräistä kaapelointia. Relekaappiin voidaan sijoittaa vararele, jota ei ole määritetty mihinkään kytkinkenttään. IED-releen vikaantuessa voidaan toiseen varalla olevaan käyttövalmiiseen IED-releeseen syöttää vikaantuneen releen konfiguroinnit ja näin saada nopeasti taas vikaantuneen IED-releen kenttä toimintaan. (McTaggart, et al., 2015) Lisäksi IED-releiden välinen kommunikaatio siirtyy asemaväyläpohjaiseksi, jossa käytetään GOOSE-

kommunikointiprotokollaa. Tämä myös vähentää merkittävästi kuparikaapelointia. Kuvassa 2.2 näkyy digitaalisen sähköaseman rakenne.



Kuva 2.2. Digitaalisen sähköaseman rakenne. (Sreenivasa, 2019)

Kuvasta 2.2 voidaan nähdä, että jokainen IED-rele on yhteydessä toisiinsa, jolloin konfiguroinnilla päätetään suojauskohde jokaiselle IED-releelle.

Nykyisillä sähköasemilla sähkömekaanisten ja staattisten suojareiden koestustapa ei tule muuttumaan tulevaisuudessa, koska näille suojareille ovat koestustavat jo vakiintuneet ja hyväksi havaittu (Mörsky, 1992). Lisäksi koestusvälit tulevat pysymään varsinkin sähkömekaanisilla ja staattisilla releillä samoina, koska niiden mekaniikkaa sekä elektroniikkaa ei tulla parantelemaan vaan niistä pyritään pääsemään eroon korvaten nämä IED-releillä

(Ukkola, 2021). IED-releiden osalta kausikoestukset tulevat pikkuhiljaa tarpeettomiksi, kunhan releiden itsevalvontaominaisuudet kehittyvät. Tällöin IED-releille suoritetaan vain korjaavaa kunnossapitoa. Kausikoestusten poistaminen kokonaan vaatisi kuitenkin lainsäädännöllisiä muutoksia, joten tämä ei tule olemaan lähitulevaisuudessa mahdollista.

Digitaalisilla sähköasemilla koestus tulee olemaan erilaista, kuin nykyisillä sähköasemilla suojarleiden osalta. IEC 61850 -standardin luomat kehykset kommunikaatioprotokollille asettavat koestushenkilöstölle tarpeen osata ja ymmärtää teknisen puolen lisäksi myös tietotekniikkapuoli perinpohjaisesti. Kommunikaatioprotokolliin pohjautuvan suojauskeskeisen apuohjelmilla testata etäyhteyden avulla, jolloin koestamista ei tarvitse suorittaa paikalla. Etäyhteys luo kuitenkin tiukat kriteerit sähköaseman tietoturvalle, koska testauslaitteiden ei tarvitse välttämättä olla enää fyysisessä yhteydessä sähköaseman laitteisiin. Tämä luo riskin siihen, että kuka tahansa voi päästä etäyhteyteen käsiksi. Lisäksi on määritettävä eri käyttöoikeustasoja, jolloin vain sellaiset henkilöt, joilla on riittävä tieto ja taito suorittaa testejä pääsevät sen tekemään. Tämä ehkäisee myös sen, että testaustoimintoja ei voida suorittaa vahingossa. (Apostolov, 2018)

Koestuksen aikana on ensiarvoisen tärkeää, että koestustoimenpiteet eivät aiheuta ei-toivottuja tapahtumia, kuten virhelaukaisuja muissa lähdeissä varsinkin silloin, kun sähköasema on jo käytössä. Nykyisillä sähköasemilla tämä voidaan ehkäistä siten, että erotetaan testikohte muista jännitteisistä kohteista. Tämä voidaan suorittaa esimerkiksi fyysisesti testikytkimellä, joka irrottaa testattavan suojalaitteen kokonaan sähköasemasta. Digitaalisella sähköasemalla, joka perustuu IEC 61850 -standardin mukaisiin viestintäprotokollisiin fyysinen eristäminen ei ole niin helppoa, joten riskit virheille kasvaa koestustoimenpiteiden aikana. (Apostolov, 2018) Tämän vuoksi koestukset täytyy suorittaa IEC 61850 -standardi huomioon ottaen. IEC 61850 -standardi käydään tarkemmin lävitse luvussa kolme.

#### 2.4 Markkinoilla olevat toisiokoestuslaitteet

Luvussa 2.2 esitettiin eri koestusmenetelmiä, joita voidaan käyttää sähköasemalla. Suojarelekoestuksen kannalta yleisimpänä koestusmenetelmänä on toisiokoestus varsinkin silloin, kun sähköasema on jo käytössä. Käyttöönotto-koestuksessa voidaan toteuttaa suojarleiden

koestus myös ensiökoestuksena, koska sähköasema ei ole vielä käytössä, jolloin jännitekatkos ei aiheuta ongelmia.

Markkinoilla olevilla ensiö- ja toisiokoestuslaitteilla voidaan syöttää eri virta-, jännite-, vaihekulma-, ja taajuusarvoja sen mukaan, kuin tarvitsee. Koestuslaitteilla kyetään muuttamaan koestuksen aikana virta-, jännite-, vaihekulma- ja taajuusarvoja joko manuaalisesti tai automaattisesti riippuen koestuslaitteesta. Koestuslaitteilla voidaan mitata esimerkiksi katkaisijan toiminta-aika eli kuinka kauan kestää, kun rele havahtuu syötettyyn vikavirtaan ja antaa katkaisijalle toimintakäskyn. Koestuslaitteissa voidaan ohjelmoida eri testitiloja esimerkiksi katkaisijan toiminta-aikojen testaamiseen. Koestuslaitteesta riippuen voidaan jännitteitä ja virtoja syöttää yksi- tai kolmivaiheisesti. Uusimmista koestuslaitteista löytyy kuusi virtalähtöä, jolloin voidaan koestaa esimerkiksi muuntajan differentiaalisuoja helpommin, kun saadaan syötettyä kolmivaihevirtaa kahteen eri paikkaan (ABB, 2008).

Kuten luvussa 2.2 todettiin, niin toisiokoestus on helpompi, nopeampi ja turvallisempi toteuttaa kuin ensiökoestus. Näin ollen seuraavaksi tarkastellaan millaisia toisiokoestuslaitteita ja näiden käyttämiä sovelluksia on markkinoilla peilaten niitä relekoestukseen. Koestuslaitemarkkinoilla on useita laitevaihtoehtoja ja valmistajia suojarleiden koestamisiin. Tarkasteluun otetaan neljän eri valmistajan toisiokoestuslaitteet. Nämä ovat yhdysvaltalaiset Doble ja Manta sekä itävaltalainen OMICRON ja isobritannialainen Megger. Doble, OMICRON ja Megger kuuluvat suurimpiin yrityksiin koestuslaitemarkkinoilla. Doble osti Manta Test Systemsin vuonna 2018, mutta Manta tekee silti vielä oman nimensä alla koestuslaitteita. Koestuslaittevertailussa ovat Doble F6150SV, OMICRON CMC 356, Manta MTS-5100 ja Megger SMRT 410, Kuva 2.3.



Kuva 2.3. Vasemmalla ylhäällä Doble FS6150SV, oikealla ylhäällä OMICRON CMC 356, vasemmalla alhaalla Manta MTS-5100 ja oikealla alhaalla Megger SMRT410. (Doble Engineering Company, 2021), (Doble Engineering Company, 2021), (Megger, 2021), (OMICRON, 2021),

Näillä koestuslaitteilla voidaan koestaa lähes kaikkien sähkömekaanisten, staattisten ja digitaalisten releiden suojaustoiminnot, joihin kuuluvat muun muassa:

- Katkaisijavikasuojaus
- Maasulkusuojaus
- Ylivirtasuojaus
- Distanssisuojaus
- Differentiaalisuojaus
- Yli- ja alitaajuussuojaus
- Yli- ja alijännitesuojaus

Taulukossa 2.1 vertaillaan koestuslaitteiden virransyöttökykyjä.

Taulukko 2.1. Koestuslaitteiden virransyöttökykyjen vertailu. (Doble Engineering Company, 2020), (Manta Test Systems, 2012), (Megger, 2021), (OMICRON, 2021)

	<b>F6150SV</b>	<b>CMC 356</b>	<b>MTS-5100</b>	<b>SMRT410</b>
3-vaihe max virta [A]	35 (70*)	64	60*	60
3-vaihe max [VA]	175 (262.5*)	860	900*	300 (424*)
3-vaihe jännite [V]		50 rms	70 huippu	
6-vaihe max virta [A]	17.5 (35*)	32	30*	32
6-vaihe max [VA]	87.5 (131.25*)	430	450*	200 (282*)
6-vaihe virta [V]		35 huippu	70 huippu	
1-vaihe max virta [A]	105 (210*)	128	180*	96 (180*)
1-vaihe max [VA]	525 (787.5*)	1740	2400*	600 (1272*)
1-vaihe virta [V]		140 huippu	70 huippu	50

\*Hetkellinen

Taulukosta 2.1 nähdään, että virransyöttökyky on OMICRONilla ja Meggerillä jatkuvassa virransyötössä suurimmat. Doblen ja Mantan koestuslaitteet pääsevät samoihin lukemiin hetkellisellä virransyötöllä. Normaaleiden suojareleiden testauksessa näillä virransyöttökykyillä ei tule ongelmia, koska suurempien virtojen syötössä suojareleet toimivat vain nopeammin. Tarvittaessa laitevalmistajat tarjoavat vahvistinyksiköitä, joilla voidaan virtaa kasvattaa vielä suuremmiksi esimerkiksi OMICRONin CMS 356 laite.

Vanhempien suojareleiden, kuten sähkömekaanisten suojareleiden kohdalla puhutaan, kuinka paljon ne vaativat tehoa (VA). Taulukossa 2.1 näkyvä koestuslaitteiden VA määrittää, kuinka paljon tehoa jokainen kanava kykenee tuottamaan. Digitaalisten releiden koestamiset tämän kannalta onnistuvat kaikilla laitteilla vähäisen tehontarpeen vuoksi. Digitaalisten releiden osalta tarkastellaankin enemmän virransyöttökykyä. Osa sähkömekaanisista releistä tarvitsee enemmän näennäistehoa toimiakseen, koska sen avulla liikutetaan releen sisällä olevia osia. Muun muassa ABB:n IRD-9 mallin sähkömekaanisissa releissä kaikkein korkeimmalla suojausasettelulla vaaditaan laukaisun aikaan saamiseksi 1020 VA:n verran tehoa (ABB, 1999). Pienemmän tehon omaavassa laitteessa voi joutua tekemään kytkentämuutoksia, jotta riittävän suuri teho saadaan tuotettua. (Werstiuk, 2021) Eli, jos aikoo testata

paljon sähkömekaanisia releitä niin suuremman tehon omaavat OMICRON 356 ja Mantan MTS-5100 ovat hyviä vaihtoehtoja.

Osa sähkömekaanisista releistä tarvitsevat joustojännitettä (compliance voltage). Koestuslaitteen on kyettävä tuottamaan tiettyä jännitettä, jotta saavutetaan haluttu koestusvirta riippuen sähkömekaanisen releen virranmittauspiirin impedanssista. Tätä jännitettä voidaan kutsua joustojännitteeksi. Taulukossa oleva ”jännite (V)” kertoo koestuslaitteen joustojännitteen suurimman arvon. Monista koestuslaitteiden teknisistä tiedoista tämä puuttuu kokonaan, mutta sen puuttuessa sen arvoa voidaan hieman päätellä tehon avulla. Esimerkiksi Doble 6150SV:stä tietoa ei löydy, mutta tehon arvon avulla voidaan päätellä, että sen täytyy olla pienempi kuin OMICRONin tai Mantan laitteissa. MT-5100 laitteella on suurempi 3- ja 6-vaiheen joustojännite, mutta CMC 356:lla on suurempi 1-vaiheinen joustojännite, joten CMC 356 pystyy testaamaan muutamia releitä, joita MT-5100 taas ei pysty. (Werstiuk, 2021) Koestuslaitteelta tarvittava joustojännitteen tuotto koskee vanhempia suojareleitä, joita ei ole paljoa enää käytössä. Kyseinen ominaisuus ei siis tule olemaan rajoittava tekijä koestuksen näkökulmasta missään neljästä koestuslaitteesta. Taulukossa 2.2 vertaillaan jännitteenvahvistuskykyjä eri valmistajien koestuslaitteissa.

Taulukko 2.2. Koestuslaitteiden jännitteenvahvistuskykyjen vertailu. (Doble Engineering Company, 2020), (Manta Test Systems, 2012), (Megger, 2021), (OMICRON, 2021)

	<b>F6150SV</b>	<b>CMC 356</b>	<b>MTS-5100</b>	<b>SMRT410</b>
3-vaihe max jännite [V]	300	300	250	300
3-vaihe max teho [VA]	150	100	85	150
1-vaihe max jännite [V]	600	600	750	600
1-vaihe max [VA]	300	275	250	300
DC jännite [VDC]	6–300	0–264	10–350	5–250
DC jännite [W]	90	50	150	100

Kaikilla koestuslaitteilla kyetään syöttämään suojareleitä ja syöttämään kolmivaihejännitteitä. Doblen F6150SV, OMICRONin CMC 356 ja Meggerin SMRT410 kykenevät syöttämään yli 250 V. Doblen F6150SV:llä pystyy samanaikaisesti syöttämään relettä ja kuudesta eri jännitelähdöstä jännitettä. OMICRONin CMC 356:lla voi syöttää relettä ja neljästä eri jännitelähdöstä jännitettä samanaikaisesti. Mantan MTS-5100:lla ja Meggerin SMRT410:lla

voi syöttää myös neljästä eri jännitelähdöstä jännitettä joko siten, että yksi syöttää relettä ja kolme muuta koestusjännitteitä tai sitten syötetään pelkästään neljää koestusjännitettä. Kaikilla koestuslaitteilla kytetään koestamaan kuusivaiheisia jännitteenvälvoimareleitä, mutta CMC 356, MT-5100 ja SMRT410 vaativat enemmän johdotuksia.

Yhteenvedona voidaan todeta, että jokaisella testilaitteella onnistuu yleisimmät suojarелеkoestukset. Erot ilmenevät lähinnä harvinaisempien ja vanhempien sähkömekaanisten suojarелеiden testauksessa, jotka voivat vaatia suuria tehoja tai joustojännitteitä. Lisäksi hyvänä keinona on varmistaa vielä valmistajilta tarkempia tietoja koestuslaitteista, jos ei ole aivan varma täyttääkö koestuslaitteet suojarелеiden asettelemat koestuskriteerit.

## 2.5 Koestuslaittevalmistajien koestusohjelmat

Vertailussa olevien koestuslaitteiden ohjaukseen ja toimintojen suorittamiseen vaaditaan koestusohjelma, jota voisi verrata tietokoneen käyttöjärjestelmään. Jokaisella koestuslaitteen valmistajalla on omat koestuslaitteiden koestusohjelmat, joiden avulla voidaan toteuttaa eri koestustilanteita suojarелеille sekä tutkia, tallentaa ja analysoida saatuja arvoja. Ilman koestusohjelmaa koestuslaitteella ei voi suorittaa koestustoimenpiteitä. OMICRONilta löytyy Test Universe, Doblelta Protection Suite, Mantalta MTS Onboard Software ja Meggeriltä Relay Test Management Software.

### 2.5.1 OMICRON Test Universe

Test Universe on OMICRONin tietokoneohjelma, jonka avulla saadaan kyseisen valmistajan koestuslaitteita ohjattua halutulla tavalla. Test Universe -ohjelma tarjoaa käyttäjälle mahdollisuuden koestaa joko manuaalisesti tai valmiiden koestusmoduulien pohjalta. Manuaaliohjelmalla käyttäjä voi itse syöttää haluttuja virta-, jännite-, vaihekulma- ja taajuusarvoja releelle koestuslaitteen avulla. Valmiita koestusmoduuleja löytyy esimerkiksi ylivirta-, distanssi- ja differentiaalireleille. Perusajatuksena valmiiden koestusmoduulien käytössä on määritellä koestusmoduuliin releeltä vaaditut toiminta-ajat sekä -arvot, joiden ylittyessä tai alittuessa releen täytyy toimia. Tämän jälkeen koestuslaite testaa releen ja raportoi toimiko rele vaadituilla reunaehdoilla vai ei. Muita hyödyllisiä toimintoja ovat ohjelman

piirtomahdollisuudet, kuten esimerkiksi osoitinpiirroksat, jotka havainnollistavat koestuslaitteen syöttämät virrat ja jännitteet sekä näiden suunnat. Lisäksi Test Universe -ohjelmalla on mahdollista hakea suoraan releiltä (jos releen valmistaja tukee toimintoa) esimerkiksi distanssireleiden asettelukuvio. Varsinkin numeerisilla releillä tämä on hyödyllinen toiminto, koska toiminta-alue on vapaasti määriteltävissä, joten niiden käsin piirtäminen veisi paljon enemmän aikaa. Test Universen NetSim -testimoduulilla voidaan simuloida releille eri verkon vikatilanteita. Tässä testimoduulissa otetaan huomioon kaikki verkon olennaiset komponentit, kuten jännitelähteet, johdotukset, muuntajat, katkaisijat ja virtamuuntajien kyläisyys. Test Universe -ohjelma tarjoaa myös mahdollisuuden IEC 61850 -pohjaisten piirien koestamisen kattavasti. Test Universe -ohjelman kaikissa testimoduuleissa on käytössä raportointitoiminto. Koestuksen koostuessa monesta eri testistä esimerkiksi suojareleen testauksen aikana, raportointitoiminnolla pystytään koostamaan kaikkien eri testien tulokset yhteen kokonaisraporttiin. Raporttia pystytään helposti muokkaamaan ja sinne voidaan lisätä omia kommentteja tarvittaessa. Lisäksi Test Universen koestuspohjia voidaan muokata ja käyttää uudelleen, joka hyödyttää silloin, jos on esimerkiksi paljon samanlaisia suojareleitä koestettavana. (OMICRON, 2016)

### 2.5.2 Doble Protection Suite

Doblen F6000- ja F2250-sarjan koestuslaitteita ohjataan Protection Suite -tietokoneohjelmalla. Protection Suite -ohjelmalla kyetään koestamaan joko manuaalisesti tai tietynlaisten koestusmakrojen avulla. Manuaaliohjelmalla käyttäjä voi toteuttaa samat, kuin OMICRONin Test Universe -ohjelma. Koestusmakrot sisältävät suojareleelle suoritettavat koestustoiminnot, kuten ylivirran, ylijännitteen tai alijännitteen koestuksen. Koestusmakroihin voidaan manuaalisesti valita mitä koestustoimintoja halutaan suojareleelle suorittaa tai sitten voidaan valita eräänlaisia valmiita koestustoimintopaketteja. Näitä koestusmakroja voi sitten kopioida muille releille. Perusajatus koestusmakrojen käytössä on myös sama, kuin OMICRONin Test Universe -ohjelmassa eli määritellään releeltä vaaditut toiminta-ajat sekä -arvot, joiden ylittyessä tai alittuessa releen täytyy toimia. Tämän jälkeen koestuslaite testaa releen ja raportoi toimiko rele vaadituilla reunaehdoilla vai ei. Halutessaan jokaiselle koestusmakrolle määritetty testausväliaika, jonka jälkeen ohjelma suosittelee suojareleen uudelleen-testausta. Tämä helpottaa muun muassa kausikoestusten aikataulutusta. Muita toimintoja ovat ohjelman piirtomahdollisuudet, kuten OMICRONin Test Universessäkin esimerkiksi

osoitinpiirrokset, jotka havainnollistavat koestuslaitteen syöttämät virrat ja jännitteet sekä näiden suunnat. Protection Suite ja siihen lisätty F6TesT -ohjelma tarjoaa mahdollisuuden myös IEC 61850 pohjaisten piirien koestamisen kattavasti. Protection Suite -ohjelmassa on käytössä raportointitoiminto, jossa raportin laajuuden voi valita. Raportti voi sisältää käyttäjän määrittelemän laajuuden mukaan yhden tai useamman suojareleen tiedot, valitun testimakron tulokset tai valitun testimakron sisällä olevan koestustoiminnon tulokset. Raportin voi tallentaa ja sen jälkeen tarkastella yleisimmillä formaateilla, kuten PDF, Word tai Excel. (Doble Engineering Company, 2021), (Doble Engineering Company, 2020)

### 2.5.3 Manta Onboard Software

Mantan MTS-5100 koestuslaitteen ohjaus tapahtuu koestuslaitteessa olevasta kiinteästä näyttöstä, jolloin ei tarvita erillistä tietokoneohjelmaa. MTS-5100 voi kuitenkin ohjata myös tietokoneen avulla, mutta koestusohjelman käyttöliittymä on sama, kuin koestuslaitteessa. Mantan koestusohjelmassa on myös manuaalinen koestustila, jossa koestuslaitteen ohjainpainikkeilla ja rullalla voidaan muuttaa jännite-, virta-, vaihekulma- ja taajuusarvoja. Manuaalisen koestusohjelman lisäksi Mantan koestusohjelma tarjoaa käyttäjälle eräänlaisia valmiita koestuspohjia tietyille suojareleille. Ennen valmiin koestuspohjan käyttöä siihen syötetään releen asetukset ja muut testiparametrit. Valmiita koestuspohjia voi käyttää manuaalilaitteissa tai automaattitilassa. Valmiin koestuspohjan manuaalitilassa voi muokata virta- ja jännitearvoja eri vikatiloissa. Vikatilat jaetaan vikaa ennen olevaksi tilaksi (prefault), vikatilaksi (fault 1–8) ja vian jälkeiseksi tilaksi (postfault). Vikatiloja (fault) voi luoda kahdeksan kappaletta ja muita yhden per koestus, joten yhteensä voidaan luoda 10 tilaa. Vikatiloilla pystytään simuloimaan verkon todellisia vikatiloja, joista sitten nähdään suojareleen toiminta. Koestuspohjan automaattitilassa voi valita eri koestustoimintoja ja määritellä näihin tarvittavat parametrit, jonka jälkeen testitila hoitaa koestuksen, jolloin itse ei tarvitse muuttaa esimerkiksi virta- ja jännitearvoja. Valmiita koestuspohjia löytyy muun muassa differentiaali-, distanssi- ja ylivirtareleille. Mantan koestusohjelmasta löytyy myös oskilloskooppitoiminto. Koestusohjelma kykenee toteuttamaan myös haastavampia koestustapahtumia, kuten end-to-end -koestuksen, jossa syötetään siirtojohtoon kahteen eri paikkaan vikatapahtumia kahdella eri laitteella, jotka ovat aikasykronoitu GPS-kellon avulla. Tällä saadaan koko suojausjärjestelmästä tietoa. Mantan koestusohjelma havainnollistaa myös syötettävien virtojen ja jännitteiden suuruudet sekä suunnat osoitinpiirroksena. Piirustusmahdollisuudet

ovat siis hyvin samanlaiset verrattuna muihin ohjelmiin asettelukuvioita myöten. Myös Manta koestuslaitteella ja -ohjelmalla kyetään koestamaan IEC 61850 -standardiin pohjautuvien suojarleiden välisten kommunikaatioprotokollien toimivuus. Jokaisen koestuksen jälkeen voi tallentaa testiraportin riippumatta siitä onko koestus manuaalinen vai automaattinen. Jokainen yksittäinen koestus tallentuu erillisenä tiedostona. Raportit ovat enemmän tekstipainotteisia, jotka voidaan tallentaa HTML- tai XML-muodossa. (Manta Test Systems, 2012)

#### 2.5.4 Megger Relay Test Management- ja Advanced Visual Test Software

Relay Test Management Software eli RTMS on tietokoneohjelma, jonka avulla voidaan hallinnoida koestuksia SMRT-sarjan koestuslaitteissa. Jokaisessa SMRT-sarjan koestuslaitteessa tulee tämä ohjelma mukana, eikä se vaadi esimerkiksi lisenssiä toimiakseen. RTMS-ohjelmassa on kahta eri tasoa, jotka ovat standard ja enhanced. Standard-taso tarjoaa mahdollisuudet peruskoestukseen ja Enhanced-taso tarjoaa lisäominaisuuksia, kuten IEC61850 -standardiin pohjautuvan GOOSE-viestinnän koestamisen. Kuten muidenkin koestuslaitteiden ohjelmistoissa niin myös RTMS:stä löytyy manuaalinen koestustila, jossa voi muokata virta-, jännite-, kulma-, ja taajuusarvoja. Valmiita koestusmakroja löytyy usealle eri relevalmistajalle ja releelle esimerkiksi releiden toiminta-ajan mittauksiin. RTMS-ohjelmasta löytyy yli 20 valmistajan suojarleiden toiminta-aika käyrät, joiden avulla koestusohjelma kertoo, onko toiminta-aika teoreettisen toiminta-aika käyrästä mukainen. RTMS-ohjelma piirtää distanssireleiden asettelukuviot, kuten muutkin koestusohjelmat. RTMS-ohjelmasta löytyy myös IEC61850 GOOSE Configurator -sovellus, jonka avulla voidaan havaita väylässä kulkevaa GOOSE-viestintää. SV-viestien havaitsemiseen ja lähettämiseen ei RTMS-ohjelmassa ole sovellusta. Raporttitoiminto on täysin muokattavissa ja se voidaan tallentaa esimerkiksi PDF- tai Word-muodossa. (Megger, 2021) Meggerillä on myös lisäohjelma Advanced Visual Test Software eli AVTS on Meggerin tietokoneohjelma, jonka avulla voidaan koestukset automatisoida SMRT- ja MPRT-sarjan koestuslaitteilla. Kyseinen ohjelma tuo lisäksi muun muassa testimakrojen luomisen visuaalisesti, jolloin useampia testejä voidaan suorittaa putkeen ja nämä voidaan toteuttaa visuaalisesti. Käyttäjän on tällöin helpompi luoda koestussarja. Lisäksi mahdollisuutena on myös visualisoida koestuskytkennät koestuslaitteelta esimerkiksi suojarleelle, jolloin jatkossa koestajan ei tarvitse miettiä kytkentöjä niin tarkkaan, kun ne ovat havainnollistettu kuvaan. (Megger, 2021)

### 2.5.5 Yhteenveto koestuslaitteista ja -ohjelmista

Kaikissa koestusohjelmistoissa on erilaisia valmiita ohjelmapaketteja, joissa tulee tietyt lisenssit koestusohjelmiin ja näiden lisäosiin. Asiakas valitsee ohjelmapaketeista ja lisäosista itselleen sopivimman tarpeen ja budjetin mukaan. Asiakasnäkökulmasta OMICRON tarjoaa kolmesta koestuslaitteistosta selkeimmät ja kattavimmat tiedot koestuslaitteista ja koestusohjelmista ilman tarkempia kyselyjä jälleenmyyjiltä.

