



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MAURI MUSTONEN
SÄHKÖASEMAN ÄLYKKÄÄN ELEKTRONIIKKALAITTEEN
VIESTIEN TILAUS JA PROSESSOINTI
Diplomityö

Tarkastaja: Professori Kari Systä

Tarkastaja ja aihe hyväksytty 8. elokuuta 2018

TIIVISTELMÄ

MAURI MUSTONEN: sähköaseman älykkään elektroniikkalaitteen viestien tilaus ja prosessointi

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 76 sivua, 5 liitesivua

Toukokuu 2018

Tietotekniikan koulutusohjelma

Pääaine: Ohjelmistotuotanto

Tarkastaja: Professori Kari Systä

Avainsanat: IEC 61850, MMS, AMQP, IED, sähköasema, älykäs elektroniikkalaite, ohjelmistokehitys, hajautettu järjestelmä, kommunikointiparadigmat

Sähkönjakeluverkot ovat tärkeä osa nykyistä yhteiskuntaa ja sen päivittäistä toimintaa. Sähköverkko koostuu sähköntuotantolaitoksista, sähkölinjoista ja sähköasemista. Sähköverkon eri komponenttien avulla sähkö toimitetaan tuotantolaitoksista kuluttajille. Sähköasemat ja niiden automatisointi ovat tärkeässä osassa verkon yleisen toiminnan ja turvallisuuden takaamiseksi. Tässä diplomityössä keskitytään suunnittelemaan ja toteuttamaan hajautetun järjestelmän arkkitehtuuria hyödyntävä ohjelmistokomponentti. Komponentin on tarkoitus olla osa isompaa sähköasemiin liittyvää järjestelmää. Sen tilaa tietoa sähköasemalta verkon yli ja jakaa sen järjestelmän muiden komponenttien kanssa. Sähköasemalta tuleva tieto esimerkiksi sisältää mittaustietoa, jota näytetään käyttöliittymässä.

Sähköasemilta tieto tilataan älykkäiltä elektroniikkalaitteilta (engl. Intelligent Electronic Device, IED). IED:t ovat sähköaseman verkkoon kytkettyjä automaatiolaitteita, joista käytetään myös nimitystä suojarele. IED-laitteiden kommunikointiin liittyy maailmanlaajuinen IEC 61850 -standardi (engl. International Electrotechnical Commission). Standardi määrittää kuinka IED-laitteet ja niihin yhteydessä olevat ohjelmat kommunikoivat verkon yli.

Ohjelmasta oli toteutettu demo ennen työn aloitusta, joka todisti osien toimivuuden. Demototeutuksessa oli ongelmia, jotka haittasivat sen jatkokehitystä. Tässä työssä demoa käytetään pohjana uuden version suunnittelulle. Demosta analysoidaan sen ongelmia ja mistä ne johtuivat. Näitä tietoja käytetään uuden komponentin tekniikan suunnitteluun.

Tuloksena on hajautetun järjestelmän arkkitehtuuria hyödyntävä ohjelmistokomponentti, joka kykenee tilaamaan viestejä IED-laitteelta IEC 61850 -standardin mukaisesti. Komponentti kykenee prosessoimaan ja jakamaan tilatut viestit järjestelmän muiden komponenttien kanssa.

ABSTRACT

MAURI MUSTONEN: Substation's intelligent electronic device messages subscription and processing

Tampere University of Technology

Master of Science thesis, 76 pages, 5 Appendix pages

May 2018

Master's Degree Programme in Information Technology

Major: Software Engineering

Examiner: Prof. Kari Systä

Keywords: IEC 61850, MMS, AMQP, IED, substation, intelligent electronic device, software development, distributed system, communication paradigms

Electric grids are an important part of the society today. It consists of power plants, power lines and substations. These components allow delivering electricity from power plants to the end users. Substations and their automation play an important role in guaranteeing power grid safety and functionality. The focus of this master thesis is to plan and implement a software component that utilizes a distributed system architecture. The component is intended to be a part of a larger system related to the substations. It subscribes information from the substation and shares it with other parts of the system. The information from the substation can include different types of data, such as measurement data which is shown on the user interface.

The information is subscribed from an Intelligent Electronic Device (IED) in substations. An IED is an automation device which controls the other physical devices of the substation. IEDs are connected to the substation's local network. IED can also be referred to as "protection relay". The International Electrotechnical Commission has defined a worldwide standard called IEC 61850 that defines the rules for how IED-devices and software outside of the substation need to communicate with each other over the network.

A proof of concept software component had already been developed before the start of this thesis. However, this component had many problems which did not encourage its further development. Analyzing these problems is a part of this thesis. The new information is then used to plan the new software's technical side.

The result of this thesis is a software component that utilizes a distributed system architecture. The component can subscribe information from the IED according to the IEC 61850 standard and share it with the other parts of the system.

ALKUSANAT

Toteutin tämän diplomityöni yritykselle nimeltä Alsus Oy. Alsus oli sen hetkinen työpaikkani vuonna 2018. Diplomintyön aihe liittyi sopivasti sen hetkisiin työtehtäviin ja sisälsi todella paljon oman mielenkiinnon kohteita. Työtehtävistä syntyi idea diplomityöstä, se muokkautui hieman ja lopulta siitä tuli tämän diplomityön aihe. Diplomityöhön liittyvän ohjelmistokehityksen aloitin jo helmikuussa 2018. Ohjelmisto valmistui toukokuussa ja siitä eteenpäin olen käyttänyt aikana työn ohessa diplomityön kirjoittamiseen.

Diplomityössäni aiheena on suunnitella ja kehittää arkkitehtuuria ja ohjelmistokomponentti osaksi isompaa järjestelmää. Järjestelmä liittyi sähköasemiin ja niiden tarkkailuun. Komponentin tarkoituksena on tilata tietoa verkon yli sähköasemilta ja jakaa tieto järjestelmän muiden komponenttien kanssa. Tämä diplomityö on tarkoitettu luettavaksi niille, jotka ovat kiinnostuneita sähköasemien toiminasta tai järjestelmän hajautuksesta ja siihen liittyvistä kommunikointiparadigmoista.

Haluan kiittää Alsus Oy -yritystä aiheesta ja mielenkiintoisista työtehtävistä, jotka mahdollistivat tämän diplomityön. Lisäksi, että sain käyttää työaikaani vapaasti diplomityön tekemiseen ja kirjoittamiseen. Yrityksen puolelta haluan erityisesti kiittää henkilöitä Jouni Renfors ja Samuli Vainio, jotka kannustivat minua ja antoivat palautetta tämän diplomityön tekemiseen. Kiitän työni ohjaajaa professori Kari Systää työni luotettavasta ja todella hyvästä ohjaamisesta. Haluan myös kiittää läheisiä ystäviäni, joiden kanssa pidimme paljon yhteisiä kirjoitushetkiä ja rakentavia keskusteluja diplomityön tekemisestä. Ilman niitä diplomityöni kirjoitusprosessi olisi venynyt pidemmäksi. Lisäksi kiitän perhettäni tuesta ja motivaatiosta koko opiskelujen aikana mitä heiltä sain. Lopuksi kiitän muita tärkeitä ystäviäni, jotka auttoivat minua diplomityössäni oikolukemalla ja motivoimalla minua.

Diplomityöni on kirjoitettu Latex:illa ja kaikki lähdekoodi on saatavissa GitHub:issa osoitteessa: https://github.com/kazooiebombchu/tut_master_thesis.

Tampereella, 21.11.2018



Mauri Mustonen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Vaatimukset.....	2
1.2	Tutkimuskysymykset	3
2.	MIKÄ ON IEC 61850 -STANDARDI?.....	5
2.1	Standardin eri osat ja niiden merkitykset.....	6
2.2	Abstraktimallin käsitteet ja niiden käyttö	7
2.3	Loogisen noodin luokkien ja attribuuttien rakentuminen	9
2.4	Attribuuttien viittaus hierarkiassa	12
2.5	Attribuuttien funktionaalinen rajoite ja niistä muodostetut datajoukot	14
2.6	Viestien tilaus ja tilauksen konfigurointi.....	17
2.7	Raportointi-luokan määrittäminen ja toiminta	19
2.8	Viestin rakenne ja kuinka sen sisältö muodostuu	21
2.9	Abstraktimallin sovitukset MMS-protokollaan	24
3.	HAJAUTETTU JÄRJESTELMÄ	26
3.1	Mikä on hajautettu järjestelmä?	26
3.1.1	Kuinka osapuolet kommunikoivat?	26
3.1.2	Kommunikoinnin luokittelu.....	27
3.2	Hajautuksen paradigmoja.....	29
3.2.1	Prosessien välinen kommunikaatio.....	30
3.2.2	Etäkutsu	31
3.2.3	Epäsuora kommunikaatio	31
3.2.4	Joukkokommunikointi	32
3.2.5	Julkaisija-tilaaja	33
3.2.6	Viestijono	34
4.	KUINKA JÄRJESTELMÄ HAJAUTETAAN?.....	36
4.1	Arkkitehtuurin analyysi	36
4.2	Osapuolten liitoksien analyysi	38
4.3	Paradigmojen analyysi	39
4.4	Toteutuksien analyysi.....	40
4.5	Viestin formaatti.....	41
4.6	Yhteenveto	42
5.	DEMOVERSION TOIMINTA JA ANALYYSI	44
5.1	Arkkitehtuuri.....	44
5.2	Toiminta	46
5.3	Ongelmien analyysi	48
5.4	Yhteenveto	50
6.	SUUNNITTELU.....	52
6.1	Kokonaiskuva.....	52