Mantan testilaitteistossa etuna on integroitu näyttö koestuslaitteessa ja selkeä manuaalinen koestus. Tällä saadaan suojareleet nopeammin koestettua, kuin OMICRONin, Meggerin tai Doblen laitteilla, jotka vaativat ensin koestuspohjan. Varsinkin, jos on paljon erilaisia releitä ja pitkät koestusvälit niin Mantan koestusohjelmalla saa nopeasti suoritettua koestukset, koska ei tarvitse luoda aina uusia testipohjia, kun suojareleet vaihtuvat. Meggerillä, Doblella ja OMICRONilla koestusohjelmat ovat silloin parempia, kun koestetaan paljon samoja releitä ja kokoonpanoja, jolloin valmiita testipohjia pystytään nopeasti käyttämään releeltä toiselle. Meggerillä on myös mahdollisuus kytkeä kosketusnäyttö, jota kautta voi myös hallita RTMS-ohjelmaa, jolloin ei tarvita tietokonetta. Tämä nopeuttaa myös koestusta. OMICRONilla on myöskin tarjolla pieni erillinen kosketusnäyttö, mutta se on tarkoitettu lähinnä manuaalisiin testeihin. Kaikissa on raportointitoiminto, jossa tallennusmahdollisuuksina ovat erilaiset tiedostomuodot. Käytännössä tiedostomuodolla ei ole siis suurta merkitystä mitaustuloksien kannalta, mutta voi vaikuttaa raportointiohjelman käyttömukavuuteen, jos on tottunut johonkin tiettyyn tiedostomuotoon. Taulukossa 2.3 on koostettuna olennaisimmat asiat eri koestuslaitteista ja -ohjelmistoista.

Taulukko 2.3. Koontitaulukko koestuslaitteiden ja -ohjelmistojen olennaisimmista kohdista.

	<b>F6150SV</b>	<b>CMC 356</b>	<b>MTS-5100</b>	<b>SMRT410</b>
<b>Virranvahvistus</b>				
3-vaihe max virta [A]	35 (70*)	64	60*	60
3-vaihe max [VA]	175 (262.5*)	860	900*	300 (424*)
<b>Jännitevahvistus</b>				
3-vaihe max jännite [V]	300	300	250	300
3-vaihe max teho [VA]	150	100	85	150
DC jännite [VDC]	6–300	0–264	10–350	5–250
DC teho [W]	90	50	150	100
<b>Virtakanavat [kpl]</b>	6	6	6	6
<b>Jännitekanavat [kpl]</b>	6	4	4	4
<b>Koestusohjelma</b>	Protection Suite	Test Universe	MTS Onboard Software	Relay Test Management Software
Manuaalikoestus	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Automaattikoestus	Koestusmakro	Koestusmoduuli	Valmiita koestuspohjia	Koestusmakro
Piirtotoiminto (mm. distanssireleiden asettelukuviot ja osoitinpiirroset)	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä
IEC 61850 valmius	Kyllä	Kyllä	Kyllä	GOOSE ainoastaan
Raportointitoiminto	Kyllä (PDF, Word, Excel)	Kyllä (RTF, TXT)	Kyllä (HTML, XML)	Kyllä (PDF, Word)

## 2.6 JaTe-yksikön koestuslaitteet ja käytettävyys tulevaisuudessa

JaTella on monenlaisia koestuslaitteita, joilla kyetään toteuttamaan sekä ensiö- että toisio-koestusta. Ensiökoestuslaitteena JaTella on OMICRON CPC 100. OMICRON CPC 100 mahdollistaa käytännössä kaiken koestuksen sähköasemien ensiöpuolelta. Näihin lukeutuvat

muun muassa virta-, jännite- ja tehomuuntajat, maadoitukset, IEC 61850 standardipohjaiset piiriratkaisut, suojareleet, kytkimet sekä katkaisijat. CPC 100:n lisälaitteeksi on hankittu CP CB2, jolla pystytään lisäämään virransyöttökykyä 2000 A. CPC 100:aa voidaan ohjata etupaneelissa olevilla ohjainpainikkeilla tai Primary Test Manager -tietokoneohjelmalla (OMICRON, 2020). Näillä laitteilla kyetään toteuttamaan myös tulevaisuuden sähköasemat. Tätä puoltaa muun muassa mahdollisuus koestaa IEC 61850 -standardipohjaisia piiriratkaisuja, jotka ovat vasta tulossa laajemmassa mittakaavassa käyttöön. Näistä IEC 61850 -standardipohjaisista piiriratkaisuista onnistuu havaita piiristä oikeat MU-muuntimet ja koestaa mittamuuntajilta lähtevät SV-viestit (OMICRON, 2020). Lisäksi sähköasemien komponentit tulevat olemaan vielä pitkälti samanlaisia, kuin ovat tähänkin asti olleet, joten tällä laitteistokokonaisuudella ei tule ongelmia koestuksen suhteen. OMICRON tarjoaa ohjelmistopäivityksiä sekä uusia lisälaitteita tietyin väliajoin, jolloin tulevaisuuden sähköasemaratkaisut saadaan koestettua, vaikka laite ei olisikaan markkinoiden uusinta mallia.

JaTella on useita toisiokoestuslaitteita, jotka painottuvat kahteen valmistajaan. Nämä ovat itävaltalainen OMICRON ja isobritannialainen Megger. OMICRONilta käytössä on kaksi kappaletta CMC 356 koestuslaitetta ja näiden koestusohjelma Test Universe. Luvussa 2.4 tutkittiinkin CMC 356:en ja Test Universen soveltuvuutta toisiokoestukseen ja havaittiin, että kyseisellä koestuskokonaisuudella riittää hyvin ominaisuudet koestamaan nykyiset releet. Lisäksi näillä pystytään toteuttamaan myös tulevaisuuden suojausratkaisujen koestuksia, kuten IEC 61850 -standardiin pohjautuvia suojauslaitteita. Kuten luvussa 2.5.1 todettiin OMICRON tarjoaa Test Universe koestusohjelmaansa tietyntyyppisiä lisenssipaketteja, jolloin kaikki koestusmoduulit eivät ole suoraan käytettävissä vaan niitä täydennetään tarpeen mukaan ostamalla niihin lisenssi. JaTella ei ole kaikkia lisenssejä Test Universe koestusohjelmassa, joten tämä saattaa tulevaisuudessa rajoittaa varsinkin IEC 61850 standardiin pohjautuvien suojauslaitteiden koestamista. Lisenssit ovat kuitenkin mahdollisuus ostaa, joten suurta ongelmaa ei ole. Tulevaisuuden näkökulmasta JaTe voisi harkita vielä CMC 850 -laitetta, joka on puhtaasti suunniteltu koestamaan IEC 61850 -standardipohjaisia suojausratkaisuja. CMC 850 helpottaa suojareleiden välillä kulkevia GOOSE- ja SV-kommunikaatioprotokollien tutkimista (OMICRON, 2018).

Megger SVERKER 650 ja – 780 koestuslaitteet ovat suunniteltu yksivaiheisiin reletestauksiin. Näillä releillä ei pysty koestamaan niin laajasti, kuin OMICRONin CMC 356:lla. Näistä

koestuslaitteista puuttuu esimerkiksi LAN-portit, jolloin automaattiset koestustapahtumat eivät ole mahdollisia. SVERKER 650 ja -780 koestuslaitteilla kyetään koestamaan vain manuaalisesti eli asetteluarvot täytyy asetella käyttäjän itse. SVERKER 650 koestuslaite on vanhin ja siinä on vähiten toimintoja. Tällä laitteella kyetään koestamaan vain virta-, jännite ja tehoreleitä. SVERKER 650:ssä on vain pieni digitaalinäyttö, jonka avulla voidaan mitata releiden toiminta-aikoja. SVERKER 650:ssä ei pysty muuttamaan, kuin virta- ja jännitearvoja. Etuna SVERKER 650:ssa on sen pieni koko ja yksinkertaisuus. Tällä koestuslaitteella kyetään koestamaan vanhempia releitä nopeasti, eikä ylimääräiseen ohjelmien suorittamiseen mene aikaa. Raportointimahdollisuutta ei ole, joten arvot on kirjoitettava käsin ylös. SVERKER 780 on hieman kehittyneempi versio SVERKER 650:stä. Tällä laitteella kyetään koestamaan jo huomattavasti enemmän releitä kuten ylivirta-, ylijännite-, alijännite-, maasulku-, differentiaali-, distanssi- ja lämpöreleitä. SVERKER 780:lla pystyy muuttamaan virta-, jännite-, vaihekulma- ja taajuusarvoja tarpeen mukaan. Tähän koestuslaitteeseen on mahdollista kytkeä tietokone USB-portin kautta, jolloin voidaan käyttää SVERKER Win -tietokoneohjelmaa, joka mahdollistaa valmiiden raporttien muodostamisen. SVERKER Win -tietokoneohjelman avulla voi myös tallentaa koestusarvot, jolloin samanlaista relettä testattaessa ei tarvitse asetta käsin koestusarvoja, vaan ne voidaan ottaa suoraan aiemmasta koestustiedostosta. (Megger, 2019), (Megger, 2011) Tämä nopeuttaa huomattavasti koestamista. Myös SVERKER 780 etuna on sen keveys ja yksinkertaisuus. Tulevaisuuden näkökulmasta nämä koestuslaitteet eivät sovellu uudempien IED-releiden koestukseen. Aiemmin on kuitenkin jo todettu, että vanhempia suojareleitä on vielä pitkään sähköasemilla, joten näiden käytettävyys ei tule vähenemään tulevaisuudessakaan.

Muita sähköaseman koestukseen liittyviä laitteita, joita JaTe omistaa ovat Meggerin valmistamat MOM600A, MOM2 ja TORREL 860. MOM600A on mikro-ohmimittari, jolla voidaan esimerkiksi käyttöönotto-koestuksessa tai sähköaseman huollon yhteydessä mitata ylimenovastukset kiskoliitoksista, katkaisijoista tai erottimista (Megger, 2015). Käytettävyys tulevaisuudessa tulee olemaan korkealla tasolla, koska nykyisten jakeluverkkojen kuormat vain kasvavat tulevaisuudessa, joten ylimenovastuksien säännöllisellä tarkistuksella voidaan havaita viat ennen kuin ne aiheuttavat ylikuumenemisriskejä. MOM600A laitteessa ei ole raportointimahdollisuutta, vaan tulokset on luettava pienestä digitaalinäytöstä ja kirjattava käsin. MOM2 on myös mikro-ohmimittari, jolla suoritetaan samat toimenpiteet, kuin MOM600A laitteella. MOM2 on vain uudempi ja siinä ominaisuuksina ovat 190

mittaustuloksen tallennusmahdollisuus, bluetooth-yhteys tiedonsiirtoon ja tulosten analysointiin MOM Win -tietokoneohjelma (Megger, 2017). Tulevaisuuden näkökulmasta MOM2 mittauslaite tulee olemaan käytössä vielä pitkään samoista syistä, kuin MOM600A. TORREL 860 on akkutesteri akustoille, joiden jännitealue on 12–480 V. Tällä akkutesterillä voidaan suorittaa akuston testaus vakiovirralla, -teholla, -vastuksella tai halutun kuormitusprofiilin mukaisesti (Megger, 2011). TORREL 860 on siis monipuolinen akkutesteri. Akkutesterissä on tiedonsiirtomahdollisuus tietokoneelle ja tuloksia voidaan analysoida PowerDB -tietokoneohjelmalla. Tulevaisuuden näkökulmasta TORREL 860 on vielä pitkään käytössä, koska sähköasemilla täytyy aina olla toimiva akusto sähköhäiriön sattuessa. Lisäksi esimerkiksi hajautettu tuotanto vain lisää akustojen määrää (Piispanen, 2019).

Kokonaisuudessaan JaTella on todella hyvät ja monipuoliset koestuslaitteet nykyisille ja tulevaisuuden sähköasemille koestuksen näkökulmasta. Koestuksia voidaan suorittaa niin ensiö- kuin toisiopuolella. Lisäksi erilaiset koestuslaitteet tarjoavat mahdollisuuden ottaa vain sellaiset koestuslaitteet mukaan, kuin tarvitsee. Tulevaisuuden näkökulmasta näillä koestuslaitteilla päästään peruskoestuksen näkökulmasta pitkälle, koska suojaruleiden käyttöikä on pitkä ja nykyisillä koestuslaitteilla kyetään koestamaan tämän hetken suojaruleet. Ainoastaan IEC 61850 -standardiin pohjautuvat koestusratkaisut voivat aiheuttaa lisälisenssien tai -laitteiden hankintaa, mutta sekin selviää ajan kanssa. Taulukossa 2.4 JaTen tämän hetken koestukseen liittyvät laitteet.

Taulukko 2.4. JaTen koestuksiin liittyvät laitteet

	<b>Laite</b>	<b>Määrä</b>	<b>Lisätietoja</b>
<b>Ensiökoestuslaitteet</b>	OMICRON CPC 100	1 kpl	
Lisälaite	CP CB2	1 kpl	Lisää CBC 100 syöttökykyä 2000A
<b>Toisiokoestuslaitteet</b>	OMICRON CMC 356	2 kpl	Kolmivaiheiseen relekoestukseen
	Megger Sverker 780	1 kpl	Yksivaiheiseen relekoestukseen
	Megger Sverker 650	1 kpl	Yksivaiheiseen relekoestukseen
<b>Muut laitteet</b>	Megger MOM600A	1 kpl	mikro-ohmimittari
	Megger MOM2	1 kpl	mikro-ohmimittari
	Megger TORHEL 860	1 kpl	Akkutesteri

### 3 IEC 61850 -standardi sähköasemalla

Tällä hetkellä IEC 61850 -standardia on jo osittain käytössä sähköasemilla, joten kyseinen aihe on ajankohtainen. Seuraavassa luvussa kerrotaan IEC 61850 -standardista ja sen vaikutuksista osittain digitaaliseen ja täysin digitaaliseen sähköasemaan koestuksen näkökulmasta.

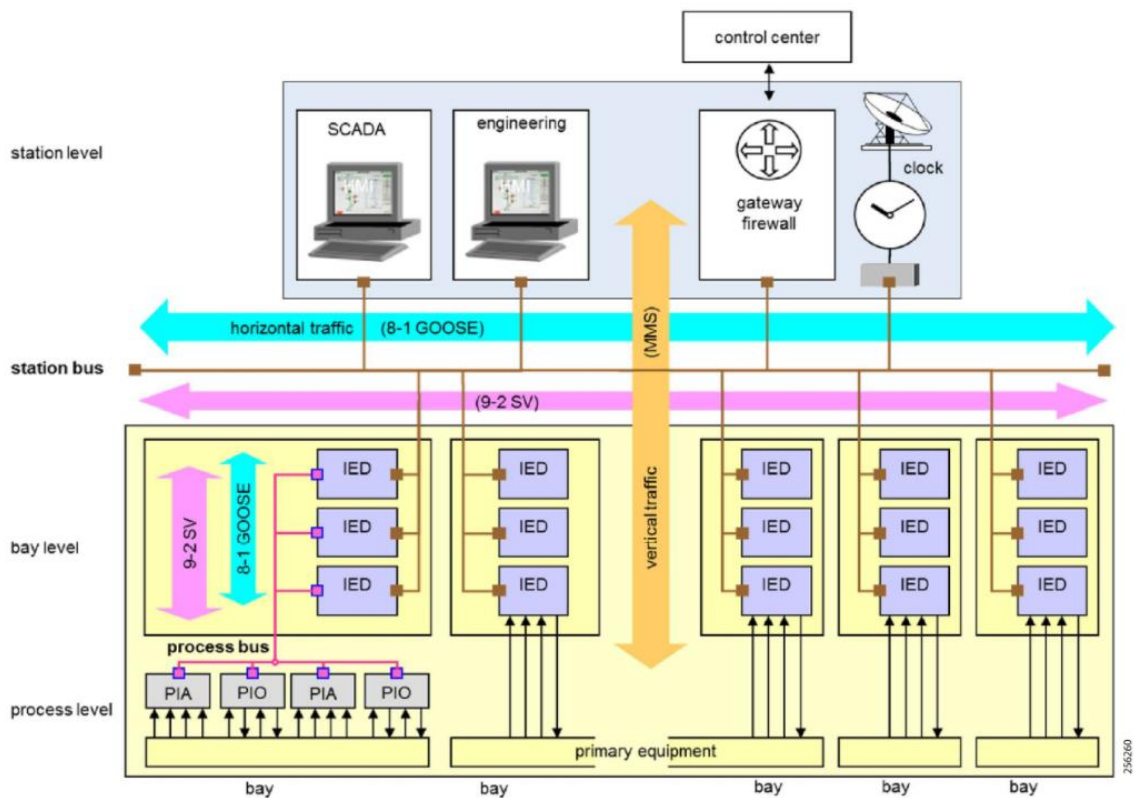
#### 3.1 IEC 61850 -standardi

Sähköasema-automaation kommunikointi on ollut hyvin rajallista, ennen kuin IED-laitteet tulivat markkinoille 1980-luvulla. IED-laitteisiin lukeutuvat mittalaitteet, digitaaliset suojarileet ja MU-laitteet. Tämän diplomityön kannalta oleelliset IED-laitteet ovat digitaaliset suojarileet.

Tätä ennen sähköasema-automaation kommunikointi rajoittui mittalaitteelta releelle ja releeltä tietoliikenteen päätelaitteelle. Kommunikointi on tapahtunut analogisten signaalien avulla, jotka ovat muutettu digitaalisiksi vasta päätelaitteella. IED-laitteilla kommunikointi on paljon monipuolisempaa, koska ne kykenevät kommunikoimaan toisten laitteiden kanssa sekä ylemmän tason asemaväylän kanssa. Asemaväylän kautta tiedot siirtyvät esimerkiksi kaukokäyttöjärjestelmään. IED-laitteiden kommunikaatiossa ongelmana on ollut se, että eri laitetoimittajat ovat saattaneet käyttää omaa kommunikointiprotokollaa, jolloin eri laitetoimittajien laitteet eivät kykene kommunikoimaan keskenään. (Elovaara & Haarla, 2011) Tämän vuoksi on saatettu joutua asentamaan sähköasemille monimutkaisia sekä kalliita protokollamuuntimia (Sidhu, et al., 2008).

Tähän ongelmaan alettiin 1990-luvulla etsiä ratkaisua kehittämällä IEC 61850 -standardia, jonka ensimmäinen versio julkaistiin lopulta vuonna 2004. Kuusi vuotta tämän jälkeen julkaistiin toinen versio, johon oli tehty korjauksia ja lisäyksiä. IEC:n standardiprosessi edellyttää, että standardit tarkastetaan viiden vuoden välein, jolloin mahdollisia korjauksia ja muutoksia voidaan tehdä. (Falk, 2019) Näin ollen IEC 61850 -standardi kehittyy koko ajan ja kasvaa. IEC 61850 -standardin perusajatuksena on luoda laitevalmistajille sähköasema-

automaation kommunikointiin yhteiset kansainväliset kommunikaatioprotokollat, nopea viestien välitys, laitteiden helppo konfiguroitavuus ja ylläpito sekä pitkäaikainen vakaus viestintäteknikassa (Claveria & Kalam, 2018). Suojareleiden osalta tällä tarkoitetaan, että eri laitevalmistajien IED-releet kommunikoivat yhteneväisesti ja niiden käytettävyys tulee olemaan pitkäikäistä. IEC 61850 -standardissa eri tasoilla ja tasojen välillä käytetään eri kommunikaatioprotokollia, joista käytännössä ovat SV, GOOSE ja MMS (Manufacturing Message Specification). Kuvasta 3.1 voidaan nähdä, millä eri tasoilla näitä kommunikointiprotokollia käytetään.