6.2	AMQP-välittäjäpalvelin	53
6.3	Tilauksen orkestrointi ja tiedon välitys	53
6.4	Suorituskyky ja kielen valinta	54
6.5	JSON-viestin rakenne	55
7.	TOTEUTUS	57
7.1	Yleiskuva	57
7.2	Ohjelman toiminta	59
7.2.1	Parametrisointi	59
7.2.2	Yhteyksien muodostus	61
7.2.3	IED:n attribuuttien tyyppin ja koon luku	62
7.2.4	Viestien tilaus	63
7.2.5	JSON:in muodostaminen ja julkaisu	64
8.	TULOSTEN ARVIOINTI JA POHDINTA	66
9.	YHTEENVETO	69
	LÄHTEET	71
	LIITE A: VIESTISTÄ PROSESSOITU JSON-RAKENNE	77
	LIITE B: C-OHJELMAN TULOSTAMA APU TEKSTI	80

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Sähköaseman fyysisten laitteiden abstrahointi IEC 61850 -standardin käsitteillä (pohjautuu kuvaan [26, s. 17]).</i>	8
Kuva 2.	<i>IEC 61850 -standardissa määritettyjen luokkien hierarkia (pohjautuu kuvaan [27, s. 17]).</i>	8
Kuva 3.	<i>Standardin käsitteiden hierarkkinen rakenne ja niiden nimeämisen esimerkki (pohjautuu kuvaan [24, s. 24]).</i>	10
Kuva 4.	<i>IEC 61850 -standardin määrittämä viitteen rakenne (pohjautuu kuvaan [26, s. 93]).</i>	13
Kuva 5.	<i>Puskuroitu viestien tilausprosessi tilaajan ja IED-laitteella olevan BRCB-instanssin välillä (pohjautuu kuvaan [26, s. 42]).</i>	18
Kuva 6.	<i>Standardin määrittämä lähetetyn viestin rakenne (pohjautuu kuvaan [27, s. 104]).</i>	22
Kuva 7.	<i>BRCB-instanssi tarkkailee sille määritettyä datajoukkoa ja generoi viestin tapahtuman liipaistessa.</i>	23
Kuva 8.	<i>Väliohjelmistokerros abstrahoimaan alusta heterogeeniseksi ylemmän tason ohjelmistolle (pohjautuu kuvaan [21, s. 52]).</i>	27
Kuva 9.	<i>Osapuolten kommunikointi avoimessa ja suljetussa ryhmässä (pohjautuu kuvaan [21, s. 235]).</i>	33
Kuva 10.	<i>Julkaisija-tilaaja-systeemi välikätenä viestien välittämisessä julkaisijoiden ja tilaajien välissä (pohjautuu kuvaan [21, s. 246]).</i>	34
Kuva 11.	<i>Viestijonosysteemi puskuroi viestejä lähettäjiä vastaanottajille (pohjautuu kuvaan [21, s. 255]).</i>	35
Kuva 12.	<i>IED-laitteelta viestien tilaus suoraan ja väliohjelmiston avulla.</i>	37
Kuva 13.	<i>Välikäsi väliohjelmiston ja komponenttien välissä lisäämään epäsuoruutta ja joustavuutta.</i>	39
Kuva 14.	<i>Suunniteltu korkean tason järjestelmän hajautus ja kommunikointiprotokollat osapuolten välillä.</i>	42
Kuva 15.	<i>Ruby:lla toteutetun demoversion arkkitehtuuri ja tiedonsiirto.</i>	45
Kuva 16.	<i>LibIEC61850-kirjaston kerrosarkkitehtuurin komponentit, vihreällä Ruby toteutukseen lisätyt osat (pohjautuu kuvaan [38]).</i>	45
Kuva 17.	<i>Sekvenssikaavio kuinka Ruby-ohjelma avaa yhteydet ja tilaa kaikki IED-laitteen RCB-instanssit (jatkuu kuvassa 18).</i>	47
Kuva 18.	<i>Sekvenssikaavio kuinka Ruby-ohjelma prosessoi ja tallentaa viestejä libIEC61850-kirjastoa käyttäen (jatkoa kuvalle 17).</i>	48
Kuva 19.	<i>Ruby-tulkin globaalin lukituksen toiminta, joka vuorottaa ajossa olevia säikeitä riippumatta käyttöjärjestelmän vuorottajasta.</i>	50
Kuva 20.	<i>Suunnitellun järjestelmän arkkitehtuuri sekä viestin kulku ja muoto sen osapuolten läpi.</i>	52
Kuva 21.	<i>Esimerkkikäyttötapaus, jossa mittaustietoa tilaava komponentti lähettää tietoa selaimen käyttöliittymään web-soketin avulla.</i>	54

Kuva 22.	<i>Rcb_sub-ohjelman komponenttikaavio.</i>	57
Kuva 23.	<i>Sekvenssikaavio rcb_sub-ohjelman kokonaistoiminnasta.</i>	60
Kuva 24.	<i>Sekvenssikaavio kuinka rcb_sub avaa yhteydet RabbitMQ-palvelimelle ja IED-laitteelle.</i>	61
Kuva 25.	<i>Sekvenssikaavio kuinka rcb_sub lukee RCB-instanssin arvot ja muuttujien spesifikaatiot.</i>	62
Kuva 26.	<i>Sekvenssikaavio kuinka rcb_sub tilaa RCB-instanssit.</i>	63
Kuva 27.	<i>Sekvenssikaavio kuinka rcb_sub muodostaa JSON:nin päätason kentät.</i>	64
Kuva 28.	<i>Sekvenssikaavio kuinka rcb_sub lisää JSON:iin muuttujat viestistä.</i>	65

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1.	<i>IEC 61850 -standardin pääkohtien ja niiden alakohtien dokumentit, (pohjautuu taulukkoon [41, s. 2]).</i>	6
Taulukko 2.	<i>IEC 61850 -standardin katkaisijaluokan XCBR -määrittäminen (pohjautuu taulukkoon [29, s. 105–106]).</i>	11
Taulukko 3.	<i>IEC 61850 -standardin DPC-luokan määrittäminen ja instanssin nimi on Pos (pohjautuu taulukkoon [28, s. 44]).</i>	12
Taulukko 4.	<i>Osa IEC 61850 -standardin määrittämisestä funktionaalista rajoitteista, lyhennetään FC (ote taulukosta [27, s. 54]).</i>	14
Taulukko 5.	<i>Pos-dataobjektista viitteellä OmaLD/Q0XCBR1.Pos ja funktionaalilla rajoitteella ST viitattavat data-attribuutit.</i>	15
Taulukko 6.	<i>Viitteen nimeäminen lyhenteellä funktionaalisen rajoitteen kanssa.</i>	16
Taulukko 7.	<i>BRCB-luokan määritetyt attribuutit ja niiden selitteet (pohjautuu taulukkoon [27, s. 94]).</i>	20
Taulukko 8.	<i>RCB-luokan OptFlds-attribuutin arvot ja niiden selitteet.</i>	21
Taulukko 9.	<i>Hajautetussa järjestelmässä osapuolten kommunikoinnin luokittelun malli (pohjautuu taulukoihin [21, s. 231] [12, s. 84]).</i>	28
Taulukko 10.	<i>Hajautetun järjestelmän kommunikointiparadigmat kolmella päätösollalla (pohjautuu tauluun [21, s. 46]).</i>	29