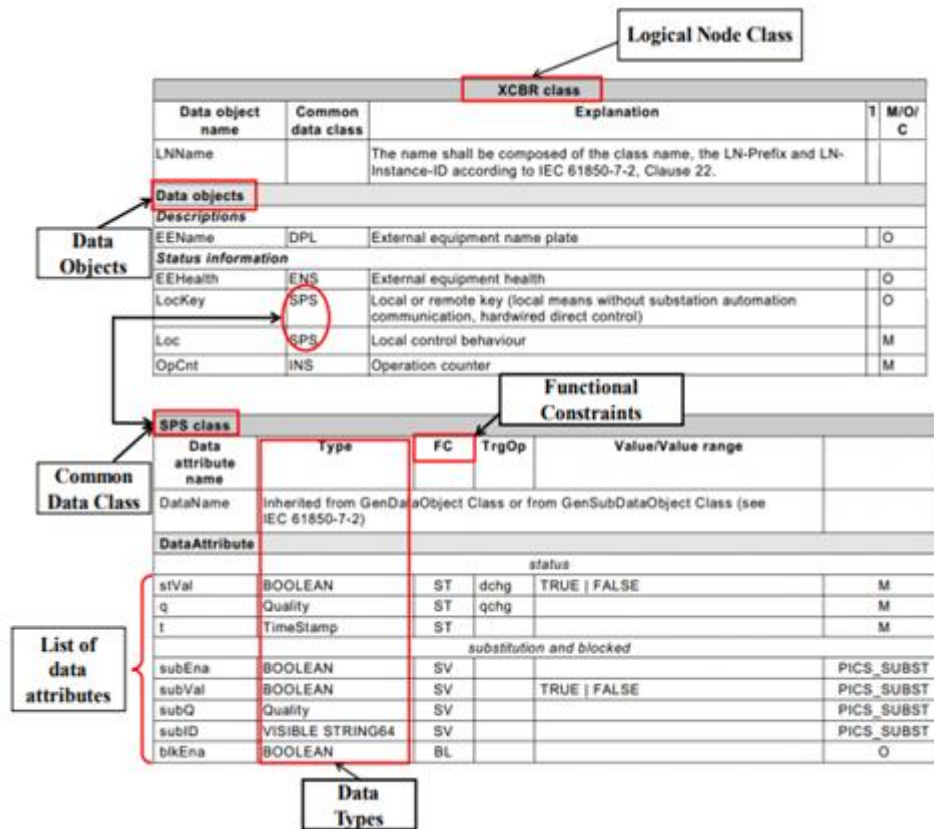
Kuva 3.1. IEC 61850 -standardin mukainen sähköasematkaisu. (CISCO, 2019)

Lisäksi kuvasta 3.1 voidaan nähdä sähköaseman kolme eri tasoa, jotka ovat asemataso (station level), kenttätaso (bay level) ja prosessitaso (process level). Asemataso käsittää muun muassa paikallisen ohjauksen, häiriötallenteiden keräyksen ja yhteydet kaukokäyttöjärjestelmään. Kenttätaso sisältää suojareleet ja niiden välisen kommunikaation. Prosessitasolla ovat kaikki primäärilaitteet, kuten jännite- ja virtamuuntajat sekä MU-laitteet. Prosessi- ja

kenttätason välillä käytetään horisontaalisia SV- ja GOOSE-kommunikaatioprotokollia, jotka kulkevat prosessiväylän (process bus) kautta. Kenttä- ja asematason välillä voidaan käyttää vertikaalista MMS-kommunikaatioprotokollaa. Lisäksi kenttätasolla voidaan IED-releiden välillä käyttää SV- ja GOOSE-kommunikaatioprotokollia. Kenttä- ja asematason väli yhdistyy asemaväylällä (station bus), jossa kommunikointi yhdistyy niin muiden kentojen IED-laitteiden kuin asematason IED-laitteiden kanssa.

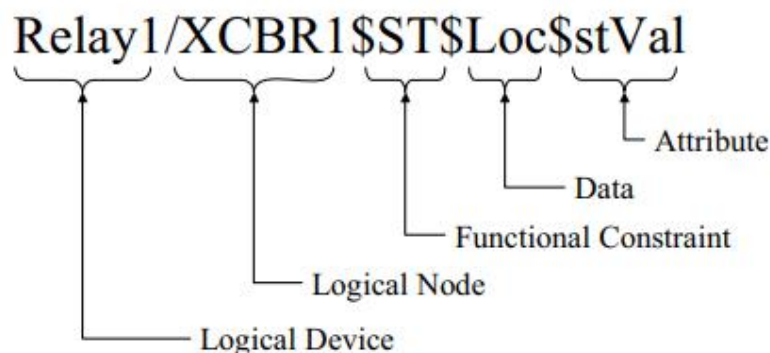
### 3.2 IEC 61850 -standardin mukainen tietomalli

IEC 61850 -standardissa on määritelty tietojen järjestäminen tietynlaiseen tietomalliin, jolloin eri valmistajien IED-laitteet voivat kommunikoida keskenään. Yhdenmukaisesti määritellyn tietomallin käyttäminen nopeuttaa IED-laitteiden käyttöönottoa. Esimerkiksi IEC 61850 -standardin mukainen suojarole tunnistaa virta- tai jännitemuuntajan tulon kytkemisen ja määrittää automaattisesti sen mittausyksikköön ilman käyttäjän toimia. Aiemmissa releissä kaikki toiminnot on täytynyt konfiguroida manuaalisesti. IEC 61850 -standardin mukainen tietomallin koostumus alkaa fyysisestä laitteesta (Physical Device) eli IED-laitteesta, joka muodostaa yhteyden verkkoon ja se tunnistetaan tyypillisesti verkko-osoitteesta. Jokaisessa fyysisessä laitteessa voi olla yksi tai useampi looginen laite (Logical Device). Loogisen laitemallin avulla yksi fyysinen laite voi toimia välityspalvelimena tai yhdyskäytävänä muille laitteille. Se siis tarjoaa standardimuotoisen esityksen tiedon keskittämistä, jolloin looginen laite sisältää kokoelman toiminnallisuuksia esimerkiksi suojauksesta tai automaatiosta. Jokaisessa loogisessa laitteessa on yksi tai useampi looginen solmu (Logical Node). Looginen solmu kuvaa digitaalisesti esimerkiksi katkaisijaa tai muuntajaa. Loogiset solmut ovat nimetty standardisoidusti, jolloin esimerkiksi katkaisijan loogisen solmun nimi on XCBR. Looginen solmu koostuu tietoryhmästä (Data Object) ja siihen liittyvistä tietoattribuuteista (Data Attribute). Tietoryhmät ovat myös standardisoidusti nimetty ja ne liittyvät sähköjärjestelmän toiminnallisuuksiin, kuten tilatietojen antoon. Attribuutit kertovat mitä arvoja tietoryhmä sisältää. Standardisoinnin merkitys tulee tässä eli IED-laitteet sisältävät valmiita standardisoituja tietoryhmiä, jolloin niitä ei tarvitse erikseen konfiguroida. Täytyy vain valita, mitkä tietoryhmät otetaan käyttöön. (Mackiewicz, 2006) Kuvassa 3.2 näkyy esimerkiksi katkaisijan (XCBR) toiminnallisuuksien määrittäminen tietoryhmillä ja -attribuuteilla.



Kuva 3.2. Katkaisijan toiminnallisuuksien määrittely. (Jang, et al., 2018)

Kuvassa 3.2 näkyy katkaisijan eri toiminnallisuuksia. Esimerkinomaisesti voidaan rakentaa katkaisijan paikalliskäytön konfigurointi. Ensin valitaan tietoryhmästä Loc, jonka jälkeen nähdään tietoluokka sarakkeesta (Common data class), että se sisältää SPS-tietoluokan (Single Point Status). SPS-tietoluokassa voidaan sitten toiminnallisilla rajoituksilla (Functional constraints) määrittää, mitä tietoa halutaan nähdä. Kuvassa 3.3 on esimerkki, kuinka tämä konfiguroidaan releelle.



Kuva 3.3. ”Relay1” nimisen releen määrittely paikalliskäyttöön. (Mackiewicz, 2006)

Kuvassa 3.3 on Relay1-niminen rele, joka koostuu yhdestä katkaisijan loogisesta solmusta XCBR1, jolle määritellään, että katkaisija on paikalliskäytössä Loc ja stVal kertoo tietotyypin, onko se käytössä vai ei (Tosi/Epätosi).

Loogisessa laitteessa täytyy olla vähintään kolme loogista solmua, joista kaksi on ennalta määritettyjä. Yhden loogisen solmun täytyy olla, joku mikä suorittaa jotain toimintoa, kuten katkaisija, ja kaksi ennalta määritettyä solmua ovat LLN0 sekä LPHD. LLN0 hallinnoi loogista laitetta, johon se on määritetty. LPHD kuvaa fyysistä laitetta ja se sisältää muun muassa nimi- sekä kuntotiedot. (Matoušek, 2019)

### 3.3 IEC 61850 -standardin mukainen viestiliikenne

Yksi kriittisimmistä asioista sähköaseman suojauksen kannalta on aikakriittisten tietojen oikea-aikainen lähettäminen, kuten tilamuutokset, lukitukset, vapautukset ja laukaisut IED-laitteiden välillä. IEC 61850 -standardissa määritellään aikakriittisiksi kommunikaatioprotokolliksi GOOSE- ja SV-kommunikaatioprotokollat. (León, et al., 2016) Aikakriittisten tietojen lähettämiseen IEC 61850 -standardissa määritellään sallitut siirtoajat. Tämä siirtoaika sisältää tiedon lähetyksen ja vastaanoton. Viestit voidaan määrittää seitsemään eri luokkaan, jossa GOOSE-viestit luokitellaan 1A ja 1B luokkaan. SV-viestit taas luokitellaan luokkaan 4. Taulukossa 3.1 näkyvät IEC 61850 -standardin määrittelemät luokat siirtoajoille.

Taulukko 3.1. IEC 61850 -standardin määrittelemät luokat siirtoajoille. (León, et al., 2016)

Message type	Time requirement	Common Bus	Example Application
<b>1A</b> - Fast messages, trip (GOOSE)	Transmission time $\leq 3\text{ms}$	Process bus	Circuit breaker commands (trip, close, reclose, start, stop, block), states etc.
<b>1B</b> - Fast messages, others (GOOSE)	Transmission time $\leq 20\text{ms}$		
<b>2</b> - Medium speed messages (MMS)	Transmission time $\leq 100\text{ms}$	Process and Station bus	RMS values calculated from type 4 messages.
<b>3</b> - Low speed messages (MMS)	Transmission time $\leq 500\text{ms}$	Process and Station bus	Alarms, configurations, non-electrical measurand.
<b>4</b> - Raw data messages (SV)	Transmission time 3 - 100ms	Process bus	Digital representation of electrical measurand.
<b>5</b> - File transfer functions (MMS)	Transmission time $\leq 1000\text{ms}$	Process and Station bus	Files of data for recording, settings, etc.
<b>6</b> - Time synchronization messages	Transmission time N/A	Process and Station bus	IED internal clock synchronization
<b>7</b> - Command message with access control	Transmission time N/A	Station bus	Based on type 3 message with additional password verification procedures.

Taulukosta 3.1 huomataan, että GOOSE- ja SV-viestien siirtoajat täytyvät olla huomattavasti pienemmät, kuin muilla viestityypeillä.

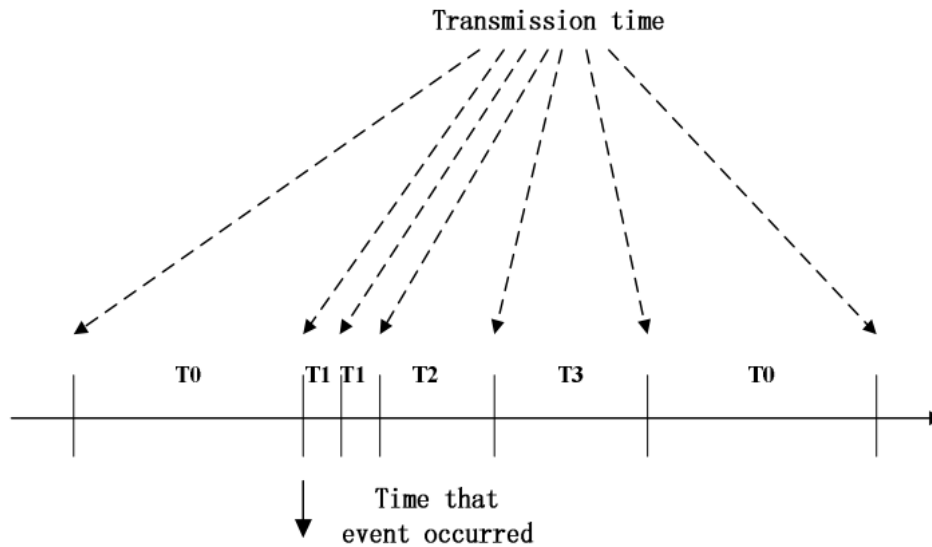
### 3.3.1 GOOSE-kommunikaatioprotokolla

GOOSE on toinen tärkeistä aikakriittisistä kommunikaatioprotokollista, jotka ovat määritetty IEC 61850 -standardissa. GOOSE toimii nopean vertaisverkon (peer-to-peer) tavoin eli jokainen IED-laite on kommunikaatioyhteydessä toisiinsa. Käytännössä tämä tarkoittaa, että samalla tasolla olevien IED-laitteiden välisen viestinnän ei tarvitse enää kulkea ylemmän tason kautta. GOOSE-kommunikaatioprotokolla toimii Ethernet yhteydellä, jolloin on korvattu niin sanottu point-to-point kuparikaapelointi nopeammalla Ethernet-kaapeloinnilla. (Fernandes, et al., 2014)

GOOSE-protokollassa kommunikointi tapahtuu julkaisija-tilaajamallin (publisher-subscriber) mukaisesti multicast viestinä. GOOSE-viestit voivat sisältää muun muassa seuraavia asioita (Amulya, et al., 2017):

- Status – tilatiedot, laukaisut, hälytykset jne.
- Analog – laskureiden arvot (StNum, SqNum) jne.

Esimerkiksi IED-laite (julkaisija) lähettää katkaisijan tilatietomuutoksen multicast-osoitteeseen ja tämän tiedon vastaanottavat kaikki IED-laitteet (tilaaja), jotka ovat tilanneet kyseisen multicast-osoitteen. Julkaisija lähettää viestiä tietyn väliajoin useasti, jotta saadaan varmistus viestin perillemenosta. Varmistuaakseen vielä siitä, että yhteydet ovat koko ajan kunnossa julkaisija lähettää säännöllisesti varmistusviestin, että yhteys tilaajiin on kunnossa. Kyseisen varmistusviestin sisällössä kerrotaan, että viestiin on määritetty elinikä (Time Allowed To Live), jonka sisällä tilaajan pitäisi saada uusi varmistusviesti. Elinikä on käyttäjän asettama. Jos tilaaja ei saa tätä uutta varmistusviestiä käyttäjän asettamassa eliniässä, niin se voi asettaa hälytyksen ilmaisemaan joko julkaisijan tai yhteydessä olevan vian. (Wester, et al., 2011) Esimerkiksi ABB:n johdonsuojarele REF 615:ssa varmistusviestien väli on 1000 ms. Näin ollen, jos tilaaja ei saa kahden 1000 ms syklin aikana viestiä lähettäjältä, se tulkitsee, että viestiyhteydessä on vika. (ABB, 2012) Kuvassa 3.5 havainnollistetaan GOOSE-viestien toiminta tapahtuman aikana eli esimerkiksi, kun tulee katkaisijan laukaisukäsky.



Kuva 3.5 GOOSE-viestien aikajana. (Du & Liu, 2012)

Kuvassa 3.5 T0 tarkoittaa varmistusviestien aikaväliä, jolloin tapahtumia ei ole ollut pitkään aikaan. T1 on tapahtuman jälkeinen lähetysaika, jonka jälkeen tilaajan pitäisi toimia. Koska tilaaja ei ilmoita julkaisijalle viestin vastaanottamisesta, niin julkaisija lähettää vielä tapahtumasta tietoja T2 ja T3 lähetyksvälin mukaisesti. Näiden jälkeen julkaisija siirtyy lähettämään taas varmistusviestejä tilaajille T0 lähetyksvälin mukaisesti.

Kaikki Ethernetin kautta kulkeva tieto pakataan niin sanottuihin kehyksiin (frame). GOOSE-viestien kehysrakenne määrittelee viestin prioriteetin sekä, kuinka VLAN-verkkoja (Virtual Local Area Network) käytetään. Kuvasta 3.6 nähdään, mistä kaikesta GOOSE-viestin kehys rakentuu.

Ethernet		802.1Q				Ethertype	GOOSE				
MAC dest	MAC src	TPID	PCP	CFI	VID	Type	APPID	length	Reserved 1	Reserved 2	goosePDU

Kuva 3.6. GOOSE-viestin kehysrakenne. (Lopes, et al., 2015)

Ethernet osio määrittää mistä osoitteesta multicast-viesti lähetetään ja mihin osoitteeseen se on tarkoitettu. Tämä toteutetaan IEC 61850 standardin määrittämällä MAC-osoitevälillä

(Medium Access Control), jossa GOOSE-viestin osoiteväli on 01-0C-CD-01-00-00 ja 01-0C-CD-01-01-FF. Tässä kolme ensimmäistä oktettia eli 01-0C-CD tarkoittavat, että se on MAC-monilähetysoite, neljäs oktetti 01 tarkoittaa GOOSE-viestiä. Kahdella viimeisellä oktettilla määritetään ryhmälähetysoite. (Lopes, et al., 2015)

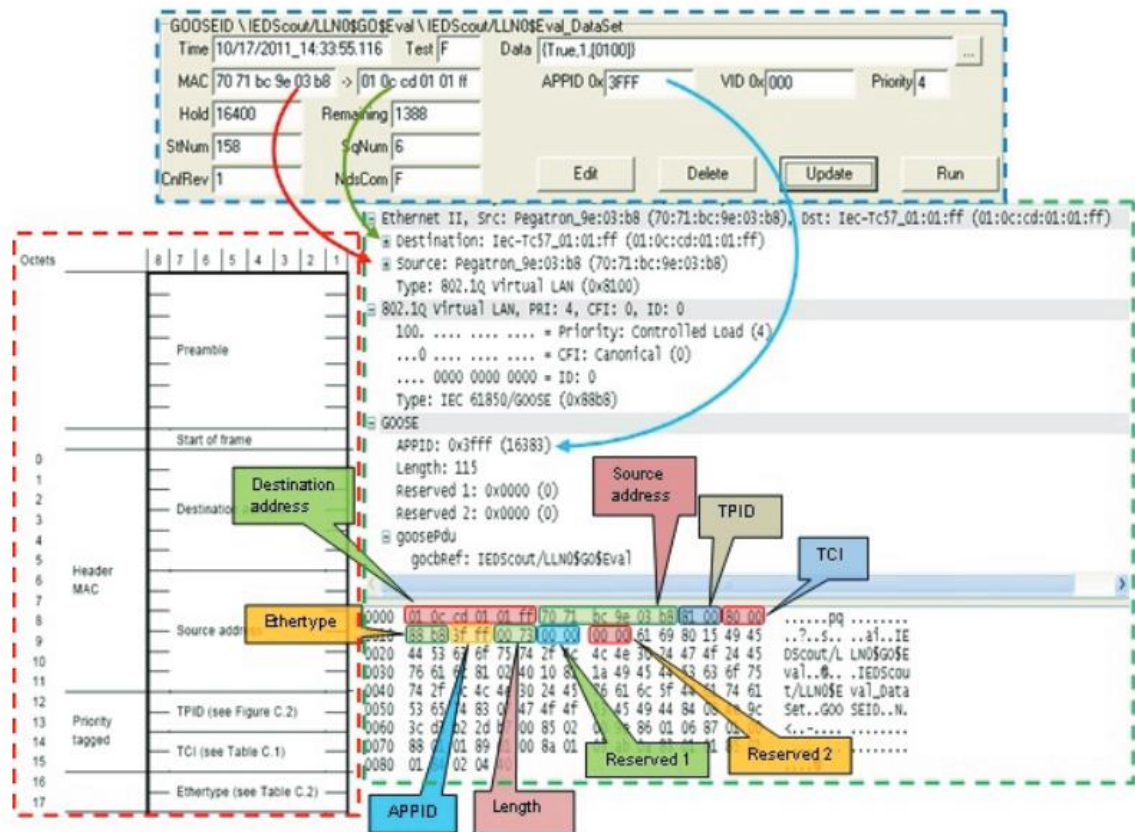
GOOSE-viestien täytyy olla sähköverkon toimivuuden kannalta verkkoliikenteessä aina prioriteettilistan kärjessä. Tämän mahdollistamiseksi GOOSE-viestit noudattavat IEEE 802.1Q -standardia, jonka avulla voidaan priorisoida tietovirrat Ethernet-kytkimen kautta niin, että kriittinen tieto välittyy ennen normaalia verkkoliikennettä. (Wester, et al., 2011) TPID (Tag Protocol Identifier) -kenttä kertoo Ethernet-tyypin, joka on määritelty 0x8100:ksi. PCP (Priority Code Point), CFI (Canonical Format Indicator) ja VID (VLAN Identifier) kuuluvat TCI (Tag Control Information) -kenttään, jonka kokoonpanolla erotetaan näytteistetyt arvot matalamman prioriteetin väyläkuormasta. Lisäksi tällä kokoonpanolla myös määritetään virtuaalisen lähiverkon tuki, jos sellaista käytetään. (Lopes, et al., 2015)

Ethertype kohta indikoi myös sen, että viesti on GOOSE-viesti ja sen arvon täytyy olla aina 0x88B8. GOOSE sisältää seuraavat kentät: APPID (Application Identifier) -kenttä on julkaisijan sovellustunnus, joka on jokaisella IED-laitteella yksilöllinen. Muun muassa tämän avulla tilaaja varmistaa, että kyseinen viesti kuuluu sille. Reserved 1 ja Reserved 2 ovat tuleville standardin lisäosille varakenttinä. gosePDU sisältää itsessään vielä lisäkenttiä. Nämä ovat:

- gocbRef - GOOSE ohjauslohkoviite, joka antaa ohjauslohkon nimen.
- TimeAllowedToLive - Kertoo ajan, joka tilaajan täytyy odottaa ennen uuden viestin vastaanottamista.
- Dataset - Kuvaa tietojoukon nimeä. Viittaus GOOSE ohjauslohkoviitteeseen.
- GoID – Yksi julkaisevan IED-laitteen tunnistesta.
- T – Aikaleima, jonka avulla lisätään StNum-attribuuttia.
- StNum – Laskuri, joka kasvaa aina yhdellä, kun GOOSE-viestissä muuttuu jokin arvo.
- SqNum – Laskuri, joka kasvaa aina yhdellä, kun GOOSE-viesti lähetetään.
- Test – Kertoo sen, onko viesti testi.

- ConfRev – Kertoo konfiguraation version.
- ndsCom – Tulee, jos GOOSE-viestin tiedot ovat virheellisiä.
- NumDatSetEntries – kertoo tietoelementtien lukumäärän allDatassa
- allData – Todelliset tiedot, mitä lähetetty (kokonaisluvut yms.) (Lopes, et al., 2015)

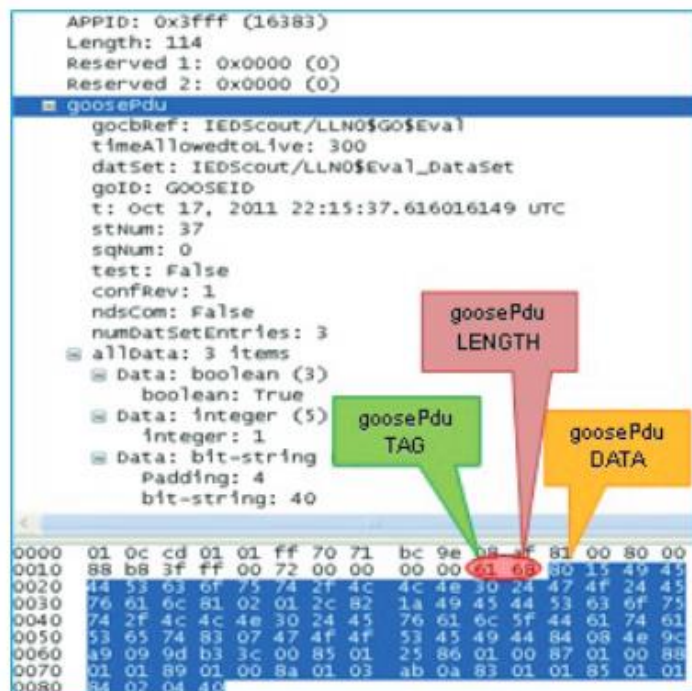
Kuvassa 3.7 esitetään GOOSE-viestin rakentuminen.



Kuva 3.7. GOOSE-viestin rakenne. (Kriger, et al., 2013)

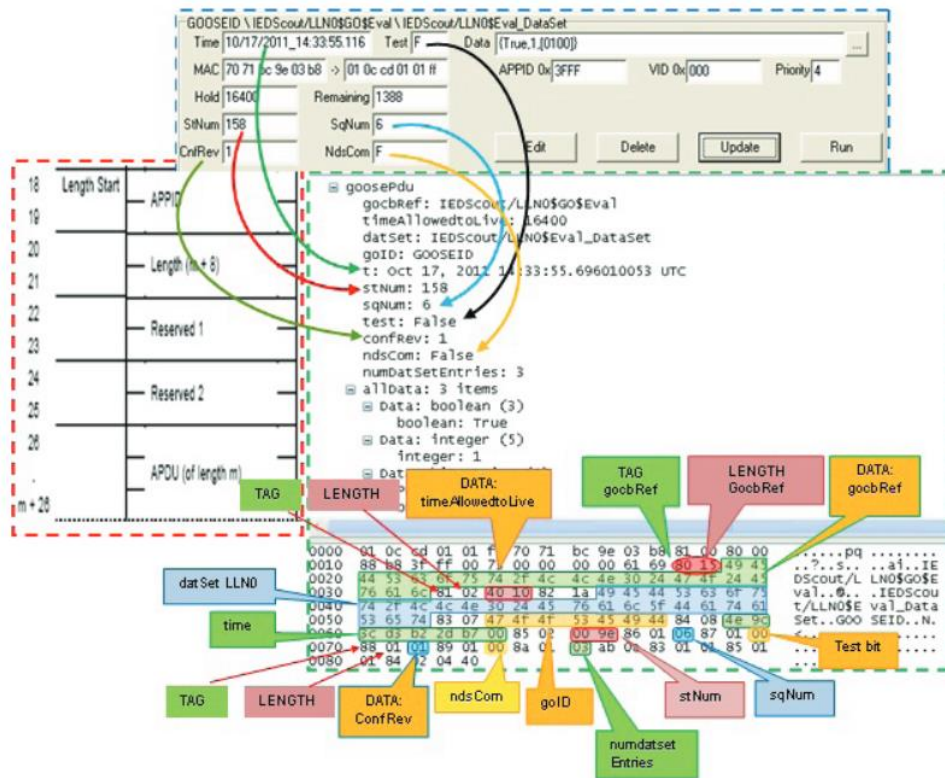
Kuvan 3.7 yläosassa sinisessä laatikossa on käyttäjän määrittämät parametrit OMICRONin IEDScout-ohjelmalla luotuun GOOSE-viestiin. Oikeassa alanurkassa vihreässä laatikossa näkyy Wireshark-tietoliikenneanalyysiohjelmalla siepatun kyseisen GOOSE-viestin sanoma heksadesimaalimuotoon muutettuna. Ethernetin kautta tieto kulkee binäärimuodossa, mutta heksadesimaalimuoto on yleinen tapa esittää binääritieto helppolukuisemmassa muodossa. Punaisessa laatikossa vasemmalla alhaalla näkyy osa GOOSE-viestin rakenteesta IEC 61850 -standardin mukaisessa esitysmuodossa. Kuvasta 3.7 tarkastellaan tässä yhteydessä

kuitenkin vain vihreää laatikkoa. Kuvasta 3.7 voidaan havaita aiemmin käsitelty GOOSE-viestin rakenne selkeästi. Alusta löytyvät julkaisijan ja tilaajan MAC-osoitteet, jonka jälkeen tulevat IEEE 802.1Q-standardin mukaiset prioriteettimääritelmät, joihin sisältyvät kuvasta 3.7 löytyvät TPID ja TCI. Näiden jälkeen tulee Ethertype kohta, josta voidaan kuvasta huomata arvo 88 b8, joka indikoi GOOSE-viestistä. Kuvassa 3.7 näkyvät viimeiset neljä kohtaa eli APPID, Length, Reserved 1 ja Reserved 2 liittyivät GOOSE kenttään, jossa muun muassa APPID-kenttä yksilöi IED-laitetta. Kuvassa 3.8 on Wireshark -tietoliikenneanalysointiohjelmalla kaapattu gosePdu:n tietojoukko.



Kuva 3.8. gosePdu:n tietojoukko. (Kriger, et al., 2013)

Kuvassa 3.9 näkyy, mitä kaikkea gosePdu tietojoukko sisältää. Kyseiset tietojoukon kohdat käytiin aikaisemmin läpi.



Kuva 3.9. goosePdu:n sisältämä tietojoukko tarkemmin. (Kriger, et al., 2013)

Kuvista 3.7–3.9 nähdään käytännötasolla, kuinka GOOSE-viestin rakenne näyttäytyy verkkoliikenteessä. Muun muassa mahdollisia vikoja varten on hyvä tunnistaa, missä kohdin heksadesimaaliarvoja mikäkin kehysrakenteen kenttä sijaitsee.

Käytännön esimerkkinä eräällä sähköasemalla suojarieleet ilmoittivat GOOSE-viestiyhteydessä olevan ongelmia. Ongelmat ilmenivät, kun uudella sähköasemalla suoritettiin koestuksia ja sähköasema oli kytketty kaukokäyttöjärjestelmään (SCADA). Ongelmaa alettiin tutkia releiden PCM600 -konfigurointiohjelman avulla, jolla voidaan tutkia releen tilaa reaaliaikaisesti, kuva 3.10.

Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
GSELPRT1: 1					
✓ GSE					
✓ Outputs					
✓ ALARM	False	False			
✓ Monitoring					
✓ Reset counters	False	False			
✓ Received msgs	1186	1186		0	10000000
✓ Transmitted msgs	119	119		0	10000000
✓ State changes	11	11		0	10000000
✓ SeqNum changes	1186	1186		0	10000000
✓ Test msgs	0	0		0	10000000
✓ State warnings	1	1		0	10000000
✓ Seq. warnings	2	2		0	10000000
✓ Recv. timeouts	0	0		0	10000000

Kuva 3.10. PCM600 -konfigurointiohjelma, joka näyttää reaaliaikaista tietoa suojarielestä.

Kuvassa 3.10 näkyy releen ilmoitukset, että julkaistavien ja vastaanotettavien viestien laskureiden kanssa on ongelmia (State warnings ja Seq. warnings). Lisäksi osa suojarieleistä ei ollut saanut GOOSE-viestiä ollenkaan (Recv. timeouts), kuva 3.11.

Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
✓ ALARM	False	False			
✓ Monitoring					
✓ Reset counters	False	False			
✓ Received msgs	992	992		0	10000000
✓ Transmitted msgs	100	100		0	10000000
✓ State changes	11	11		0	10000000
✓ SeqNum changes	992	992		0	10000000
✓ Test msgs	0	0		0	10000000
✓ State warnings	0	0		0	10000000
✓ Seq. warnings	2	2		0	10000000
✓ Recv. timeouts	1	1		0	10000000
✓ ConfRev errors	0	0		0	10000000
✓ NdsComm errors	0	0		0	10000000
✓ Dataset errors	0	0		0	10000000

Kuva 3.11. PCM600 -konfigurointiohjelma, joka näyttää reaaliaikaista tietoa suojarielestä.

Ongelmat korjaantuivat, kun suoja-releiden laskurit nollattiin ja sähköasema kytkettiin irti kaukokäyttöjärjestelmästä. Uuden sähköaseman liittäminen kaukokäyttöjärjestelmään aiheutti myös sen, että jo käytössä olevalla sähköasemalla suoja-releitä meni jumiin. Selvisi, että uudella ja jo käytössä olevalla sähköasemalla suoja-releillä on samoja MAC-osoitteita. Tällöin uudella sähköasemalla koestuksen aikana lähtevät GOOSE-viestit voivat kulkea kaukokäyttöliikenneverkon kautta myös jo käytössä olevan sähköaseman suoja-releille. Lisäksi myös suoja-releiden yksilöllinen APPID-tunnus oli sama osassa releistä uudella ja jo käytössä olevalla sähköasemalla. Kyseiset samankaltaisuudet voisivat aiheuttaa suuriakin vahinkoja, jos esimerkiksi jonkun katkaisijan laukaisukäsky olisi mennyt perille jo käytössä olevalle sähköasemalle. Mahdollinen syy suoja-releiden jumiutumiselle saattaa olla se, että julkaisija on lähettänyt toimintakäskyn multicast-viestinä tiettyyn MAC-osoitteeseen, jolloin myös jo käytössä olevalla sähköasemalla olevat suoja-releet, joilla on sama MAC-osoite, ovat vastaanottaneet viestin. Kuitenkaan näillä jo käytössä olevan sähköaseman suoja-releillä ei ole ollut kyseistä toimintaa, jolloin suoja-rele on mennyt ikään kuin jumiin. Toinen syy jumiutumiselle voi olla se, että samaa MAC-osoitetta on kahdella eri laitteella ja nämä lähettävät tietoa samalle suoja-releelle, jolloin vastaanottava rele ei kykene vastaanottamaan kahta erilaista tietoa samalla MAC-osoitteella. Ongelman korjaamiseksi on yksilöitävä suoja-releiden MAC-osoitteet ja APPID-tunnukset.

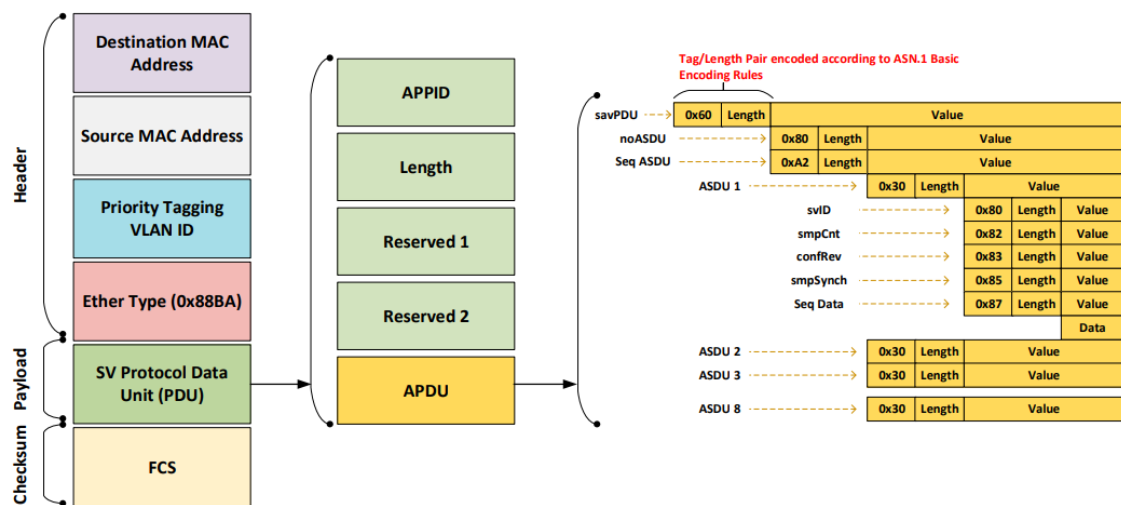
### 3.3.2 SV-kommunikaatioprotokolla

SV-kommunikaatioprotokolla on toinen tärkeistä aikakriittisistä kommunikaatioprotokollista GOOSE:n ohella. SV-kommunikointiprotokollassa SV-viesteillä välitetään prosessita-son ensilaitteiden, kuten mittamuuntajien analogisia virta- ja jännitearvoja kenttätason IED-laitteille. SV-viestien välitys tapahtuu Ethernet-teknologialla. Analogiset arvot välitetään yleensä kenttätasolla olevaan MU-laitteeseen. MU-laitteessa SV-viestit muutetaan analogisista arvoista digitaalisiksi ja lähetetään eteenpäin muille kenttätason laitteille unicast-tai multicast-viestinä. (Georg, et al., 2013) Unicast-viestien erona multicast-viesteihin on se, että tilaajia voi olla vain yksi (IEC, 2011). SV-kommunikaatioprotokolla noudattaa kommunikoinnissa samaa julkaisija-tilaajamallia, kuin GOOSE-kommunikaatioprotokolla. Erona on kuitenkin, että GOOSE-kommunikaatioprotokollassa sama viesti toistetaan useasti peräkkäin, kun taas SV-kommunikaatioprotokollassa peräkkäiset viestit eivät sisällä samoja

tietoja. (León, et al., 2016) SV-viestejä voidaan välittää myös suojarleiden välillä, esimerkiksi sellaisella sähköasemalla, jossa jännitteen mittauskenttä on kaikille yhteinen.

SV-kommunikaatioprotokollalle on määritelty IEC 61850 -standardissa kaksi eri näytteenottotaajuutta, joka tarkoittaa tietojen keräämistä prosessitason ensiolaitteilta yhden verkon taajuuden jakson aikana. 80 näytettä per jakso otetaan suojaukseen liittyviä tarkoituksia varten ja 256 näytettä per jakso otetaan mittaukseen liittyviä tarkoituksia varten. 50 Hz sähköverkossa tämä tarkoittaa, että silloin kun otetaan 80 näytettä per jakso, niin yhden viestin lähetysväli on  $250 \mu s$  ja 256 näytettä per jakson kohdalla lähetysväli on noin  $78 \mu s$ . (Wannous & Toman, 2018)

SV-kommunikaatioprotokolla pää rakenne on hyvin samantyyppinen, kuin GOOSE-kommunikaatioprotokollalla, kuten kuvasta 3.12 voidaan nähdä.



Kuva 3.12. SV-kommunikaatioprotokollan rakenne. (El Hariri, et al., 2019)

Myös SV-kommunikaatioprotokollassa viestin kehysrakenne koostuu julkaisijan sekä tilaajan MAC-osoitteista. Lisäksi SV-kommunikaatioprotokollan viesteissä käytetään IEEE 802.1Q-standardin mukaisia prioriteettimerkintöjä (Priority Tagging VLAN ID), kuten GOOSE-viesteissä. Kuvasta 3.12 huomataan, että Ether Typessä SV-viesteille on määrätty 0x88BA, kun GOOSE-viesteissä se on 0x88B8. SV Protocol Data Unit (SVPDU) sisältää

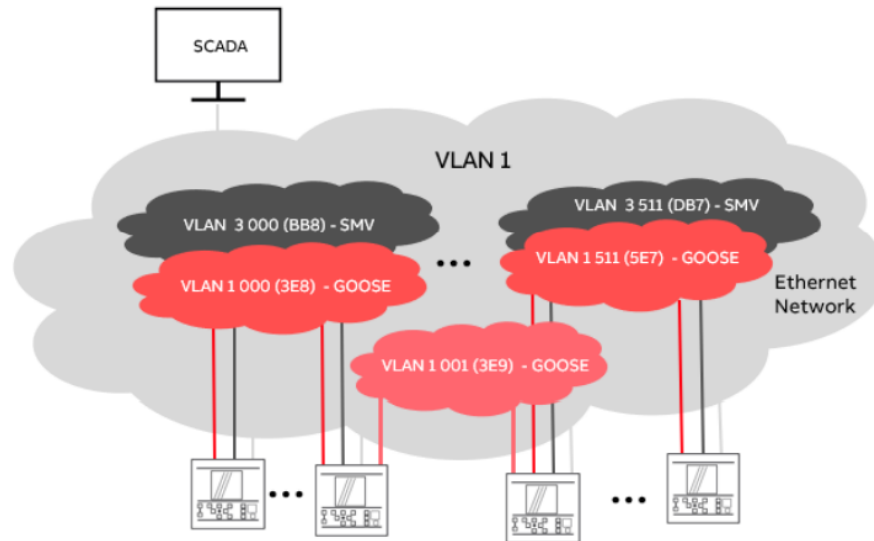
varsinaisen tietojoukon, kuten mittauksiedot. SVPDU sisältää taas Application ID:n (APPID), joka on yksilöllinen tunnistus, jota tilaaja käyttää luokittelemaan/erottamaan julkaisijan SV-viestit. Length kertoo koko viestin pituuden ja Reserved-kentät ovat tulevaisuuden standardikehitykselle varattuja. Application Protocol Data Unit (APDU) -kenttä sisältää taas yksityiskohtaiset tiedot viestistä. APDU:ssa voi olla useita Application Service Data Uniteja (ASDU), jotka sisältävät yksittäiselle solmulle merkityksellistä tietoa. Usean ASDU:n käyttö sallii yhden laitteen julkaista tai tilata mittauksietoa useista eri sähköjärjestelmän soluista samalla SV-viestillä. Mittauksiedon määrä on tallennettu noASDU kenttään. Jokainen ASDU sisältää seitsemän eri alikenttää:

- svID – Näytearvon tunnus.
- SmpCnt – Laskuri, joka kasvaa joka kerta, kun uusi näytearvo otetaan.
- ConfRev – Kertoo konfiguraatioversion
- SmpSynch – Boolean arvo, joka on tosi (True), jos SV-viesti synkronoidaan kello-signaalilla ja epätosi (False), jos sitä ei synkronoida.
- Seq Data – Näytteistettyjen arvojen jaksonpituus, sisältää virta- ja jännitearvot.
- Data – Koko tietojoukko.

Frame Check Sequencen (FCS) avulla voidaan havaita mahdolliset virheet SV-viestin rakenteessa. (El Hariri, et al., 2019)

SV-viestien rakenne on hyvä tuntee ihan samanlailla, kuin GOOSE-viestienkin. Luvussa 3.3.1 mainitulla sähköasemalla myös SV-viestien kohdalla huomattiin samoja APPID-tunnuksia eri suojarleillä.

Toinen esimerkki, jossa GOOSE- ja SV-viestien rakenteen tunteminen oli tarpeen, kun eräissä kaukokäytössä huomattiin sähköasemien välisessä kommunikaatiossa ongelmia. Ongelmat johtuivat sähköasemilla olevien releiden VLAN ID:eistä. Kyseinen ongelma korjautui, kun määritettiin jokaiselle sähköasemalle omat yksilölliset VLAN ID:t GOOSE- ja SV-viesteille. Kuvassa 3.13 havainnollistettu ABB:n VLAN ID määrittelyt.



Kuva 3.13. ABB:n VLAN ID määrittelyt. (ABB, 2020)

Kuvassa 3.13 VLAN 1 osoite tarkoittaa sitä, että kaikille releille on määritetty kyseinen osoite kaukokäytön suuntaan. Esimerkiksi kaikki MMS-viestit, kulkevat tällä osoitteella kaukokäyttöön. Sitten on sähköasemien sisäisten GOOSE- ja SV-viestien VLAN ID -osoitteiden määrittelyt, jotka yksilöidään sähköasemittain. SV-viestien VLAN ID osoitteet voidaan valita väliltä 3000–3511 ja GOOSE-viestien VLAN ID osoitteet voidaan valita väliltä 1000–1511. Kyseisten osoitevälien valinta tukeutuu IEC 61850-90-4 standardiin (ABB, 2020). Eli esimerkiksi saman kaukokäytön alla sähköasema 1:llä GOOSE-viestien VLAN ID on 1000 ja sähköasema 2:lla GOOSE-viestien VLAN ID on 1001. Näin ollen sähköasemien sisäiset GOOSE-viestit eivät pääse kulkeutumaan sähköasemalta toiselle.

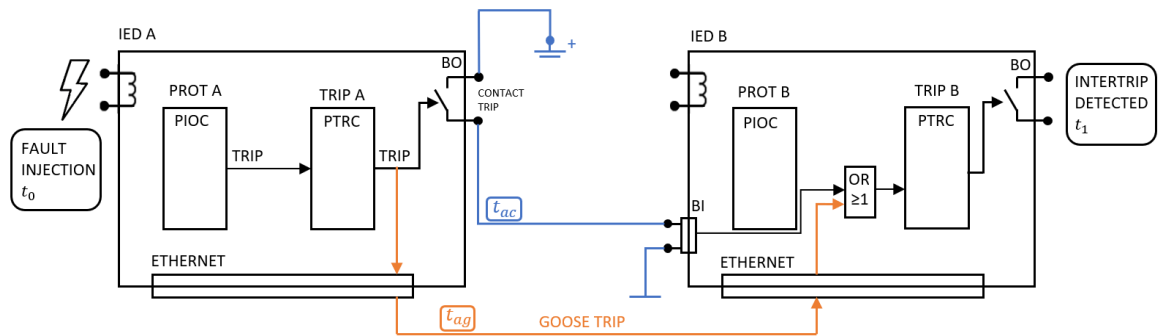
### 3.4 Aikasykronoinnin merkitys sähköasemilla

IEC 61850 -standardia käyttävillä sähköasemilla vaaditaan riittävää tarkkuutta suojareiden tapahtumille, jotta usean eri suojareleen tapahtumat voidaan järjestää tietokantaan niiden tulojärjestyksessä. Toisin sanoen toiminnot vaativat riittävän tarkkaa aikasykronia, jotta saadaan synkronoitua kaikki verkossa olevat laitteet. Oikealla tapahtumajärjestyksellä saadaan toteutettua toiminnot oikeassa järjestyksessä. (Goraj & McGhee, 2010)

Sähköasemilla suojureleiden toimintoina voi olla esimerkiksi SV-viestit ja häiriöilmoitukset. Eräs IEC 61850 -standardin mukainen aikasynkronointimenetelmä on SNTP (Simple Network Time Protocol), jossa tarkkuus on millisekunteja LAN-verkossa. SV-viestien aikasisignaalin vaatima tarkkuus on kuitenkin mikrosekunteja, joten SNTP-aikasynkronointimenetelmä ei ole toimiva ratkaisu. SNTP-aikasynkronointimenetelmän käyttö sähköasemalla, jossa kulkee SV-viestejä aiheuttaa suojureleissä häiriöilmoituksia. SV-viesti vaatii IEEE 1588 -standardin mukaista PTP-aikasynkronointimenetelmää (Precision Time Control). Tällä aikasynkronointimenetelmällä saavutetaan mikrosekunnin tarkkuus Ethernet-verkossa. (Goraj & McGhee, 2010) PTP-aikasynkronointimenetelmää käytettäessä on kuitenkin varmistuttava, että kaikki verkossa olevat laitteet tukevat kyseistä aikasynkronointimenetelmää. Monilla vanhemmilla sähköasemilla kaukokäytössä voi olla vielä tekniikkaa, joka tukee vain SNTP-aikasynkronointimenetelmää. Tämä aiheuttaa ongelmia aikasisignaalin kanssa uusilla PTP-aikasynkronointimenetelmää vaativilla sähköasemilla, jotka liitetään samaan kaukokäyttöön. Ongelman ratkaisuksi voidaan harkita esimerkiksi sähköasemakohtaisia GPS-kelloja, jotka tukevat PTP-aikasynkronointimenetelmää (Jaakkola, 2022). Kuten huomataan, niin uutta ja vanhaa tekniikkaa yhdistettäessä kustannukset voivat nousta nopeasti, jos ei ole otettu huomioon esimerkiksi aikasynkronoinnin vaatimuksia.