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ACSI	engl. <i>Abstract Communication Service Interface</i> , IEC 61850 -standardin käyttämä lyhenne kuvaamaan palveluiden abstraktimalleja
AMQP	engl. <i>Advanced Message Queuing Protocol</i> on avoin standardi viestien välitykseen eri osapuolien kesken
BRCB	engl. <i>Buffered Report Control Block</i> on IEC 61850 -standardissa pus-kuroitu viestien tilaamisesta vastaava luokka
CDC	engl. <i>Common Data Class</i> on IEC 61850 -standardissa joukko uudelleenkäytettäviä dataobjektin luokkia
CMV	engl. <i>Complex Measured Value</i> on IEC 61850 -standardissa dataobjektin luokkatyyppi
DA	engl. <i>Data Attribute</i> on IEC 61850 -standardissa käsite abstrahoimaan jokin sähköaseman laitteen mitattava arvo (esim. jännite)
dchg	engl. <i>data change</i> on IEC 61850 -standardissa oleva liipaisimen tyyppi
DO	engl. <i>Data Object</i> on IEC 61850 -standardissa käsite abstrahoimaan joukko samaan kuuluvia data-attribuutteja
DPC	engl. <i>Controllable Double Point</i> on IEC 61850 -standardissa dataobjektin luokkatyyppi nimeltään Pos
DSM	engl. <i>Distributed Shared Memory</i> on jaettu muisti, joka käyttäjälle näyttää kuin paikallinen fyysinen muisti
dupd	engl. <i>data update</i> on IEC 61850 -standardissa oleva liipaisimen tyyppi
FC	engl. <i>Functional Constraint</i> on IEC 61850 -standardissa käsite viitatujen data-attribuuttien rajoittamiseen
FCD	engl. <i>Functional Constrained Data</i> on IEC 61850 -standardissa viitteen tyyppi rajoittamaan viitattuja data-attribuutteja hierarkiassa ensimmäisestä dataobjektista alaspäin
FCDA	engl. <i>Functional Constrained Data Attribute</i> on IEC 61850 -standardissa viitteen tyyppi rajoittamaan data-attribuutteja hierarkiasa muusta kuin ensimmäisestä dataobjektista alaspäin
FFI	engl. <i>Foreign Function Interface</i> , mekanismi, jolla ohjelma voi kutsua toisella kielellä toteutettuja funktiota
GCS	engl. <i>Group Communication System</i> tarkoittaa systeemiä, jossa kommunikoidaan joukolle osapuolia
GI	engl. <i>General Interrogation</i> on IEC 61850 -standardissa oleva liipaisimen tyyppi
GIL	engl. <i>Global Interpreter Lock</i> , Ruby-kielen tulkissa oleva globaali tulkkilukitus, joka rajoittaa yhden säikeen suoritukseen kerrallaan
GVL	engl. <i>Global Virtual Machine Lock</i> on sama kuin GIL, mutta eri nimellä
HAL	engl. <i>Hardware Abstraction Layer</i> on laitteistoabstraktiotaso abstrahoimaan laitteen toiminnallisuuden lähdekoodista
IEC	engl. <i>International Electrotechnical Commission</i> , on sähköalan kansainvälinen standardiorganisaatio
IEC 61850	maailmanlaajuinen sähköasemien IED-laitteiden kommunikoinnin määrittävä standardi
IED	engl. <i>Intelligent Electronic Device</i> , sähköaseman älykäs elektroniikka-laite (myös nimellä turvarele), joka toteuttaa aseman automaatiota

IoT	engl. <i>Internet of Things</i> , on verkko joka koostu siihen kytketyistä erilaisista laitteista
IP	engl. <i>Internet Protocol</i> on protokolla verkkoliikenteessä joka huolehtii pakettien perille toimittamisesta
JRuby	on Ruby-kielen tulkki Ruby-koodin suoritukseen Java-virtuaalikoneella
JSON	engl. <i>JavaScript Object Notation</i> on JavaScript-kielessä käytetty notatio objektista ja sen sisällöstä
JVM	engl. <i>Java Virtual Machine</i> on Java-kielen virtuaalikone Java-koodin suoritukseen
LD	engl. <i>Logical Device</i> on IEC 61850 -standardissa käsite abstrahoimaan joukko fyysisestä laitteesta joukko loogisesti yhteen kuuluvia laitteita
LN	engl. <i>Logical Node</i> on IEC 61850 -standardissa käsite abstrahoimaan fyysinen laite loogisen laitteen ryhmästä
mag	on dataobjektin instanssin data-attribuutti nimeltään mag (engl. magnitude)
MMS	engl. <i>Manufacturing Message Specification</i> on maailmanlaajuinen standardi reaaliaikaiseen kommunikointiin verkon yli eri laitteiden välillä
MMXU	engl. <i>measurement</i> on IEC 61850 -standardissa loogisen noodin luokka mallintamaan mitattuja arvoja
MQTT	engl. <i>Message Queuing Telemetry Transport</i> on julkaisija-tilaaja-pohjainen avoin standardi kommunikointiin hajautetussa järjestelmässä
MRI	engl. <i>Matz's Ruby Interpreter</i> on Ruby-kielen tulkki
MV	engl. <i>Measured Value</i> on IEC 61850 -standardissa on dataobjektin luokkatyyppi
OptFlds	engl. <i>Optional Fields</i> on attribuutti viestin vaihtoehtoisten kenttien määrittämiseen
PD	engl. <i>Physical Device</i> on IEC 61850 -standardissa käytetty käsite abstrahoimaan sähköaseman fyysinen laite
phsA	dataobjektin instanssi nimeltään phsA (engl. phase A) ja tyyppiä CMV
PhV	dataobjektin instanssi nimeltään phV (engl. phase to ground voltage) ja tyyppiä WYE
Pos	dataobjektin instanssi tyyppiä DPC ja nimeltä Pos (engl. position)
q	dataobjektin instanssin data-attribuutti nimeltään q (engl. quality)
qchg	engl. <i>quality change</i> on IEC 61850 -standardissa oleva liipaisimen tyyppi
RCB	engl. <i>Report Control Block</i> , raporttien konfigurointiin ja tilaukseen tarkoitettu luokkatyyppi IED-laitteelle
RMI	engl. <i>Remote Method Invocation</i> on oliopohjainen metodikutsu jossa metodi sijaitsee toisella koneella
RoR	engl. <i>Ruby on Rails</i> on kehys web-sovellusten kehittämiseen Ruby-kielellä
RPC	engl. <i>Remote Procedure Call</i> on etäproseduurikutsu jossa proseduuri sijaitsee toisella koneella
SCSM	engl. <i>Specific Communication Service Mapping</i> on IEC 61850 -standardin abstrahoitujen mallien toteuttaminen jollakin tekniikalla
stVal	dataobjektin instanssin data-attribuutti nimeltään stVal (engl. status value)
t	dataobjektin instanssin data-attribuutti nimeltään t (engl. timestamp)

TCP/IP	engl. <i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i> , on joukko standardeja verkkoliikenteen määrittämiseksi
TotW	dataobjektin instanssi tyypiltään MV ja nimeltä TotW (engl. total active power)
TrgOp	engl. <i>Trigger Options</i> on IEC 61850 -standardissa käytetty lyhenne määritetyille liipaisimille
UDP	engl. <i>User Datagram Protocol</i> on pakettien lähettämisen protokolla Internet protokollan päällä
URCB	engl. <i>Unbuffered Report Control Block</i> on IEC 61850 -standardissa ei puskuroitu viestien tilaamisesta vastaava luokka
WYE	engl. <i>Phase to ground/neutral related measured values of a three-phase system</i> on IEC 61850 -standardissa dataobjektin luokkatyyppi
XCBR	on IEC 61850 -standardissa luokka mallintamaan sähkölinjan katkaisijaa (engl. circuit breaker)
XML	engl. <i>Extensible Markup Language</i> on laajennettava merkintäkieli, joka on ihmis- ja koneluettava
YARV	engl. <i>Yet another Ruby VM</i> on Ruby-kielen toinen tulkki, jonka tarkoitus on korvata MRI-tulkki

1. JOHDANTO

Sähköverkko koostuu tuotantolaitoksista, sähkölinjoista ja sähköasemista. Sähköasemilla on erilaisia tehtäviä verkossa. Näitä ovat esimerkiksi jännitteen muuntaminen, verkon jakaminen ja sen toiminnan tarkkailu. Nykypäivänä asemien toiminnallisuutta voidaan seurata ja ohjata etäohjauksella verkon yli. Tätä kautta etäohjelman on mahdollista saada tietoa aseman toiminnasta ja sen tilasta. Sähköaseman yksi tärkeä tehtävä on suojata ja tarkkailla verkon toimivuutta, ja esimerkiksi vikatilanteessa katkaista linjasta virrat pois. Tällainen vikatilanne on esimerkiksi kaapelin poikki meneminen, joka aiheuttaa vaarallisen oikosulkutilanteen.

Tässä diplomityössä on tarkoituksena suunnitella hajautetun järjestelmän arkkitehtuuri ja toteuttaa ohjelmisto osaksi isompaa sähköasemiin liittyvää järjestelmää. Tavoitteena on saada tietoa verkon yli sähköaseman automaatiolaitteelta ja jakaa saatu tieto järjestelmän muiden osien kanssa. Työssä käsitellään hajautetun järjestelmän paradigmoja ja analysoidaan mitkä niistä sopisivat tilanteeseen parhaiten. Analyysin tuloksien ja ohjelmistolle asetettujen vaatimusten perusteella päädytään kokonaisuuden suunnitelmaan. Suunnitelma toteutetaan ohjelmistoksi, joka toimii osana olemassa olevaa isompaa järjestelmää. Toteutus jakaa sähköaseman tietoa järjestelmän muille osille, joita ovat esimerkiksi mittaustiedon näyttäminen ja aseman tilan tarkkailu käyttöliittymäkomponenteissa.