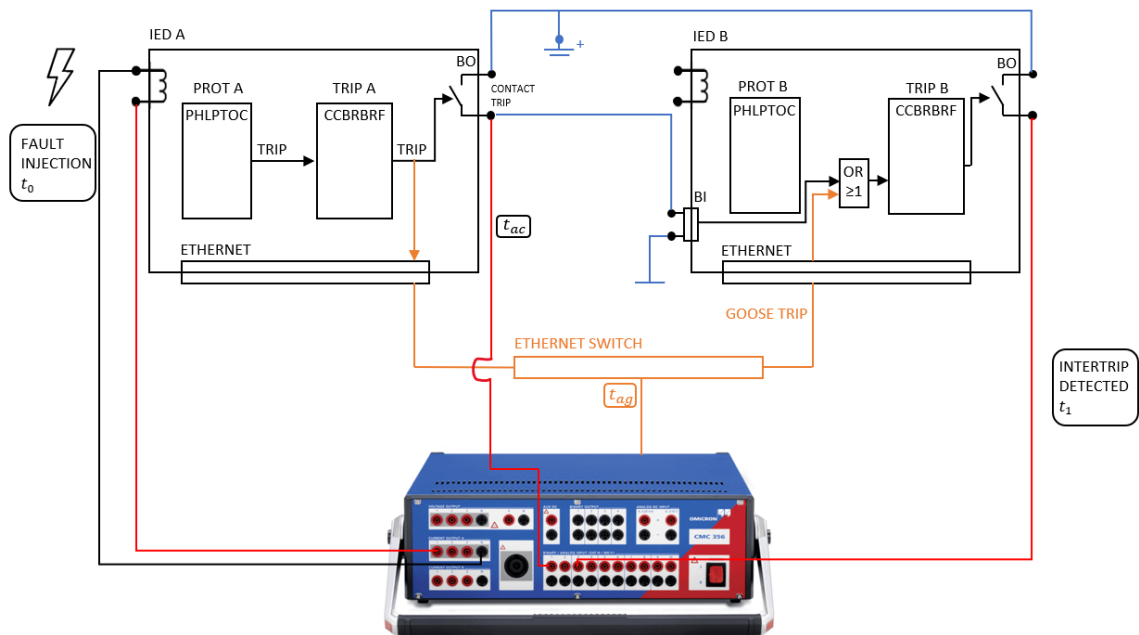
### 3.5 GOOSE- ja SV-viestit käyttöönotto-koestuksessa

Kuten luvussa 3.3 todettiin, GOOSE-viestit kuuluvat aikakriittisiin viesteihin, joille IEC 61850 -standardi on määritellyt siirtoajat. Lisäksi asiakas voi määrittellä tarvittavat toimintaajat releille. Vaadittujen toiminta-aikojen varmistamiseksi suojaustoiminnot täytyy koestaa. Koestamalla saadaan siis varmistettua sekä toiminta-ajat että suojureleiden oikea toiminta. Kuvassa 3.13 näkyy sinisellä perinteinen kuparikaapeloinnilla toteutettu suojureleiden välinen kommunikaatiokytkentä ja oranssilla GOOSE-kommunikaatioprotokollalla toteutettu kytkentä.



Kuva 3.13. Kahden suojarleen välillä kulkeva toimintoviesti. Perinteinen kuparikaapelointi sinisellä ja GOOSE-väylä oranssilla. (Bonetti & Douib, 2010)

Kuvassa 3.13 merkintä  $t_{ac}$  kertoo perinteisen kuparikaapeloinnilla toteutetun kommunikatiiväylän siirtoaajan ja merkintä  $t_{ag}$  kertoo GOOSE-kommunikaatiiväylän siirtoaajan. Toiminta-aika mitataan siitä, kun vika luodaan ( $t_0$ ), aina siihen asti, kun katkaisija laukee ( $t_1$ ). Perinteisessä kuparikaapeloinnissa, esimerkiksi ylivirtasuojauksessa koestettaessa vika luodaan IED-laitteeseen (IED A), joka antaa laukaisukäskyn binäärilähtönsä (BO). Laukaisusignaali on kytketty IED-laitteen (IED B) binäärituloon (BI) ja tämä IED-laite on konfiguroitu laukaisemaan oma lähtönsä, kun se on signaalin vastaanottanut. Muuttamatta sen kumminkin asetuksia IED-laitteissa, voidaan GOOSE-kommunikaatioprotokollaa käyttävien IED-laitteiden toiminta-ajat mitata samanlaisella koestuksella. Erona on vain IED-laitteiden välinen kommunikointireitti. JaTän puolesta on tullut tarve saada mitattua GOOSE-kommunikaatioprotokollaa käyttävien suojarleiden väliset toiminta-ajat, jotta voidaan varmistua suojauspiirin riittävän nopeasta toiminnasta. Kyseisellä mittauksella voidaan vertailla myös kuparikaapeloinnin ja GOOSE-kommunikaatioprotokollan toiminta-aikoja suojausten toimintaan. Kuvassa 3.14 käytännön tasolla oleva koestuskytkentä, jolla voidaan mitata nämä toiminta-ajat.



Kuva 3.14. Katkaisijavikasuojausten toiminta-aikojen koestuskytkentä. Kuvassa sekä GOOSE-väylän koestuskytkentä että perinteisen kuparijohdotuksen koestuskytkentä.

Kuvan 3.14 mukaisen koestuksen voi suorittaa turvallisesti vain käyttööntoekoestuksen aikana, jolloin koestusjännitteet tai -virrat eivät vahingossakaan aiheuta turhia laukaisuja. Tämä on siis riskinä sähköasemilla, jotka ovat jo käytössä ja käyttävät suoja-releiden välisessä kommunikoinnissa GOOSE-viestejä. GOOSE-viestit kulkevat kaikkien suoja-releiden läpi, jolloin eri koestustoiminnot voivat aiheuttaa vääriä toimintoja sellaisissa releissä, jotka eivät ole koestuksen kohteena. Tietenkin, jos koko sähköaseman irrottaa verkosta koestuksen ajaksi niin kyseinen koestus on mahdollista. Yleensä kuitenkin näin suurten verkon kytkentämuutosten tekeminen tällaisen koestuksen vuoksi on niin suuritöistä, että sitä ei toteuteta.

JaTe käyttää OMICRONin koestuslaitteistoja IED-laitteiden koestuksessa. Näin ollen GOOSE- ja SV-viestien kaappaukset, tulkinnat ja dokumentoinnit toteutetaan OMICRONin Test Universe ohjelmiston sisällä olevilla GOOSE - ja SV Configuration -ohjelmilla.

OMICRONin GOOSE Configuration -ohjelman avulla voidaan määrittellä, mitä GOOSE-viestejä halutaan väylästä poimia, esimerkiksi raportointia varten. JaTen tapauksessa

GOOSE Configuration -ohjelmaa käytetään yhdessä CMC 356 koestuslaitteen kanssa. GOOSE Configuration -ohjelman peruseriaatteena on ladata halutun sähköaseman suojarikonfiguraatiot ohjelmaan, jonka jälkeen ohjelman avulla voidaan valita halutut GOOSE-viestit näkyviin. Esimerkiksi käyttöönottokestuksessa voidaan haluta tietää, että lähteekö pääkatkaisijan laukaisukäsky GOOSE-viestinä väylään, kun johtolähdön katkaisija ei toimi.

SV-viestien mallintamiseen väylässä voidaan käyttää OMICRONin SV Configuration -ohjelmaa, joka tämän hetken uusimmassa Test Universen versiossa 4.30 on sisällytetty Hardware Configuration -ohjelman sisälle. Kyseisellä ohjelmalla voidaan syöttää digitaalisia virta- ja jännitearvoja väylään tai suoraan releelle. Tämä helpottaa koestajia siinä mielessä, että ei tarvita, kuin Ethernet-kaapeli, joka kytketään joko mittauskenttään tai suoraan esimerkiksi testattavan johtolähtökentän suojarielelle.

GOOSE- ja SV Configuration -ohjelmiin liittyvällä Hardware Configuration -ohjelmalla saadaan koestuslaitteeseen määritettyä, mistä portista digitaalisia virta- ja jännitearvoja lähetetään, sekä montaako eri suojarlettä halutaan syöttää kerralla. Lisäksi Hardware Configuration -ohjelmalla voidaan luoda virtuaalisia lähtö- ja tuloryhmiä koestuslaitteeseen. Tämän avulla saadaan laajennettua koestuslaitteen lähtöjen ja tulojen lukumäärää, jolloin riippuvaisuus analogitulojen ja -lähtöjen lukumäärään ei ole enää niin suuri.

### 3.6 GOOSE- ja SV-viestit kausikoestuksessa

Perinteisillä sähköasemilla, joissa suojarleiden välinen kommunikaatio kulkee kuparijohdoja pitkin, kausikoestuksessa toiminta-ajat sekä -arvot ovat helposti koestettavissa, koska niiden koestuseriaate ei ole muuttunut käytännössä kymmeneen vuosiin. Lisäksi kuparikaapeloiduilla sähköasemilla suojarle on mahdollista erottaa jännitteisestä piiristä, jolloin koestustoiminnot eivät haittaa muuta suojauspiiriä. Suojarleiden välisessä kommunikaatiossa, jossa hyödynnetään väyläteknologiaa, on hieman haastavampi koestaa. Haastavuus piilee siinä, että väylässä kulkee niin paljon muutakin tietoa, kuin pelkästään kahden suojarleiden välisen kommunikaation vaadittavaa tietoa. Kuten luvussa 2.3 todettiin, niin digitaalisessa sähköasemassa ei pystytä erottamaan suojarleitä samalla tavalla suojauspiiristä, kuin kuparikaapeloidulla sähköasemalla. Erotteluun on monta vaihtoehtoa, joista eräinä

vaihtoehtoina on, että IED-laitteissa muutetaan loogisessa laitteessa tai loogisissa solmuissa olevia tiloja (Mod) tai asettamalla IED-laite simulointitilaan.

Tiloja on viittä erilaatuista, joissa käyttäjät voivat testata suojaustoimintoja ja laitteita ilman, että koko suojajärjestelmä joudutaan sulkemaan. IED-laite voidaan asettaa testitilaan, joko laitteesta itsestään tai ulkoisella ohjelmalla, kuten OMICRONin IEC61850 Client/Server-ohjelmalla.

Testitilat ovat seuraavanlaiset:

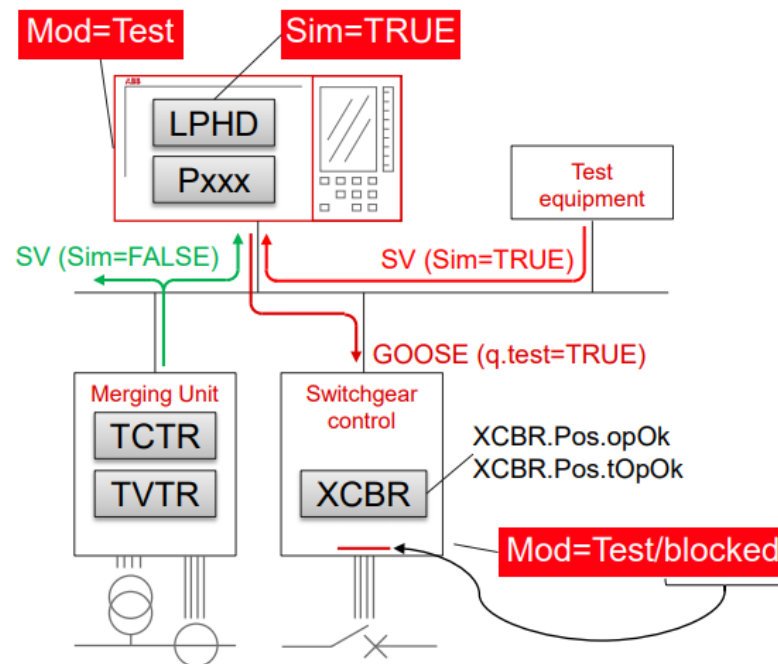
- ON – Loogisen solmun kuvaama kohde on toiminnassa normaalisti.
- ON/BLOCKED – Loogisen solmun kuvaama kohde on normaalisti toiminnassa, mutta solmu ei kykene muuttamaan laitteen fyysisiä ulostuloja. Laite ei siis kykene muuttamaan mitään kohteessa.
- TEST – Loogisen solmun kuvaama kohde on testitilassa, jolloin se ei reagoi muuta kuin testitunnuksella oleviin viesteihin. Eli looginen solmu vastaanottaa normaalisti viestejä, mutta ei reagoi niihin. Suojareleiden koestuksessa koestuslaite välittää testitunnuksella olevia viestejä ja suojarele lähettää testitunnuksella olevia viestejä. Tällöin estetään se, että tietyn toiminnan koestus ei vaikuta muihin toimintoihin.
- TEST/BLOCKED – Looginen solmu on testitilassa, jolloin se ei reagoi muuta kuin testitunnuksella oleviin viesteihin. Tässä testitilassa fyysiset ulostulot ovat blokattu eli laite ei kykene muuttamaan mitään kohteessa esimerkiksi laukaamaan katkaisijaa. Katkaisijan laukeaminen voidaan kuitenkin todentaa ohjausinformaation peilauksella.
- OFF – Looginen solmu on pois käytöstä, jolloin se ei reagoi tai lähetä mitään viestejä. (Hernández, et al., 2020)

Kuten aikaisemmin todettiin niin tiloja (Mod) voidaan asettaa pelkästään loogiselle laitteelle tai loogisen laitteen yksittäisille loogisille solmuille. Esimerkiksi, jos looginen laite on asetettu tilaan ”test”, niin loogisen laitteen sisällä olevia loogisia solmuja ei voida asettaa, kuin tiloihin ”test/blocked” tai ”off”. Tällä tavalla määritetään loogisen laitteen ja -solmujen

väläinen käyttäytyminen (Beh). Eli loogiselle laitteelle asetettu tila vaikuttaa siihen, mitä tiloja loogisen laitteen sisällä olevat solmut voivat käyttää. (Hernández, et al., 2020)

Simulointitilassa IED-laitteelle voidaan lähettää simuloituja GOOSE- ja SV-viestejä. IED-laite saa väylästä tilaamiansa viestejä ja simuloinnilla toteutettuja viestejä, mutta laite reagoi vain simuloituihin viesteihin. Esimerkiksi GOOSE-kommunikaatioprotokollan rakennekehysessä Reserved 1 -kentän avulla viesti tunnistaa simuloitun viestin. GOOSE-viestien simulointitila asetetaan (LPHD.Sim.stVal=TRUE), jolloin IED-laite tunnistaa viestin, jossa on simulointi ”lippu” mukana. IED-laite käsittelee muut tilatut viestit normaalisti, jos niitä ei ole tullut simulointi ”lipun” kanssa. Simuloinnin lopettamiseksi täytyy asettaa (LPHD.Sim.stVal=FALSE). Huomion arvoista on se, että simuloitaessa IED-laite voi antaa esimerkiksi katkaisijan laukaisukäskyn eteenpäin, jos laitetta ei aseteta testitilaan. Simuloitaessa täytyy siis asettaa IED-laite samalla testitilaan. (Hernández, et al., 2020) Kyseinen simulointi- ja testitilaan asettelu voi suorittaa valmiilla ohjelmistolla, kuten OMICRONin tarjoamalla Client/Server Modulella. Client/Server Module on ohjelma, jolla voidaan asettaa haluttu suojarole testi- ja simulointitilaan käyttämällä koestuslaitetta MMS-viestien lähettämiseen, jolla suojaroleen tilat muutetaan (Riccardo, 2019). Esimerkiksi LLN0.Mod muutetaan tilaan ”test/blocked” ja LPHD.Sim asetetaan ”TRUE” -tilaan. IED-laite voidaan asettaa kokonaisuudessaan simulointitilaan, tai IED-laitteesta voidaan asettaa vain tietty solmu simulointitilaan, jolloin IED-laite toimii muuten normaalisti.

Käytännössä simulointi voidaan suorittaa esimerkiksi ohjausinformaation peilauksella. Kuvassa 3.15 ohjausinformaatiopeilauksen toimintaperiaate.



Kuva 3.15. Simulointi ohjausinformaatiopeilauksella. (Marchetti, 2017)

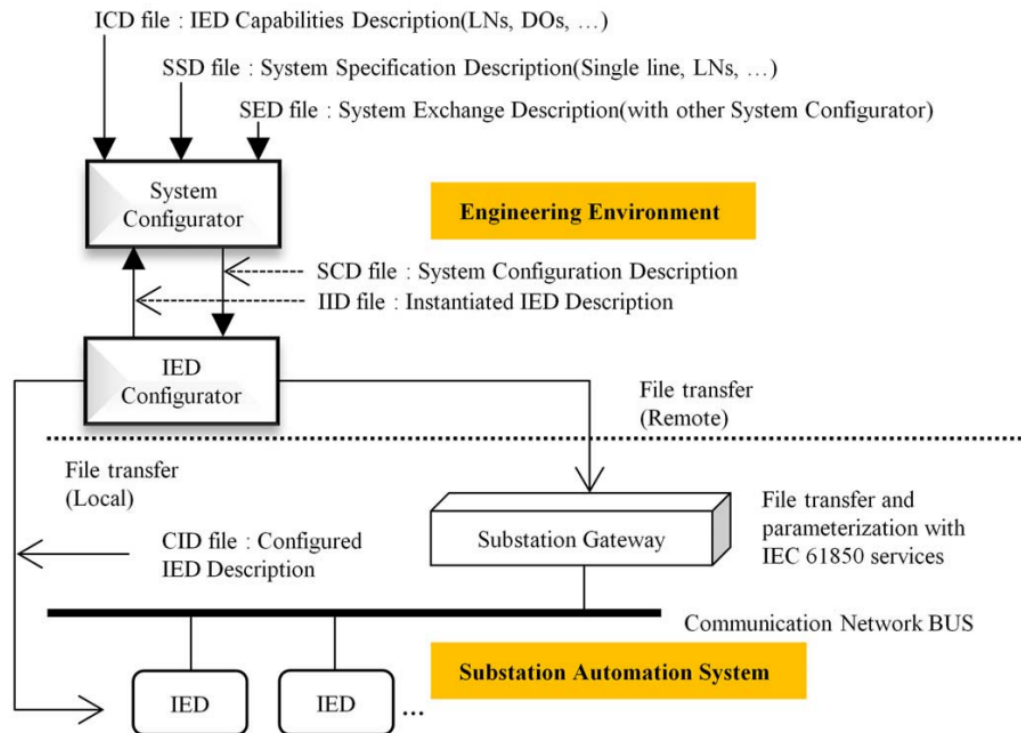
Oletetaan, että halutaan testata pääsuojausta, jolloin suojarleen dataobjektin Sim-arvo asetetaan arvoon "TRUE". Suojarleen looginen laite asetetaan tilaan "TEST" ja katkaisijan looginen solmu XCBR asetetaan tilaan "TEST/BLOCKED". Koestuslaitteella syötetään SV-arvot samalla tunnuksella, kuin normaalisti, mutta simulointilippu on arvossa "TRUE" eli tosi. Näin suojarlele saa SV-arvot koestuslaitteelta ja suorittaa laukaisun. Laukaisua ei tapahdu fyysisesti, mutta laukaisu voidaan todentaa tietoattribuutin XCBR.Pos.opOK kautta. Ajoitus voidaan mitata tietoattribuutin XCBR.Pos.tOpOk kautta. (Apostolov, 2017) Kaikki laitevalmistajat eivät tue ohjausinformaation peilausta, joten tätä käytettäessä täytyy varmistaa, että ohjausinformaation peilausmahdollisuus löytyy suojarleestä.

## 4 Suojareleiden konfigurointi

Tässä luvussa käsitellään suojareleiden asetusten määrittäminen eli konfigurointi IEC 61850 -standardin mukaisesti. Toisena aiheena pohditaan käyttöönotto- ja kausikoestuksien vaikutuksia suojareleiden konfigurointiin ja esitetään ratkaisumalli kausikoestuksessa ilmeneviin haasteisiin.

### 4.1 IEC 61850 -standardin mukainen konfigurointiprosessi

IED-pohjaisille suojareleille täytyy tehdä asetukset, mitä toimintoja kyseinen suojarele suorittaa suojausjärjestelmässä. IED-pohjaiset suojareleet sisältävät yleensä monia eri suojaustoimintoja, joista jokaisesta täytyy luoda toiminnallinen kuvaus, esimerkiksi yhdessä suoja-releessä voi olla suojaukset suunnatulle ja suuntaamattomalle ylivirrälle ja maasululle. Lisäksi voi olla suojauksia ylijännitteelle, alijännitteelle, alitaajuudelle sekä ylitaajuudelle. Suojausjärjestelmät ovat hyvin pitkälti sähköasemakohtaisia, joten eri valmistajien IED-laitteet ovat synnyttäneet tarpeita yhdenmukaiseen konfigurointityyliin. Lisäksi tarkoituksena on saada liitettyä yksittäisiä konfigurointeja toimivasti järjestelmätason konfiguraatioon. Tämän vuoksi IEC 61850 -standardi on luonut sähköaseman konfiguraation kuvauskielen eli SCL:n (Substation Configuration Description Language). SCL-kieli pohjautuu XML-kielen (Extensible Markup Language), jonka avulla siis saadaan kuvannettua koko sähköaseman järjestelmä mahdollisimman yksiselitteisesti ja standardoidusti (Lim & Sidhu, 2013). Kuvassa 4.1 näkyy konfigurointiprosessi sekä SCL-tiedostoilla tehtävä tiedonsiirto.



Kuva 4.1 Sähköaseman konfigurointiprosessi IEC 61850 standardin mukaisesti. (Lim & Sidhu, 2013)

SCL-konfigurointikielessä käytetään eri tiedostotyyppisiä, joilla kuvataan sähköaseman eri järjestelmän osia. Tiedostotyypeillä on tarkoituksena hajauttaa konfiguraatiovaiheet, jolloin eri valmistajien suunnittelu- ja konfiguraatio työkalut toimivat helpommin yhteen. SCL-suunnittelu määritetään luomalla SCD-tiedosto (Substation Configuration Description), joka on tekstipohjainen ja sisältää täydelliset tiedot sähköasemasta. Järjestelmän konfigurointityökalu (System Configurator) muodostaa SCD-tiedoston saatuaan kolmen tyyppisiä tiedostoja, jotka ovat ICD (IED Capabilities Description), SSD (System Specification Description) ja SED (System Exchange Description). ICD-tiedostot sisältävät tietoja muun muassa loogisista laitteista, loogisista solmuista sekä tunnistetiedot GOOSEsta ja SV:stä. SSD-tiedosto sisältää myös tietoja loogisista solmuista ja kertoo sähköaseman rakenteesta. SED-tiedoston tarkoituksena on välittää tietoja eri projektien välillä. Järjestelmän konfigurointityökalulla lähetetään SCD-tiedoston IED-laitteen konfigurointityökalulle (IED Configurator), jolla luodaan CID (Configured IED Description) -tiedosto jokaiselle IED-laitteelle yksilöidysti. CID-tiedosto sisältää yksityiskohtaiset tiedot IED-laitteen roolista suojausjärjestelmässä. (Lim & Sidhu, 2013) Kuvassa 4.1 näkyvän IID (Instantiated IED Description) -tiedostolla

välitetään yhden IED-laitteen tietoa IED-laitteen konfiguraatiotyökalun ja järjestelmän konfiguraatiotyökalun välillä. Tällä mahdollistetaan esimerkiksi IED-laitteen konfiguroitujen arvojen päivitys (Lim & Sidhu, 2013).

Järjestelmän konfigurointityökalu ja IED-laitteen konfigurointityökalu voivat olla integroituna samaan ohjelmaan. Nämä ohjelmat ovat yleensä suojarulevalmistajakohtaisia. Esimerkiksi JaTessa ABB:n suojaruleet konfiguroidaan ABB:n omalla PCM600 -konfigurointiohjelmalla. Kyseisessä ohjelmassa järjestelmän konfigurointityökalu ja IED-laitteen konfigurointityökalu ovat integroitua samaan ohjelmaan.

IED-laitteen konfiguroinnin näkökulmasta konfigurointiprosessissa ei ole eroa siinä, että onko suojausjärjestelmä toteutettu analogisella horisontaalisella viestinnällä, vai IEC 61850 -standardin mukaisilla horisontaalisilla kommunikaatioprotokollilla. Kommunikaatiossa IEC 61850 -standardia käyttävien IED-laitteiden konfiguroinnissa ohjauslohkojen määrä vain on suurempi, kun täytyy määrittellä SV- ja GOOSE-kommunikaatioprotokollien toiminnallisuudet.