Tieto saadaan sähköasemilla olevilta *älykkäiltä elektroniikkalaitteilta* (engl. *Intelligent Electronic Device*, lyhennetään *IED*). IED-laite on verkkoon kytketty sähköaseman automaatiolaite, jota kutsutaan myös nimellä suojarele. IED-laite voidaan kytkeä ja konfiguroida toteuttamaan monta aseman eri funktionaalisuutta. IED:t voivat kommunikoida paikallisverkon yli aseman muun laitteiston ja IED-laitteiden kanssa, ja näin toteuttaa aseman toiminnallisuutta. Nykypäivänä verkon nopeus mahdollistaa reaaliaikaisen kommunikoinnin asemalla sen eri laitteiden välillä. IED-laitteet voivat myös kommunikoida aseman paikallisverkosta ulospäin, esimerkiksi keskitettyyn ohjauskeskukseen. Yksi IED-laite voidaan esimerkiksi konfiguroida hoitamaan sähkölinjan kytkimenä oloa. Tällöin se tarkkailee linjan toimintaa mittaamalla arvoja, kuten jännitettä ja virtaa. Vikatilanteen sattuessa IED ohjaa aseman laitteita toimimaan oikein enempien vahinkojen välttämiseksi. [9]

IED-laitteet noudattavat kommunikoinnissa maailmanlaajuisesti määritettyä *IEC 61850 -standardia* (engl. *International Electrotechnical Commission*). Standardin tarkoituksena on määrittää yhteinen kommunikointiprotokolla ja säännöt aseman kaikkien eri laitteiden välille. Tarkoituksena on ehkäistä jokaista valmistajaa tuottamasta omia versioita ja protokollia omille laitteilleen. Standardia noudattamalla eri IED-laitteet pystyvät kommunikoimaan keskenään yhteisillä säännöillä [41, s. 624]. Standardi määrittää myös asemalta

tiedon saamisen mekanismit, joita aseman ulkopuolisen ohjelman täytyy noudattaa. Nämä määrittäykset ovat tämän työn kannalta tärkein osa standardia ja vaikuttavat hajautetun järjestelmän suunnitteluun. Standardi on määritetty niin, että laitteiden kommunikointi voi tapahtua monella eri teknisellä alustalla. Tässä työssä standardin määrittäyksiä käytetään ainoastaan TCP/IP-protokollaperheen päällä.

Diplomityön tekijä oli jo ennen tämän työn aloitusta Alsus Oy:ssä toteuttanut yksinkertaisen demo-ohjelmiston (engl. proof of concept). Ohjelmisto kykeni saamaan tietoa asemalta standardin mukaisesti ja tallentamaan sen tietokantaan. Toteutus oli puutteellinen ja siinä oli toimintaan liittyviä ongelmia, jotka haittasivat sen jatkokehitystä tuotantoon asti. Demon tarkoituksena oli opettaa tekijälle standardia ja sen mekanismeja ennen oikeaa toteutusta. Tässä työssä analysoidaan demon toimintaa ja sen ongelmia. Nämä tulokset yhdistetään aikaisemmin mainitun hajautetun järjestelmän suunnittelun kanssa. Lopputuloksena saadaan toimiva kokonaisuuden suunnitelma uudelle toteutukselle.

Tämän diplomityön rakenne alkaa pohjatietojen käsittelyllä. Ensin käsitellään IEC 61850-standardia ja sen toimintaa. Tämän jälkeen käydään läpi järjestelmän hajautusta ja siihen liittyviä kommunikointiparadigmoja. Pohjatietojen avulla analysoidaan erilaisia hajautuksen vaihtoehtoja ja mitkä niistä sopisivat tähän toteutukseen parhaiten. Tästä tuloksena on järjestelmän hajautukseen liittyvät tiedot, johon toteutus tähtää. Seuraavaksi työssä analysoidaan demon toimintaa ja sen ongelmia. Tuloksena on tietoa mitä täytyy ottaa huomioon uuden version toteutuksessa ja tekniikassa. Järjestelmän hajautuksen ja edellä mainitun demon analyysien perusteella suunnitellaan ohjelmistoarkkitehtuuri ja sen tekniikat. Toteutusosuus käsittelee ohjelmiston toteuttamista valituilla tekniikoilla. Työn lopussa arvioidaan ja pohditaan tuloksia asetettuihin tutkimuskysymyksiin ja miten tavoitteisiin päästiin. Lisäksi käsitellään myös toteutuksen tulevaisuutta ja mahdollisia vaihtoehtoisia toteutustapoja.