#### 4.2 Käyttöönotto- ja kausikoestuksen vaikutukset suojaruleiden konfigurointiin

Suojareleiden konfiguroinnissa ei tarvitse ottaa käyttöönotto-koestuksia samalla tavalla huomioon, kuin kausikoestuksia. Käyttöönotto-koestuksessa sähköasemaa ei ole kytketty muuhun verkkoon, jolloin koestukset voidaan suorittaa aivan normaalisti koestuslaitteiden avulla. Kausikoestuksessa sähköasemaa voidaan harvemmin irrottaa muusta verkosta tai laittaa kokonaan sähköttömäksi. Näin ollen kausikoestukset sisältävät riskejä, että koestukset voivat vaikuttaa myös muihin verkon osiin.

Kausikoestuksen näkökulmasta konfiguroinnilla voidaan ehkäistä tarve asettaa suojarule luvussa 3.6 esitelyihin testi- tai simulaatiotiloihin. Kausikoestuksen näkökulma kannattaa näin ollen huomioida heti alusta lähtien, kun uusille sähköasemille suunnittelee ja rakentaa konfigurointeja. Käytössä olevalle sähköasemalle ladataan harvoin täysin uusia konfigurointeja suojaruleille. Uusien konfigurointien lataus lisää riskiä sähköaseman suojausten toimivuuteen. (Jaakkola, 2022) Konfiguroija ei välttämättä huomaa ottaa huomioon, mihin

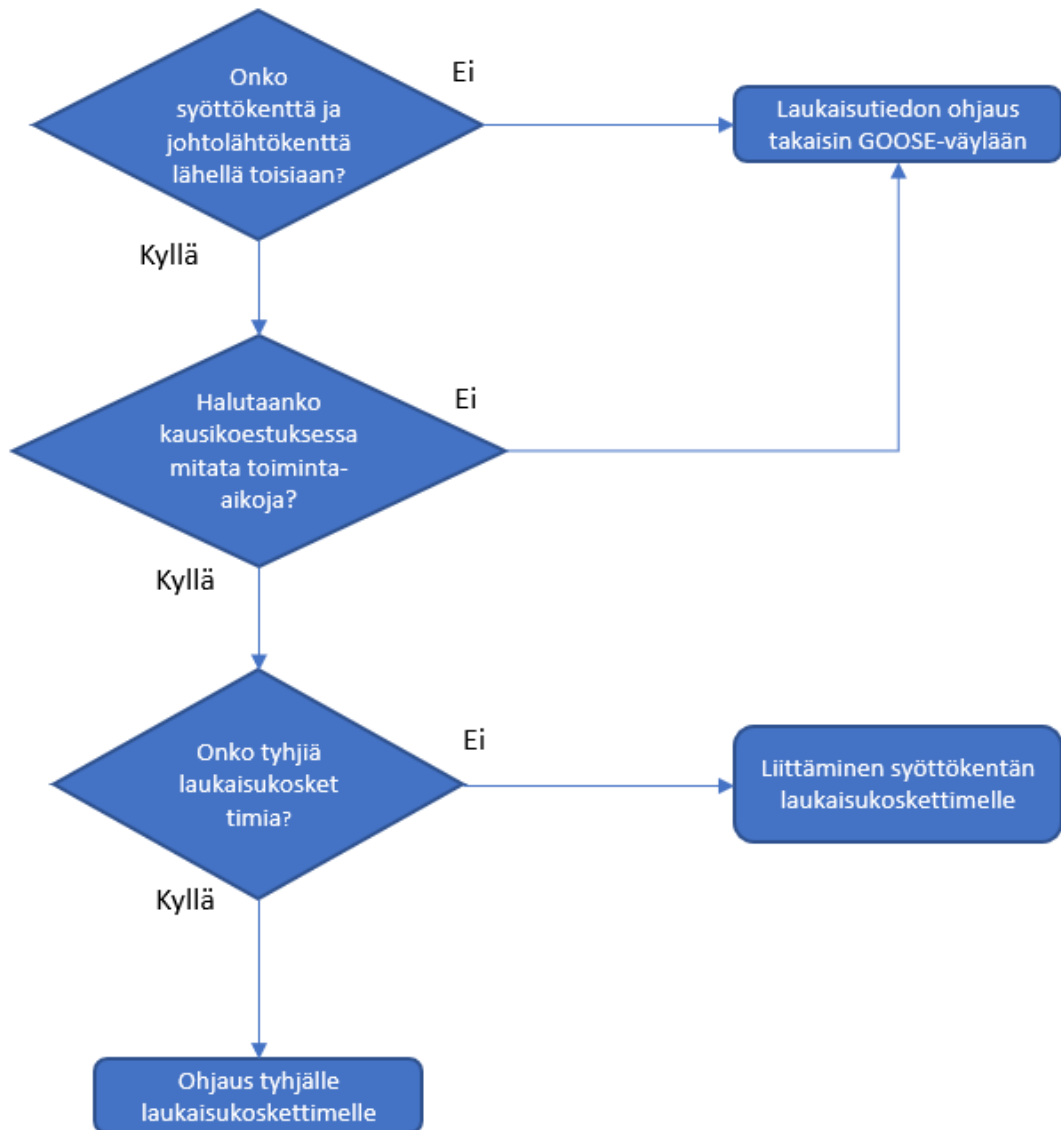
kaikkeen eri suojaukset vaikuttavat. Yleensä käytössä olevalle sähköasemalle tehdäänkin vain uusien toiminnallisuuksien lisäyksiä tai uusien suojien käyttöönottoa. Kuten aikaisemmin on jo mainittu, niin käytössä olevan sähköaseman koestaminen on haastavaa silloin, kun sähköasema on toiminnassa ja käytössä on väyläteknologiaa. Esimerkkinä haastavuudesta voidaan ottaa syöttökatkaisijan vikasuojan toiminnan varmistaminen syöttökentässä, jos ylivirran havainneen johtolähtökentän oma katkaisija ei jostain syystä toimi. Koestuksessa täytyy saada todettua, että johtolähtökentästä lähtee väylään GOOSE-viesti katkaisijan vikasuojalaukaisukäskystä ja syöttökenttä vastaanottaa kyseisen viestin, jonka jälkeen syöttökatkaisija laukeaa. Syöttökatkaisija ei saa laueta oikeasti kojeiston ollessa käytössä, koska muuten kyseinen kojeisto menee sähköttömäksi kokonaan.

Sähköasemilla, joissa on käytössä väylälaukaisuja, voidaan suojareleiden konfiguraatioon rakentaa logiikkaa, jolla voidaan joko blokata lähtevä GOOSE-laukaisu tai estää tuleva GOOSE-laukaisu. Tässä tapauksessa järkevintä on estää tuleva GOOSE-laukaisu, jolloin voidaan todeta johtolähtökentän suojareleen, väylän ja syöttökentän suojareleen oikeat toiminnot. Näin ollen logiikkaan lisätään toiminto, joka ohjaa tulevan katkaisijan vikasuojalaukaisukäskyn syöttökentän tyhjälle laukaisukoskettimelle, jonka ulostulo sijaitsee suojareleen takapaneelissa. Tämän kautta voidaan todeta katkaisijan toiminta. Jos ei ole tyhjää laukaisukosketinta niin laukaisutieto voidaan ohjata takaisin GOOSE-väylään, josta voidaan poimia tieto, että laukaisukäsky on mennyt perille. Eräänä vaihtoehtona olisi myös syöttökentän laukaisukoskettimien avaus, johon katkaisijan vikasuojalaukaisu normaalitilanteessa tulisi. Näihin syöttökentän laukaisukoskettimiin pystyisi näin ollen kytkemään koestuslaitteen, jos muita laukaisukoskettimia ei ole tyhjillään. Huomioitavana asiana näiden syöttökentän laukaisukoskettimien käytössä on, että näihin koskettimiin tulee myös muita laukaisukäskyjä. Näin ollen muutkin laukaisukäskyt ovat poissa käytöstä, kun testataan katkaisijan vikasuojalaukaisukäskyn toimintaa. Tämä on kuitenkin pieni riski, koska yleensä koestusaika on lyhyt ja syöttökenttää koestaessa laukaisukoskettimet joudutaan kuitenkin avaamaan.

Todellisen toiminta-ajan saamiseksi täytyy laukaisukäsky saada todennettua laukaisukoskettimelta, koska silloin toiminta-aika koostuisi väylästä, logiikasta ja laukaisukoskettimesta. Jos laukaisun vastaanotto ohjataan vain takaisin väylään, niin silloin jää laukaisukoskettimen toiminta-aika kokonaan pois. Toisaalta käyttöönottokoestuksessa testataan laukaisun toiminta-ajat, joten periaatteessa kausikoestuksessa niitä ei tarvitse mitata. Riittää, että todetaan

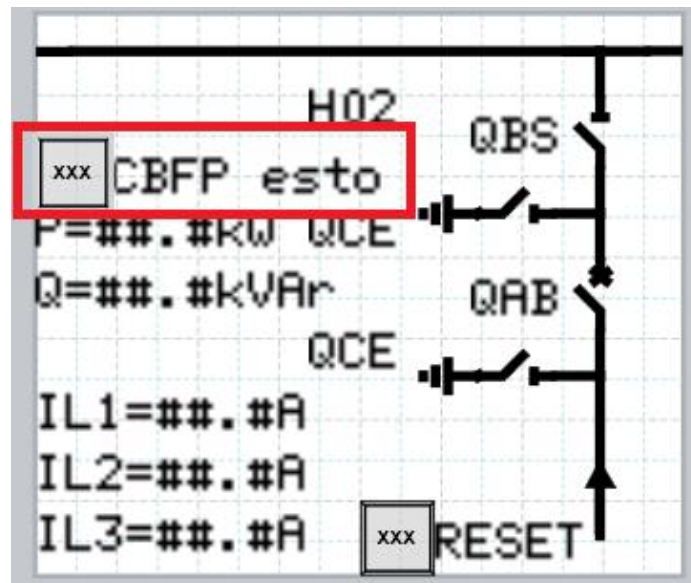
väylän toiminta. Tietenkin tämäkin asia riippuu osaltaan myös asiakkaista, joten mahdollisuus todellisen toiminta-ajan selvittämiseksi olisi hyvä olla olemassa. Pelkän väylän testaus olisi yksinkertaisempaa ja nopeampaa, kun ei tarvitsisi johdottaa laukaisukoskettimia vaan tiedon saisi havaittua väylästä suoraan.

Sähköaseman konfiguroinnin suunnittelussa olisi hyvä ottaa huomioon myös syöttö- ja johtolähtökentän etäisyys toisistaan. Jos johtolähtökenttä ja syöttökenttä ovat lähellä toisiaan niin silloin koestuslaitteelle pystyisi johdottamaan tarvittavat tiedot syöttö- ja johtolähtökentästä, jolloin esimerkiksi katkaisijan vikasuojalaukaisukäskyn konfigurointi tyhjälle koskettimelle voisi olla hyvä vaihtoehto. Jos taas esimerkiksi sähköasema olisi rakennettu siten, että 20 kV:n syöttökatkaisijan vikasuojalaukaisukäsky lähetetään vielä 110 kV:n syöttökenttään niin silloin 110 kV:n syöttökentän suojarele saattaisi sijaita toisella puolella sähköasemarakennusta tai jopa erillisessä rakennuksessa. Tässä tapauksessa johdottaminen ei olisi kovin yksinkertaista. Näin ollen on helpompi konfiguroida laukaisutieto takaisin väylään GOOSE-viestillä, josta saadaan koestuslaitteella havaittua, että laukaisu on mennyt perille. Kuvassa 4.2 vuokaavio, joka koostaa edellisten kappaleiden pohdinnat konfiguroinnin toteuttamiseksi katkaisijan vikasuojalaukaisukäskyn tapauksessa kausikoestuksen näkökulmasta.



Kuva 4.2. Katkaisijan vikasuojalaukaisukäskyn konfigurointi kausikoestuksen näkökulmasta.

Väylästä tuleva GOOSE-laukaisun esto voidaan käytännössä toteuttaa esimerkiksi suojareleen mimiikkaan lisätyllä ”napilla”, jota painamalla estologiikka aktivoituu. Kuvassa 4.3 havainnollistetaan releen mimiikassa näkyvä digitaalinen painonappi, jolla aktivoidaan syöttökatkaisijan estologiikka.



Kuva 4.3. Suojareleen mimiikkaan lisättävä syöttökatkaisijan estologiikan painonappi, joka toteutettu JaTen sisäisen ohjeistuksen avulla.

Logiikan rakentamisessa hyödynnetään AND- ja OR-lohkoja. Lisäksi tehdään myös toiminta, jonka avulla saadaan väylästä todettua toisen portaan ylivirtalukituksen signaali, joka aktivoituu johtolähtökentästä sen havaittua ylivirtaa ja lähtee väylän kautta syöttökenttään GOOSE-viestinä. Tästä ei aktivoidu mikään kosketin, joten sen toimiminen täytyy todeta väylän kautta.

## 5 Projektikohteen käytännönkoestukset

Tässä luvussa toteutetaan aiempien lukujen käsiteltävät aiheet käytännössä. Toisessa luvussa esitellyt käyttöönottokeustusmenetelmät osittain digitalisoidulle sähköasemalle sekä kolmannessa luvussa esitellyt GOOSE- ja SV-kommunikaatioprotokollien koestukset toteutetaan suurehkolle muuntamolle, joka sisältää viisi 20/0.4 kV:n jakelumuuntajaa.

### 5.1 Projektikohde

Muuntamolle tulee 20 kV:n syöttö jakeluverkosta ABB:n valmistamalle UniSec-kojeistolle. Kojeisto on siis rakennekokonaisuus, josta löytyy esimerkiksi muuntamolla tarvittavat kytkentä-, suojaus-, ohjaus-, ja valvontalaitteet (Elovaara & Haarla, 2011). UniSec-kojeisto on ilmaeristeinen moduulikojeisto, jonka kenttävalikoiman voi rakentaa omiin tarpeisiin sopivaksi. Kuvassa 5.1 projektikohteen ABB:n UniSec-kojeisto.



Kuva 5.1. Projektikohteen UniSec-kojeisto.

Diplomityöhön liittyvän muuntamon kojeisto rakentuu seuraavalla tavalla:

- H01 – Mittauskenttä
- H02 ja H03 Syöttökenttiä,
- H04 Varasyöttökenttä
- H05-H10 johtolähtökenttiä eli syöttävät 20/0,4kV jakelumuuntajaa

Mittauskenttä mittaa jakeluverkon 20 kV:n syöttöjännitettä ja se jaetaan SV-kommunikaatioprotokollan avulla kaikkien kenttien suojareleille. Suojareleenä mittauskentässä toimii ABB:n REU615 suojarele, jossa suojaustoimintona ovat:

- Maasulkusuojaus
- Kolmivaiheinen ylijännitesuojaus
- Kolmivaiheinen alijännitesuojaus

Syöttökentissä ovat ABB:n RED615 ja REF615 suojareleet. RED615 suojarele toimii differentiaalisuojana H03 ja H04 kentän suojareleissä ja REF615:ssa ovat muut suojaustoiminnat, jotka vaihtelevat syöttökentän mukaan seuraavalla tavalla:

- H02 syöttökenttä
  - Kolmivaiheinen termisen ylikuormituksen suojaus syöttökaapeleille
  - Kolmivaiheinen ylivirtasuojaus, ylempi porras
- H03 syöttökenttä
  - Kolmivaiheinen suunnattu ylivirtasuojaus, alempi porras
  - Kolmivaiheinen suunnattu ylivirtasuojaus, ylempi porras
  - Kolmivaiheinen ylivirtasuojaus, alempi porras
  - Kolmivaiheinen ylivirtasuojaus, ylempi porras
  - Kolmivaiheinen termisen ylikuormituksen suojaus syöttökaapeleille
- H04 syöttökenttä
  - Kolmivaiheinen suunnattu ylivirtasuojaus, alempi porras
  - Kolmivaiheinen suunnattu ylivirtasuojaus, ylempi porras
  - Kolmivaiheinen termisen ylikuormituksen suojaus syöttökaapeleille

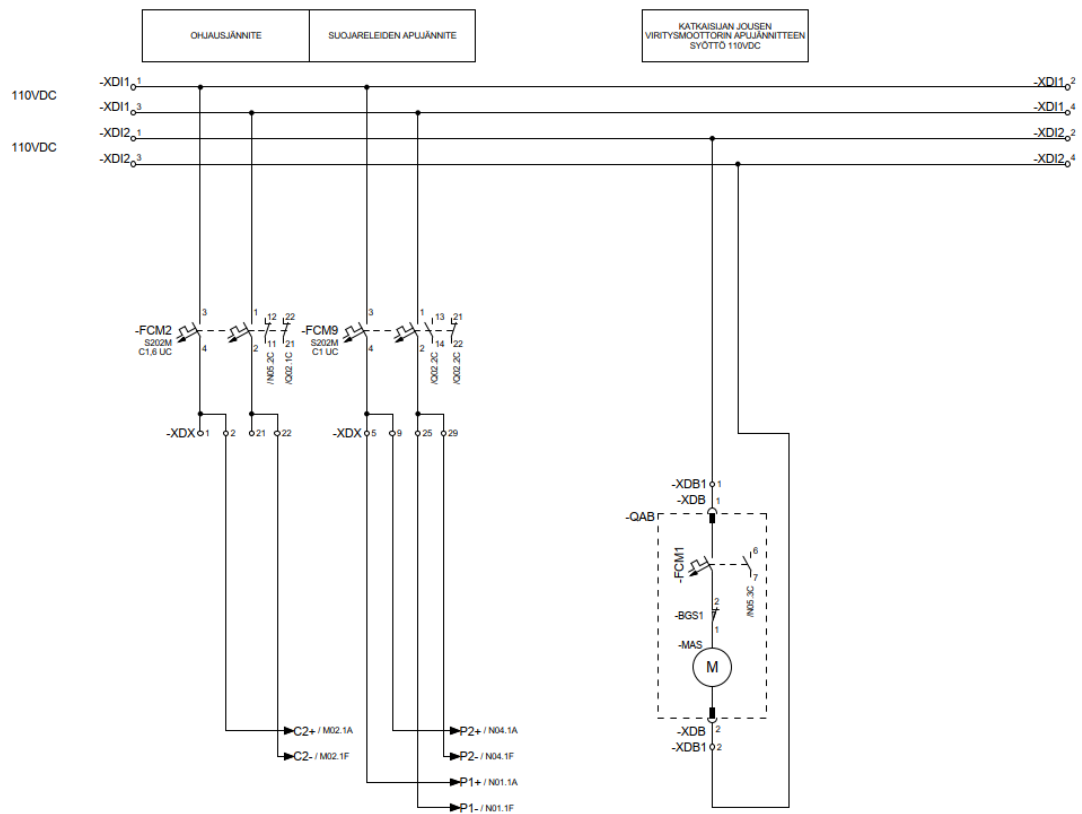
Johtolähtökentissä suojareleenä ovat ABB:n REF615 suojareleet, joiden suojaustoimintoina ovat:

- Suunnattu ylivirtasuojaus

- Suunnattu maasulkusuojaus
- Katkaisijan vikasuojaus
- Kolmivaiheinen termisen ylikuormituksen suojaus kaapeleille ja muuntajille

## 5.2 Koestuksien toteutusjärjestys projektikohteessa

Käytännön koestukset kohteessa aloitettiin käymällä läpi KJ-kojeiston johdotuksien ja piirikaaviokuvien yhdenmukaisuus. Käytännössä tämä tapahtui toteamalla Fluke 289 -yleismitarilla, että virta kulkee aloituspisteestä loppupisteeseen. Tämä piirikoestus suoritettiin KJ-kojeistosta kenttä kerrallaan. Piirikoestuksen jälkeen koestettiin jännite- ja virtamuuntajat kenttä kerrallaan. Tässä kohteessa mittauskentän kautta syötetään jännitetieto muille kentille, joten jännitemuuntajia ei ole muissa kentissä. Mittauskentän jännitemuuntaja koestettiin syöttämällä jännitemuuntajan ensiöpuolelle 2 kV:n (CPC 100 maksimi syöttöjännite) jännite OMICRONin CPC 100 koestuslaitteella ja tarkastettiin toisiopuolen jännitearvo. Tämän jälkeen varmistettiin, että muuntosuhde näyttää samaa, kuin jännitemuuntajan kilpiarvoissa näkyvä. Virtamuuntajat koestettiin samalla tavalla, eli syötettiin ensiöpuolelle 300 A virta ja tarkastettiin toisiopuolen virta-arvo, jota taas verrattiin virtamuuntajassa olevaan kilpiarvoon. Virtamuuntajista mitattiin myös käämien ominaisvastukset. Käämien ominaisvastusmittauksella varmistettiin käämien eheydet. Jännite- ja virtamuuntajakoestuksien jälkeen kytkettiin kiertokaapelointiin sähkö, jolloin jokaisessa kentässä on valmius apusähköön, jota suojareleet tarvitsevat toimiakseen. Apusähkö otettiin kenttä kerrallaan käyttöön, joka käytännössä tarkoitti sitä, että suljettiin kentästä kiertokaapeloinnin johdonsuojakatkaisija. Jokaisessa kentässä tarkistettiin vielä, että johdonsuojakatkaisijan sulkeuduttua sähkö kulkeutuu piirikaavion mukaisiin paikkoihin. Kuvassa 5.2 näkyy akustolta tuleva 110 V tasa-jännitteen syöttö kiertokaapelointiin ja se, kuinka kiertokaapelointi on yhdistetty eri kenttiin.



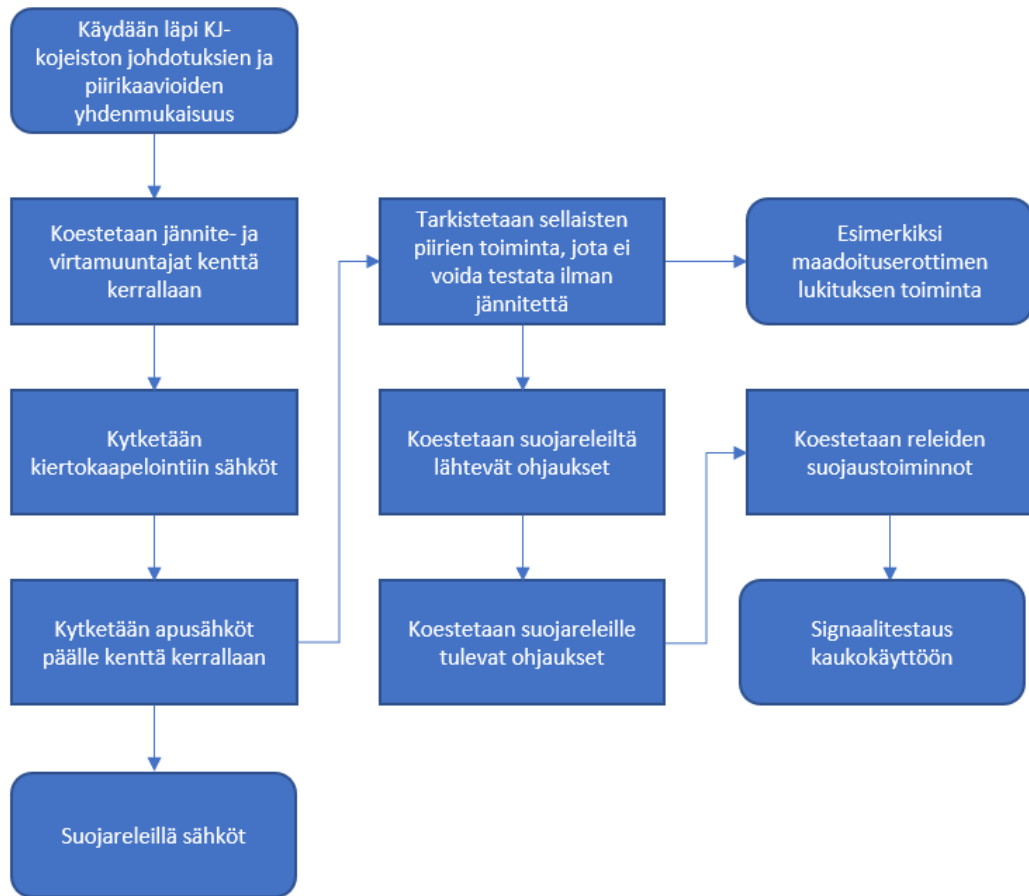
Kuva 5.2. Akusto syöttää 110 V:n tasajännitettä kiertokaapeloinnin kautta mm. suojarelleille.

Tämän jälkeen tarkistettiin sellaisten piirien toiminta, joita ei voitu aiemmin testata jännitteettömyyden vuoksi. Esimerkiksi maadoituserottimen lukituksen toimintaa ei voida ohjata, ellei lukituskelalle tule sähköä. Lukituspiirille on oma johdonsuojakatkaisija, jota kautta apusähkö tulee.

Näiden jälkeen siirryttiin koestamaan suojarelleiltä lähtevät ohjaukset, johon kuuluvat muun muassa katkaisijan kiinni- ja aukiohjaukset. Nämä releeltä lähtevät ohjaukset testataan releen omasta mimiikasta. Tämän jälkeen koestettiin suojarelleille tulevat ohjaukset eli binäärisisääntulot. Esimerkiksi muuntajan yllilämpö-laukaisun tulo testattiin laittamalla muuntajalähdön katkaisija kiinni, jonka jälkeen vedätettiin lämpöreleen kosketin kiinni. Yllilämpölaularkaisun toimiessa oikein katkaisija aukeaa, joka myös tapahtui. Lämpöreleessä on testitila, jolla saatiin laukaisukosketin kiinni. Koestuksessa lämpötila anturi korvattiin säädettävällä vastuksella, jota säätämällä saatiin hälytysrajat ja laukaisurajat varmistettua.

Suojareleiltä lähtevien ja suojareille tulevien ohjausten koestuksien jälkeen suoritettiin varsinainen relekoestus. Koestettavat suojaustoiminnot ovat lueteltu luvun 5 alussa. Käyttöönotto-koestuksessa suojareiden suojauksien koestuksissa käytettiin OMICRON CMC 356 -koestuslaitetta ja siihen kuuluvaa Test Universe -ohjelmistoa. Koestukseen uutena lisäyksenä tuli Test Universen puolelle GOOSE- ja SV Configuration -ohjelmien hyödyntäminen koestuksessa. Näiden ohjelmien avulla saatiin todettua myös Ethernet-kaapeloinnilla toteutetun suojareiden välisen IEC 61850 -standardipohjaisen kommunikoinnin toimivuus.

Lopuksi suoritettiin signaalitestausta kaukokäyttöön. Signaalitestausta sitoo kaukokäytössä henkilön kokoaikaisesti, joten tämä on järkevintä suorittaa vasta, kun on saatu koestettua kaikkien suojaustoimintojen oikea toiminta. Koestustoimenpiteen jälkeen varmistettiin, että siitä lähtee signaali kaukokäyttöön. Signaalitestauksessa ehditään päivän aikana testaamaan 3–4 kenttää. Signaalitestausten jälkeen muuntamo on käyttöönotettavissa. Tyypillisiä signaaleja, jotka testataan ovat tilatiedot, ohjaukset, mittaukset ja hälytykset. Kuvassa 5.3 on tiivistetysti tämän muuntamokoestuksen eri vaiheet.



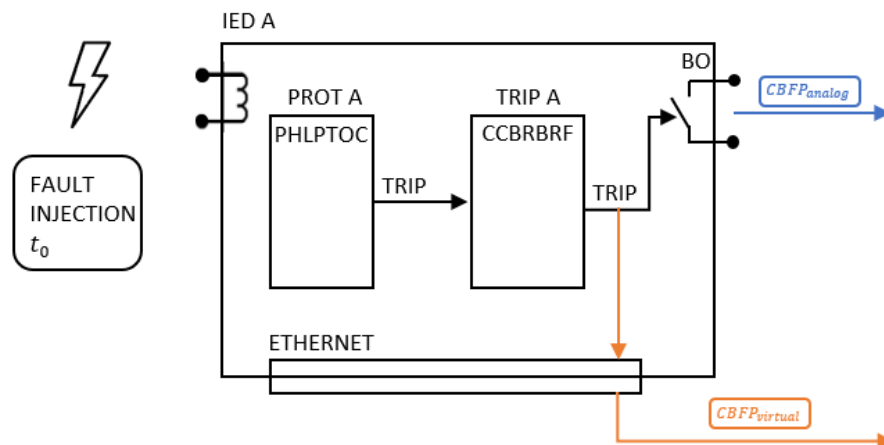
Kuva 5.3. Projektikohteen koestukset vaiheittain.

### 5.3 GOOSE Configuration -ohjelman testaus ja toiminta-aikojen vertailu

Lisäksi kohteessa testattiin GOOSE Configuration -ohjelman toimintaa sekä ohjelmalle tehdyn JaTen sisäisen käyttöohjeen ymmärrettävyys. GOOSE Configuration -ohjelmaa apuna käyttäen testattiin syöttökatkaisijan vikasuojan toiminta, sekä verrattiin toiminta-aikoja GOOSE-viestin ja kuparikaapeloinnin analogisignaalin välillä. Syöttökatkaisijan vikasuojan toiminta testattiin siten, että syötettiin syöttökentän suojareleelle koestuslaitteella analogista vikavirtaa niin kauan, että mittauskentän katkaisija toimi. Koestuksella simuloitiin sitä tilannetta, että syöttökentässä tapahtuu vika ja syöttökentän oma katkaisija ei toimi, jolloin syöttökentän releeltä lähtee laukaisukäske mittauskentän katkaisijalle. GOOSE Configuration -ohjelman avulla poimittiin väylästä tieto, milloin johtolähtökentän releeltä lähti katkaisukäske mittauskentän suojareleelle. Releen laukaisukäskyn aika tuotiin raportille näkyväksi.

Tässä koestuksessa hyödynnettiin GOOSE Configuration -ohjelmalle luotua JaTen sisäistä ohjeistusta, joka todettiin hyödylliseksi. Varsinkin jatkossa tästä sisäisestä ohjeistuksesta on hyötyä JaTen kojeistajille, jos ohjelman käyttöön tulee pidempi tauko.

Toiminta-aikojen vertailussa hyödynnettiin luvussa 3.5 käsiteltyjä kytkentöjä, mutta sillä erotuksella, että kuparikaapelointia ei vedetty johtolähtökentän suojuareleesta mittauskentän suojuareleeseen. Kuparikaapelointia ei vedetty sen vuoksi, koska mittauskentän suojuareleessä ei ollut vapaita tuloja. Lisäksi aikarajoitusten vuoksi ei ollut aikaa alkaa konfiguroimaan suojuareleitä uudestaan pelkkiä testauksia varten. GOOSE-viestin kulkema toiminta-aika saatiin kokonaisuudessaan mitattua, mutta kuparikaapeloinnin osalta saatiin vain mitattua kokonaisu-aika, joka kestää suojuareleen suojualohkolta kulkeutua mahdolliselle kuparijohtimelle. Kuvassa 5.4 havainnollistettu lähtökentän suojuarele, jonka toiminta-aikoja verrattiin.



Kuva 5.4 Lähtökentän suojuarele, josta GOOSE-viestin ja analogisignaalin toiminta-aikoja verrattiin.

Kuvassa 5.4  $CBF_{analog}$  on aika, joka suojuareleen lohkoilla kestää prosessoida tieto koskettimelle, joka lähettäisi laukaisukäskyn kuparikaapelointia pitkin.  $CBF_{virtual}$  on aika, joka suojuareleen lohkoilla kestää prosessoida tieto väylään GOOSE-signaalina. Näissä vertailuajoissa on otettu huomioon vain johtolähtökentän suojuareleen toiminta-ajat. Toiminta-aikamittaukset suoritettiin viisi kertaa ja näistä tulokset näkyvät taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1. Toiminta-aika mittaukset, jossa verrataan GOOSE- ja analogisignaalia.

Lähettävä suojarole			
mittaus [krt]	CBFP_analog [ms]	CBFP_virtual [ms]	ero %
1	117	110	6.0
2	117	110	6.0
3	118	111	5.9
4	117	110	6.0
5	117	110	6.0

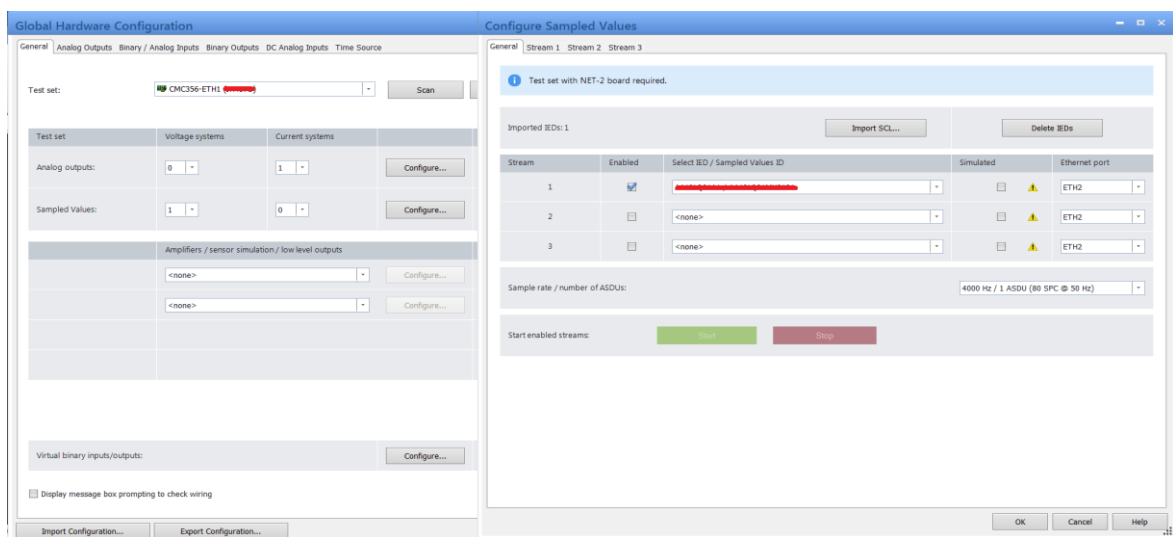
Taulukosta 5.1 voidaan huomata, että releen toiminta-ajat ovat samat, joka mittauksella lukuun ottamatta kolmatta mittausta, joka eroaa 1 ms muista mittauksista. Lisäksi taulukosta 5.1 voidaan huomata, että  $CBFP_{virtual}$  on 7 ms nopeampi, kuin  $CBFP_{analog}$  lähettävässä releessä. Muutamana millisekunnin erolla ei ole suurta merkitystä, mutta GOOSE-viesti toimii lähempänä pyydettyä aikaa, kun asettelu on 100ms. Toki otanta on pieni, mutta antaa hyviä suuntaviivoja toiminta-ajoista. Lisää eroa tulee myös vastaanottavan releen päässä, koska kuparikaapelin analogisignaali menee releen sisääntulokoskettimelle, jossa on fyysinen toiminta-aika. GOOSE-viesti taas menee suoraan releen toimintalohkolle, joten siinä ei tätä viivettä tule.

Toiminta-aikojen vertailusta voidaan myös päätellä, että IEC 61850 -standardiin pohjautuva sähköasema on ainakin näiden toiminta-aikojen osalta yhtä turvallinen, kuin perinteinen kuparikaapeloinnin rakennettu sähköasema. Luvussa 2.3 todettiin, että perinteisillä sähköasemilla kuparikaapelointiaste on huomattava muun muassa sen takia, koska kaikki suojattavien kohteiden virtamuuntajien toisiopiiri on kytketty suoraan suojaroleen liittimille. Tätä kuparikaapelointiastetta saadaan vähennettyä tuomalla IEC 61850 -standardin mukaiset ratkaisut, jotka ovat toiminta-ajoiltaan nopeampia. Eli toisin sanoen, vaikka kuparikaapelointiaste on pienempi, niin saadaan yhtä turvalliset suojausjärjestelmät sähköasemalla. Lisäksi GOOSE-protokolla lisää oikea-aikaista toimintavarmuutta, eli toiminta-ajat voidaan asettaa paremmin aikaselektiivisesti. Parempi aikaselektiivisyys pienentää riskejä turhiin syöttökatkaisijan laukaisuihin, kun johtolähtökentän omalla laukaisijalla on enemmän aikaa reagoida vikavirtaan. Toki koestamalla on mahdollista kuparikaapeloidussa sähköasemassa asettaa myös nopeammat toiminta-ajat, mutta se taas lisää riskiä aikaselektiivisyyteen (Jaakkola,

2022). Kuparikaapeloinnilla toteutettua ratkaisua ei voida loputtomiin nopeuttaa, koska tällöin tulee vastaan koko suojausjärjestelmän toiminta-ajat.

#### 5.4 SV Configuration -ohjelman testaus

Myös SV-Configuration -ohjelmaa ja tähän luotua sisäistä ohjeistusta testattiin käytännötasolla. JaTelle luodun sisäisen ohjeistuksen avulla ladattiin testausohjelmaan koestettavan kohteen SCD-tiedosto, jonka jälkeen määritettiin tarvittavat parametrit, jotta haluttuun releeseen saatiin syötettyä digitaalista jännitettä. Ohjelman toimivuus todettiin releen näytöstä, joka näytti koestuslaitteesta syötettävän digitaalisen jännitteen todellisena. SV Configuration -ohjelman avulla koestettiin yhden johtolähtökentän suojausreleen maasulkusuojauksen toiminta syöttämällä digitaalista nollijännitettä ja toteamalla, että rele ilmoitti suunnatun maasulkusuojauksen toimineen. Kuvassa 5.5 näkyy OMICRONin Hardware Configuration -ohjelman pääsivu, jonka sisään on rakennettu SV Configuration -ohjelma.



Kuva 5.5. Global Hardware Configuration -ohjelma, jonka sisällä määritellään parametrejä SV Configuration -ohjelmaan.

Kuvan 5.5 vasemmalla puolella näkyy Hardware Configuration -ohjelman pääsivu, jossa määritellään koestusohjelmaan analogi- ja digitaalilähdöt. Oikeassa reunassa näkyy SV Configuration -ohjelman sivu, jossa määritellään tarkemmat parametrit koskien digitaalisen

jännitteen syöttöä. Esimerkiksi kuvassa näkyvältä sivulta valitaan koestuslaitteen Ethernet -portti, josta digitaalista jännitettä lähetetään.

Digitaalisen jännitteen lähetys onnistui SV Configuration -ohjelman avulla, joten tällä voitiin todeta myös sisäisen ohjeistuksen toimivuus. Ohjeistuksen todettiin myös nopeuttavan koestajia ohjelman käytössä, kun tietävät oikean toimintajärjestyksen.

## 6 Johtopäätökset

Taulukossa 6.1 näkyvät neljän aihekokonaisuuden tavoitteet ja johtopäätökset tiivistetysti. Ensimmäisen aihekokonaisuuden tavoitteena oli tarkastella koestuksien toteutustapoja nykypäivän sähköasemilla ja tarkastella muuttuvatko koestustavat tulevaisuudessa. Johtopäätöksinä saatiin, että nykypäivän sähköasemilla koestusmenetelmät ovat vakiintuneet, jolloin koestustapoihin ei ole tulossa muutoksia. Tulevaisuuden sähköasemien tarkastelun tuloksena saatiin, että digitaalisten suojauslaitteiden itsevalvontaominaisuudet lisääntyvät, jolloin kausikoestusten välit pitenevät. Lisäksi tulevaisuuden digitaalisilla sähköasemilla koestustavat voivat erota perinteisistä tavoista etäkoestusmahdollisuuden myötä. Etäkoestusmahdollisuus luo kuitenkin tarpeen korkealle tietoturvalle sähköasemilla. Ensimmäisessä aihekokonaisuudessa käsiteltiin myös markkinoilla olevia toisiokoestuslaitteita ja -ohjelmia sekä tehtiin katsaus yrityksen omaan koestuslaitteekantaan. Tavoitteena oli kartoittaa, onko JaTen oma toisiokoestuslaite kilpailukykyinen vielä markkinoilla olevien toisilaitteiden kanssa. Samalla tarkastettiin, että JaTen oma koestuslaitteekanta on vielä ajan tasalla ja tulevaisuuden näkökulmasta käyttökelpoinen. Markkinoilla olevista toisiokoestuslaitteista vertailussa olivat Doble F6150SV, Manta MTS-5100, Megger SMRT 410 ja JaTella oleva OMICRON CMC 356. Johtopäätöksinä toisiokoestuslaitteiden vertailusta havaittiin, että koestuslaitteissa olevat ominaisuudet ovat toistensa suhteen hyvin samantasoiset. Erot ilmenevät lähinnä harvinaisempien sähkömekaanisien releiden osalta, joissa vaaditaan koestuslaitteelta suuresti tehoa (VA) laukaisun aikaansaamiseksi. Koestuslaitteiden ohjelmien käyttöliittymät ovat erilaisia, mutta niistä löytyvät samat perustoiminnallisuudet. Perustoiminnallisuuksia ovat muun muassa manuaaliset ja automaattiset koestustilat, virtojen ja jännitteiden osoitinkuviot, distanssireleiden asettelukuviot sekä IEC 61850 -standardin koestusvalmiudet. Kokonaisuudessaan JaTen koestuslaitteet ovat vielä käyttökelpoisia niin nykypäivän kuin tulevaisuudenkin näkökulmasta. Ainoastaan koestuslaitteiden ohjelmien sisäisiin lisensseihin täytyy investoida, jotta saadaan esimerkiksi IEC 61850 -standardin mukaiset sähköasemat ratkaisut koestettua.

Toisen aihekokonaisuuden tavoitteena oli tutkia IEC 61850 -standardia sekä GOOSE- ja SV-kommunikaatioprotokollia. Tutkimuksen tuloksena saadaan paremmin selville IEC 61850 -

standardin vaikutus sähköasemiin ja niiden koestamisiin. Samalla tarkasteltiin järkeviä koestustapoja GOOSE- ja SV-kommunikaatioprotokollille sekä tutkittiin, voiko koestuksia toteuttaa omalla toisiokoestuslaitteella. Johtopäätöksenä saatiin, että GOOSE- ja SV-kommunikaatioprotokollien viestejä voidaan koestaa omalla toisiokoestuslaitteella. Näiden protokollien koestamisiin JaTen koestuslaitteeseen päivitettiin lisenssit OMICRONin GOOSE- ja SV Configuration -ohjelmille. Lisäksi toisen aihekokonaisuuden tarkastelun myötä havaittiin, kuinka tärkeää on tuntea GOOSE- ja SV-kommunikaatioprotokollien kehysrakenteen mahdollisten vikatapauksien ratkaisemiseksi. Hyvänä esimerkkinä tästä olivat suojuareiden MAC-osoitteiden ja APPID-tunnuksien yksilöiminen, jotta GOOSE- ja SV-viestit menevät oikein perille, eivätkä aiheuta ongelmia. Kommunikaatioprotokollien rakenteeseen liittyen on tärkeää myös yksilöidä kommunikaatioprotokollille omat verkon sisäiset VLAN ID:t, jotta verkossa kulkeutuvat viestit kulkeutuvat vain halutun verkon sisällä. Toisen aihekokonaisuuden lopuksi kerrottiin aikasynkronoinnin merkityksestä ja sen huomioon ottamisesta. Sähköasemilla pitää olla riittävän tarkat aikasignaalit, jotta saadaan varmistettua kommunikaatioprotokollille oikeat toiminnallisuudet.

Kolmannen aihekokonaisuuden tavoitteena oli esitellä suojuareiden konfigurointiprosessi ja IEC 61850 -standardin määrittelemä SCL-kieli, jolla konfigurointiprosessi toteutetaan. Johtopäätöksinä konfigurointiprosessista saatiin, että IEC 61850 -standardin määrittelemä SCL-kieli helpottaa sähköasemajärjestelmän kuvantamista. Konfigurointiprosessiin liittyen toteutettiin syöttökatkaisijan laukaisukäskyn perillemenon havaitsemiseksi syöttökentän suojuareiden mimiikkaan painonappi. Painonapin avulla katkaisijan toiminta saadaan blokattua ja laukaisukäsky lähetettyä takaisin väylään päin, josta se voidaan poimia koestuslaitteelle. Syöttökatkaisijan laukaisukäskyn perillemenon havaitseminen ja katkaisijan toiminnan blokkauksesta tehtiin JaTelle sisäinen painonapin rakentamisohjeistus. Painonapin konfigurointi toteutettiin ABB:n PCM600 -ohjelmalla. Ratkaisumalli on helpompi toteuttaa rakennettavalle sähköasemalle kuin käytössä olevalle, koska käytössä olevalle sähköasemalle harvoin ladataan uusia konfiguraatioita kokonaan.

Neljäs aihekokonaisuus käsitteli projektikohteen, jossa toteutettiin aiemmissa aihekokonaisuuksissa käsitellyjä asioita käytännöntasolla. Projektikohde sisältää viisi 20/0.4 kV:n jakelumuntajaa ABB:n UniSec -malliston KJ-kojeistolla. Tavoitteena oli testata OMICRONin GOOSE- ja SV Configuration -ohjelmia sekä niille laadittuja JaTen sisäisiä

käyttöohjeistuksia. Lisäksi tarkoituksena oli testata kolmannessa aihekokonaisuudessa rakennetun painonapin toiminta syöttökentän suojareleessä.

Tällä projektikohteen muuntamalla testattiin tavoitteiden mukaisesti relekoestuksen osalta JaTelle uusia OMICRONin GOOSE- ja SV Configuration -ohjelmia. JaTen omalla toisiokeustuslaitteella kyettiin käyttöönottokeistuksessa havaitsemaan GOOSE-viestit väylästä, ja syöttämään SV Configuration -ohjelmalla digitaalista jännitettä suojareleille. Näihin ohjelmiin toteutettiin myös sisäinen ohjeistus yritykselle, jolloin näiden ohjelmien käyttö on myös jatkossa helpompaa ja nopeampaa. Johtopäätöksinä voidaan ohjelmien osalta todeta, että digitaalisten sähköasemien lisääntyessä näiden ohjelmien käyttö tulee vain kasvamaan. Lisäksi kyseiset ohjelmat helpottavat kausikoestuksia muun muassa jännitteen syötön osalta, kun voidaan vain yhdellä Ethernet-kaapelilla syöttää jännitteitä. Projektikohteen muuntamalla vertailtiin myös GOOSE-viestin ja kuparijohtimia pitkin kulkevan analogisignaalin toiminta-aikajonoja. Vertailussa todettiin GOOSE- viestin olevan nopeampi. Näin ollen johtopäätöksenä tästä voidaan todeta, että digitaaliset sähköasemat ovat toiminta-aikojen kannalta myös turvallisia, ja ne voidaan toteuttaa vähemmällä kuparijohdinmäärällä.

Painonappia ei voitu toteuttaa projektikohteen aikataulujen tullessa vastaan. Suojareleen miikkaan lisättävän painonapin rakentaminen on kuitenkin mahdollista toteuttaa seuraavilla samantyyppisillä projektikohteilla. Painonapin toteuttamiseen on nyt olemassa valmis sisäinen ohjeistus ja painonapin toimintaperiaate on käyty perusteellisesti läpi.

Taulukko 6.1. Neljän eri aihekokonaisuuden aiheet, tavoitteet ja johtopäätökset tiivistettynä.

<b>1. Aihekokonaisuus</b>	<b>Tavoitteet</b>	<b>Johtopäätökset</b>
Koestusten nykytila ja tulevaisuus	- Selvitys nykypäivän koestustavoista -Selvitys koestustapojen muutoksesta tulevaisuudessa	-Nykypäivän koestustavat vakiintuneet - Tulevaisuudessa suoja-alueiden itsevalvontaominaisuudet lisääntyvät, kausikoestusvälit pitenevät - Tulevaisuudessa etäkoestuksia
Markkinoilla olevien koestuslaitteiden ja -ohjelmien vertailu	- Kartoitus yrityksen toisiokoestuslaitteen kilpailukykyisyydestä markkinoilla oleviin laitteisiin verrattuna	- Markkinoilla olevat toisiokoestuslaitteet ja -ohjelmat toistensa kaltaisia - Koestuslaitteiden erot ilmenevät lähinnä harvinaisempien sähkömekaanisten suoja-alueiden koestuksessa - Yrityksen oma laite kilpailukykyinen
Yrityksen koestuslaittekannan tarkastelu tulevaisuuden näkökulmasta	- Kartoitus yrityksen koestuslaittekannan käytettävyydestä tulevaisuudessa	- Yrityksen koestuslaittekanta monipuolinen ja käyttökelpoinen pitkälle tulevaisuuteen - Koestuslaitteiden ohjelmiin tarvitsee investoida lisenssejä IEC 61850 -standardin mukaiseen koestamiseen
<b>2. Aihekokonaisuus</b>	<b>Tavoitteet</b>	<b>Johtopäätökset</b>
IEC 61850 -standardi yleisellä tasolla	-Esitellä IEC 61850 -standardi - Esitellä standardin mukainen sähköasematkaisu ja tietomalli	- IEC 61850 -standardin perusajatuksena on luoda sähköasemien laitevalmistajille yhteneväiset standardit kommunikointiin, konfigurointiin ja ylläpitoon - IEC 61850 -standardin käyttö lisääntyy merkittävästi tulevaisuuden sähköasemilla
Aikakriittiset GOOSE - ja SV-kommunikaatioprotokollat	- Tutkia kommunikaatioprotokollien toiminta ja rakenne	- Muun muassa vikatapausten selvittämiseksi hyvä tuntee kommunikaatioprotokollien rakenne
Eri käyttöönotto- ja kausikoestustapoja	- Selvitys, millä ohjelmalla GOOSE-viestit voidaan havaita väylästä -Selvitys, millä ohjelmalla hyödyntää SV-viestejä digitaalisen jännitteen syöttämiseksi - Luoda sisäinen ohjeistus ohjelmien käytölle	- OMICRONin GOOSE-Configuration -ohjelmalla voidaan havaita eri viestit väylästä - OMICRONin SV-Configuration -ohjelmalla voidaan syöttää digitaalista jännitettä -GOOSE- ja SV Configuration -ohjelmien sisäiset ohjeistukset ovat koestustyötä tukevia ja helpottavat koestajien työtä parametrejä määriteltäessä.

3. Aihekokonaisuus	Tavoitteet	Johtopäätökset
Suojareiden konfigurointiprosessi	- Esitellä IEC 61850 -standardin mukainen sähköaseman konfiguraation kuvauskieli SCL ja sen toimintaprosessi	- SCL-kieli helpottaa sähköasemajärjestelmän kuvantamista, koska se esitetään standardoidusti
Käyttöönotto- ja kausikoestuksen vaikutukset suojareiden konfigurointiin	- Esittää ratkaisumalli kausikoestuksen aiheuttamiin haasteisiin sähköasemalla	- Haasteina ovat sähköaseman syöttökatkaisijan koestus ilman, että syöttö katkeaa sekä toisen portaan ylivirtasuojaussignaalin havaitseminen väylästä - Ratkaisumallit toteutettiin ABB:n PCM600 -konfigurointiohjelmalla - Luotiin JaTelle sisäinen ohjeistus ratkaisumallien logiikan rakentamiseen
4. Aihekokonaisuus	Tavoitteet	Johtopäätökset
Projektikohteena muuntamo, jossa ABB:n UniSec-kojeistolla syötetään viittä 20/0.4 kV:n jakelumuuntajaa	- Esitellään projektikohde ja kerrotaan koestusjärjestys - Digitaalisen painonapin testaaminen - Verrataan GOOSE-viestien ja kuparijohtimien analogisten viestien toiminta-aikoja - Testataan GOOSE- ja SV Configuration -ohjelmia sekä testataan JaTen sisäisten ohjeistusten toimivuus käytännössä	- Digitaalista painonappia ei kerretty toteuttamaan muuntamolle aikataulumuutosten vuoksi - Painonapin konfiguroinnista saatiin luotua yritykselle sisäinen ohjeistus sen luomisesta ja käytötilanteista, joten sitä voidaan hyödyntää tulevissa projekteissa - OMICRONin GOOSE- ja SV Configuration -ohjelmien toiminta saatiin testattua käytännössä - GOOSE-viestin ja kuparijohtimen analogisignaalin toiminta-aika vertailussa GOOSE-viesti oli nopeampi, joten voidaan todeta, että vähemmälläkin kupari-kaapeloinnilla voidaan toteuttaa turvallinen sähköasema - Ohjelmille luodut JaTen sisäiset käyttöohjeet helpottavat kojeistajia ohjelmien käytössä - Edellä mainittujen ohjelmien havaittiin helpottavan koestusta, joten nämä tulevat käyttöön myös tulevaisuudessa

Eräänä jatkotutkimusaiheena olisi hyvä toteuttaa käytännöntasolla luvussa neljä esitetty suojareleen mimiikkaan lisättävä digitaalinen painonappi. Painonapin avulla saadaan varmuus siitä, että sähköasema on koestettavissa sähköt päällä, joka helpottaisi kausikoestusta.

Toisena jatkotutkimusaiheena voisi selvittää, mitä kaikkea laitekantaa pitää päivittää, jos kaukokäyttöön lisätään uusi sähköasema. Luvussa kolme kerrottiin aikasynkronoinnin merkityksestä ja muista yksilöitävistä parametreista, mutta näiden merkitys kaukokäyttöön liittyville laitekannoille olisi hyvä tutkia vielä tarkemmin. Tämä lisää kustannustehokasta rakentamista, kun asiat ovat jo etukäteen tutkittu, eivätkä ne tule sitten rakentamisen yhteydessä vastaan.

## 7 Yhteenveto

Tämän diplomityön päätavoitteena oli tutkia IEC 61850 -standardin määrittelemiä sähköaseman digitaalisia suojausratkaisuja ja luoda JaTelle parempi ymmärrys sekä valmius näiden koestamiseen. Diplomityö on jaettu neljään aihekokonaisuuteen. Tarkastelujen tuloksina JaTelle saatiin luotua konkreettisia keinoja digitaalisten suojausratkaisujen koestamiseen.

Ensimmäisen aihekokonaisuudessa kartoitettiin sähköasemien koestusten nykytilaa ja tulevaisuutta. Aihekokonaisuutta peilattiin JaTen koestuslaitteisiin, jossa tarkasteltiin niiden käytettävyyttä tulevaisuuden näkökulmasta. Lisäksi pohdittiin mahdollisia hankintoja. Lopputuloksena todettiin, että JaTen koestuslaitteet ovat ajan tasalla, eikä laitehankintoja tarvitse tehdä. Tulevaisuudessa pitää investoida vain lisensseihin, joita tarvitaan koestettaessa digitaalisia sähköasemia. Sähköasemien koestusten nykytilan ja tulevaisuuden kartoituksen perusteella saatiin, että nykyisillä sähköasemilla koestustavat pysyvät samoina ja tulevaisuuden sähköasemilla itsevalvontaominaisuudet tulevat vähentämään koestusten tarvetta.

Toisessa aihekokonaisuudessa kerrottiin IEC 61850 -standardin sekä GOOSE- ja SV-kommunikaatioprotokollien vaikutuksista sähköasemalle. Vaikutuksiin peilaten kartoitettiin koestustapoja näille protokollille sähköasemien käyttöönotto- ja kausikoestuksissa. Kausikoestusta varten tutkittiin mahdollisuutta asettaa suojarole testi- ja simulointitilaan. Tuloksena saatiin, että testi- ja simulointitilat ovat mahdollisia, kunhan suojaroleet tukevat näitä. Tämä täytyy varmistaa aina suojaroleiden valmistajalta.

Kolmannessa aihekokonaisuudessa tutkittiin IEC 61850 -standardin mukaista suojaroleiden konfigurointiprosessia ja tämän pohjalta esitettiin ratkaisumalli kausikoestuksessa syntyvään haasteeseen, kun sähköaseman suojaroleita pitää koestaa jännitteisenä. Ratkaisumalli toteutettiin ABB:n suojaroleisiin PCM600 -konfigurointiohjelmalla. Ratkaisumalliin sisällytettiin myös johtolähtökentästä tulevan toisen portaan ylivirtasuojalukituksen signaalin havaitseminen väylästä. Ratkaisumallia ei päästy käytännössä testaamaan aikataulun tullessa projektikohteessa vastaan. Aihekokonaisuudesta saatiin kuitenkin rakennettua JaTelle sisäinen konfigurointiohjeistus, jota voidaan hyödyntää tulevissa projekteissa.

Neljännessä aihekokonaisuudessa kerrottiin projektikohde, joka on ABB:n UniSec-kojeistolla toteutettu suurehko muuntamo. Projektikohteesta esitettiin, missä järjestyksessä JaTen koestajat koestavat KJ-kojeiston. Projektikohteessa testattiin myös GOOSE- ja SV Configuration -ohjelmien toiminta käytännössä. Lopputuloksena voitiin todeta ohjelmien toimivan halutulla tavalla, jolloin voitiin myös luoda toimiva JaTen sisäinen ohjeistus näille ohjelmille tulevaisuutta ajatellen.

## Lähdeluettelo

- ABB, 1999. *Types, IRP, IRC and IRD Directional Overcurrent Ground Relays*, s.l.: ABB.
- ABB, 2008. *Universal Testing Method for Power Transformer Differential Protection*, s.l.: s.n.
- ABB, 2012. *615 series - IEC 61850 Engineering Guide*, s.l.: ABB.
- ABB, 2020. *ABB Power Grids Substation Automation*. [Verkköjulkaisu]  
Saatavilla: [https://library.e.abb.com/public/500e8857c5dc4749b8c56cd72e02f052/AutomationCommunication\\_2020514.pdf?x-sign=3tYIxp5qVB+tkAe4SRHZQc0cjJjUE6t6p6VqAS2uuPTQ7uNYvkRgsxYZu2W/OWzd](https://library.e.abb.com/public/500e8857c5dc4749b8c56cd72e02f052/AutomationCommunication_2020514.pdf?x-sign=3tYIxp5qVB+tkAe4SRHZQc0cjJjUE6t6p6VqAS2uuPTQ7uNYvkRgsxYZu2W/OWzd)  
[Haettu 25 Toukokuu 2021].
- ABB, 2020. *UniGear Digital, Engineering Guide*, s.l.: ABB.
- Amulya, Patil, M., Bhide, S. R. & Bhat, S. S., 2017. *Experimenting with IEC 61850 and GOOSE messaging*, s.l.: IEEE.
- Apostolov, A., 2017. *Efficient maintenance testing in digital substations based on IEC 61850 edition 2*, s.l.: SprigerOpen.
- Apostolov, A., 2018. *Utilitu Products - Testing in the Digital Substation: IEC 61850-based Systems*. [Verkköjulkaisu]  
Saatavilla: <https://www.utilityproducts.com/home/article/16002693/testing-in-the-digital-substation-iec-61850based-systems>  
[Haettu 7 Maaliskuu 2021].
- Bonetti, A. & Douib, R., 2010. *Transfer time measurement for protection relay applications with the IEC 61850 standard*, s.l.: IEEE.
- CISCO, 2019. *Substation Automation Local Area Network and Security Cisco Validated Design*. [Verkköjulkaisu]  
Saatavilla: <https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/solutions/Verticals/Utilities/SA/2-3-2/CU-2-3-2-DIG/CU-2-3-2-DIG.html>  
[Haettu 25 Maaliskuu 2021].
- Claveria, J. & Kalam, A., 2018. *GOOSE Protocol: IED's Smart Solution for Victoria University Zone Substation (VUZS) Simulator Based on IEC61850 Standard*, s.l.: IEEE.
- de Mesmaeker, I., 2005. *How to use IEC 61850 in protection and automation*, s.l.: Electra.
- Doble Engineering Company, 2020. *DOBLE F6150sv TECHNICAL SPECIFICATIONS*, s.l.: Doble Engineering Company.
- Doble Engineering Company, 2020. *Protection Suite 5.0 User Guide*, s.l.: Doble Engineering Company.

Doble Engineering Company, 2021. *F6150sv*. [Verkkajulkaisu]

Saatavilla: <https://www.doble.com/product/f6150sv/>

[Haettu 17 Maaliskuu 2021].

Doble Engineering Company, 2021. *MTS-5100*. [Verkkajulkaisu]

Saatavilla: <https://www.doble.com/product/mts-5100/>

[Haettu 17 Maaliskuu 2021].

Doble Engineering Company, 2021. *Protection Suite Software*. [Verkkajulkaisu]

Saatavilla: <https://www.doble.com/product/protection-suite/>

[Haettu 17 Maaliskuu 2021].

Du, L. & Liu, Q.-y., 2012. *The Design of Communication System on the Realtime Relay Protection based on GOOSE*, s.l.: IEEE.

El Hariri, M. et al., 2019. *The IEC 61850 Sampled Measured Values Protocol: Analysis, Threat Identification, and Feasibility of Using NN Forecasters to Detect of Spoofed Packets*, s.l.: Energies.

Elovaara, J. & Haarla, L., 2011. Kojeistot. In: *Sähköverkot II*. Helsinki: Gaudeamus Oy, p. 117.

Elovaara, J. & Haarla, L., 2011. Relesuojaus. In: *Sähköverkot II*. Helsinki: Gaudeamus Oy, pp. 335-336.

Elovaara, J. & Haarla, L., 2011. Sähköasemat ja niiden suunnittelu. In: *Sähköverkot II*. Helsinki: Gaudeamus Oy, p. 76.

Falk, H., 2019. *IEC 61850 Demystified*. Norwood: Artech House.

Fernandes, C., Borkar, S. & Gohil, J., 2014. *Testing of Goose Protocol of IEC61850 Standard in Protection IED*, s.l.: International Journal of Computer Applications (0975 – 8887).

Finlex, 2018. *Sähköturvallisuuslaki*. [Verkkajulkaisu]

Saatavilla: <https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2016/20161135#L1P5>

[Haettu 23 helmikuu 2021].

Georg, H., Dorsch, N., Putzke, M. & Wietfeld, C., 2013. *Performance Evaluation of Time-critical Communication Networks for Smart Grids based on IEC 61850*, s.l.: IEEE.

Gill, P., 2009. Chapter 9 Testing and Commissioning of Protective Relays and Instrument Transformers. In: *Electrical power equipment maintenance and testing*. s.l.:s.n., pp. 497-540.

Goraj, M. & McGhee, J., 2010. *Smart High Voltage Substation based on IEC 61850 Process Bus and IEEE 1588 Time Synchronization*. s.l., IEEE.

Haarla, L., 2021. *400 kV:n sähköverkkojen suojaus*. [Verkkajulkaisu]

Saatavilla: [https://moodle.lut.fi/pluginfile.php/515883/mod\\_resource/content/0/LUT-luento-400kV-suojaus-2021\\_Liisa-Haarla.pdf](https://moodle.lut.fi/pluginfile.php/515883/mod_resource/content/0/LUT-luento-400kV-suojaus-2021_Liisa-Haarla.pdf)

[Haettu 13 Huhtikuu 2021].

- Hernández, E., Whitesel, T. & Wyszczelski, L. K., 2020. *A Practical Guide to Substation Testing Using IEC 61850 Mode and Behavior*, Seattle, Washington: Power and Energy Automation Conference.
- IEC, 2011. *Communication networks and systems for power utility automation - Part 90-4: Network engineering guidelines*, s.l.: IEC.
- Jaakkola, J., 2022. *Destia Oy:n Jakelu- ja teollisuusverkot-yksikön suunnittelupäällikkö [Haastattelu]* (18 Tammikuu 2022).
- Jang, B., Abubakari, A. & Kim, N., 2018. *IEC 61850 SCL Validation Using UML Model in Modern Digital Substation*, s.l.: Scientific Research Publishing Inc.
- Kruger, C., Behardien, S. & Retonda-Modiya, J.-C., 2013. *A Detailed Analysis of the GOOSE Message Structure in an IEC 61850 Standard-Based Substation Automation System*, s.l.: Cape Peninsula University of Technology.
- León, H., Montez, C., Stemmer, M. & Vasques, F., 2016. *Simulation Models for IEC 61850 Communication in Electrical Substations Using GOOSE and SMV Time-critical Messages*, s.l.: IEEE.
- Lim, I.-H. & Sidhu, T., 2013. *Design of a Backup IED for IEC 61850-Based Substation*, s.l.: IEEE.
- Lopes, Y., Muchaluat-Saade, D., C.Fernandes, N. & Z.Fortes, M., 2015. *Geese: A Traffic Generator for Performance and Security Evaluation of IEC 61850 Networks*, s.l.: IEEE.
- Mackey, M., 2019. Substation Auxiliary Systems. In: *International Council on Large Electric Systems (CIGRE) Study Committee B3: Substations*. Pariisi: International Council on Large Electric Systems (CIGRE), pp. 745-752.
- Mackiewicz, R., 2006. *Overview of IEC 61850 and Benefits*, s.l.: IEEE.
- Manta Test Systems, 2012. *MTS-5100 USER's MANUAL*, s.l.: Manta Test Systems.
- Marchetti, C., 2017. *Digital Substation, bridging the gap between analogue and digital technologies.. [Verkkojulkaisu]*  
Saatavilla:  
<http://www.omaintec.com/sitecontent/uploads/editor/Omaintec2017/Presentations/001%20-%20CLAUDIO.pdf>  
[Haettu 14 Toukokuu 2021].
- Matoušek, P., 2019. *Description of IEC 61850 Communication*, s.l.: Brno University of Technology.
- McDonald, J., 2003. *substation automation IED integration and availability of information*, s.l.: IEEE.
- McTaggart, C., Ainslie, F. & Mohapatra, P., 2015. *Future Intelligent Transmission Network Substation*, s.l.: SP Energy Networks.

Megger , 2011. *SVERKER 750/780 Relay Test Sets*. [Verkkójulkaisu]  
Saatavilla: [https://www.perel.fi/files/hierarchy/73283014/sverker-750-780\\_ds\\_en\\_v06.pdf](https://www.perel.fi/files/hierarchy/73283014/sverker-750-780_ds_en_v06.pdf)  
[Haettu 20 Maaliskuu 2021].

Megger, 2011. *MOM2 Microhmmeter*. [Verkkójulkaisu]  
Saatavilla: [https://www.perel.fi/files/hierarchy/73425943/mom2\\_ds\\_en\\_v08.pdf](https://www.perel.fi/files/hierarchy/73425943/mom2_ds_en_v08.pdf)  
[Haettu 20 Maaliskuu 2021].

Megger, 2015. *TORREL 840/860 Battery Load Units*. [Verkkójulkaisu]  
Saatavilla: [https://content.megger.com/getattachment/271de1af-8678-4e2e-bfaa-5185ee2f9de4/TORREL-840-860\\_DS\\_en\\_V08.pdf?\\_ga=2.200125608.760187400.1616151332-1636352003.1615208953](https://content.megger.com/getattachment/271de1af-8678-4e2e-bfaa-5185ee2f9de4/TORREL-840-860_DS_en_V08.pdf?_ga=2.200125608.760187400.1616151332-1636352003.1615208953)  
[Haettu 20 Maaliskuu 2021].

Megger, 2017. *MOM600A Micro-ohmmeter*. [Verkkójulkaisu]  
Saatavilla:  
[https://embed.widencdn.net/pdf/plus/megger/eps1zxflok/MOM600A\\_DS\\_en.pdf?u=k67mr7](https://embed.widencdn.net/pdf/plus/megger/eps1zxflok/MOM600A_DS_en.pdf?u=k67mr7)  
[Haettu 20 Maaliskuu 2021].

Megger, 2019. *SVERKER 650 Relay Test Set*. [Verkkójulkaisu]  
Saatavilla:  
[https://embed.widencdn.net/pdf/plus/megger/8r6ywrba1/SVERKER\\_650\\_DS\\_en.pdf](https://embed.widencdn.net/pdf/plus/megger/8r6ywrba1/SVERKER_650_DS_en.pdf)  
[Haettu 20 Maaliskuu 2021].

Megger, 2021. *AVTS - ADVANCED VISUAL TEST SOFTWARE FOR PROTECTIVE RELAY TESTING*. [Verkkójulkaisu]  
Saatavilla: <https://us.megger.com/advanced-visual-test-software-avts-1>  
[Haettu 2 Kesäkuu 2021].

Megger, 2021. *Megger SMRT410 Relay Test System*, s.l.: Megger.

Megger, 2021. *RELAY TEST & MANAGEMENT SOFTWARE*. [Verkkójulkaisu]  
Saatavilla: <https://us.megger.com/relay-test-management-software-rtms-1#overview>  
[Haettu 2 Kesäkuu 2021].

Monni, M., 2015. Koestus. In: *Jakeluverkon käyttötehtävät*. Hämeenlinna: Laine Direct Oy, pp. 167-168.

Mörsky, J., 1992. *Relesuojaustekniikka*. Hämeenlinna: Otatieto Oy.

OMICRON, 2016. *Testing Solutions for Protection and Measurement Systems*, s.l.: OMICRON.

OMICRON, 2018. *CMC 850 - The Protection Test Set Dedicated to IEC 61850*. [Verkkójulkaisu]  
Saatavilla: <https://www.omicronenergy.com/en/products/cmc-850/>  
[Haettu 20 Maaliskuu 2021].

OMICRON, 2020. *CPC 100 - Multi-functional primary test system for substation commissioning and maintenance*. [Verkkajulkaisu]

Saatavilla: <https://www.omicronenergy.com/en/products/cpc-100/>  
[Haettu 20 Maaliskuu 2021].

OMICRON, 2021. *CMC 356*. [Verkkajulkaisu]

Saatavilla: <https://www.omicronenergy.com/en/products/cmc-356/>  
[Haettu 17 Maaliskuu 2021].

Piispanen, A., 2019. *HAJAUTETUN PIENTUOTANNON VAIKUTUS KÄYTTÖTOIMINTAAN*, Tampere: Tampereen yliopisto.

Riccardo, A., 2019. *IEC 61850 Testing and Commissioning Advantages Using GOOSE Messaging*, s.l.: IEEE.

Sidhu, T., Kanabar, M. & Parikh, P., 2008. *Implementation Issues with IEC 61850 Based Substation Automation Systems*, Mumbai: Fifteenth National Power Systems Conference.

Sreenivasa, K., 2019. *Moving from conventional to intelligent substations*, s.l.: Texas Instrument.

SUOMEN STANDARDISOIMISLIITTO SFS, 2002. *SFS-IEC 60050-448*, s.l.: IEC.

Ukkola, A., 2021. *Oulun Energia Urakointi Oy:n koestaja* [Haastattelu] 2021.

Wannous, K. & Toman, P., 2018. *Sharing Sampled Values Between Two Protection Relays According To Standard IEC 61850-9-2LE*, s.l.: IEEE.

Werstiuk, C., 2010. *Testing Requirements for Microprocessor Relays*, s.l.: Valence Electrical Training Services.

Werstiuk, C., 2021. *What is the Best Protective Relay Test-Set?*. [Verkkajulkaisu]

Saatavilla: <https://relaytraining.com/what-is-the-best-protective-relay-test-set/?highlight=what%20is%20the%20best>  
[Haettu 17 Maaliskuu 2021].

Wester, C., Adamiak, M. & Vico, J., 2011. *IEC61850 PROTOCOL - PRACTICAL APPLICATIONS IN INDUSTRIAL FACILITIES*, s.l.: IEEE.