1.1 Vaatimukset

Diplomityön suunnittelulle ja toteutukselle asetettiin vaatimuksia, jotka ohjelmiston pitäisi pystyä täyttämään. Vaatimuksien tehtävä on asettaa työlle selvät tavoitteet mitä järjestelmään halutaan tuoda lisää. Diplomityön tehtävä on tiedon analyysin ja tutkimustyön kautta löytää sopivat menetelmät suunnitteluun ja sen toteutukseen. Asetettuja vaatimuksia käytetään pohjana työssä tehdyille päätöksille. Pohdintaosiossa vaatimuksilla arvioidaan työn tavoitteisiin pääsyä ja eri ratkaisuvaihtoehtoja. Kaikki vaatimukset oli asetettu jo ennen työn aloittamista tai sen alkuvaiheessa.

Ohjelmistolle asetettiin mm. seuraavia vaatimuksia:

- tieto saada IED-laitteelta IEC 61850 -standardin mukaisesti,
- tieto saada jaettua järjestelmässä siitä kiinnostuvien komponenttien kanssa,
- tiedon jaossa halutaan varautua tulevaisuuteen niin, että se olisi helposti saatavissa myös järjestelmän uusille komponenteille,

- muu järjestelmä ohjaa milloin tiedon haku IED-laitteelta aloitetaan ja lopetetaan,
- tietoa haluavien komponenttien määrä voi vaihdella tiedon hakemisen aloitusten välillä,
- komponenttien pitäisi saada ilmoitus uudesta tiedosta ilman erillistä kyselyä,
- tiedot puskuroidaan myöhempää käsittelyä varten jos komponentti ei kerkeä niitä heti käsitellä,
- komponentin pitää pystyä suodattamaan tietoa sen lähteen identiteetin (IED-laitteen) perusteella,
- tiedon jakamisen muoto pitää olla helposti ymmärrettävä osapuolten kesken,
- IED-laitteelta haluttu tiedon määrä voi vaihdella aloitusten välillä,
- tiedon välityksen tekniikka täytyy tukea verkkopalvelun tapauksessa TCP/IP-protokollamäärittäyksiä tai vastaavaa, ja
- tiedonsiirrossa lähetystakuu ei ole välttämättömyys.

Osa vaatimuksista tulevat muun järjestelmän toimintaperiaatteista ja kuinka sitä käytetään. Käyttäjän on tarkoitus pystyä ohjaamaan tiedon saantia ja määrää sähköasemilta käyttöliittymän kautta. Tästä seurauksena on vaatimus, jossa muun järjestelmän täytyy ohjata tiedon hakuun liittyviä osia. Uusien järjestelmän komponenttien kehitys halutaan pitää helppona. Tämän takia tiedon saamisen rajapinnat pitäisi suunnitella komponentissa helposti käytettäväksi. Rajapinnan pitäisi tarjota tieto helposti ymmärrettävässä muodossa, ilmoituksia uuden tiedon saapumisesta ja sen puskurointi. Komponentille pitää tarjota mahdollisuus erottaa tai saada tietoa IED-laitteen mukaan. Tämä sen takia, koska järjestelmä käsittelee paljon erilaisia IED-laitteita ja sähköasemia. Komponenttien pitää pystyä erottamaan mikä on tiedon alkuperä. Esimerkkinä tietyn IED-laitteen mittaustiedon näyttäminen. Tiedonsiirtoon ei alustavasti tarvittu lähetystakuuta tiedon tyypin takia (mittausdata). Uusi tieto korvaa edellisen lähetyksen tiedot. Kuitenkin olisi hyvä, jos toteutus mahdollistaisi tämän tulevaisuuden varalta. Muu järjestelmä ja sen osat ovat toteutettu web-applikaationa. Tästä tulee vaatimus, että tieto pitäisi onnistua kuljettamaan osapuolten välillä TCP/IP-protokollaperheen tai muun vastaavan avulla.

1.2 Tutkimuskysymykset

Ohjelmiston vaatimuksien lisäksi diplomityölle asetettiin selviä tutkimuskysymyksiä, joihin työn aikana yritetään etsiä vastausta. Tutkimuskysymykset liittyvät työhön korkealla tasolla ja käsittelevät sen kokonaisuudesta eri kohtia. Tutkimuskysymyksiä käytetään myös työn lopussa tuloksien pohdinnassa.

Työlle asetettiin seuraavat tutkimuskysymykset:

- *Mitkä eri hajautetun järjestelmän kommunikointiparadigmoista sopivat työn vaatimuksien asettaman ongelman ratkaisuun ja mitkä eivät?*

- *Minkälainen on hajautetun järjestelmän ohjelmistoarkkitehtuuri, joka täyttää asetetut vaatimukset?*
- *Järjestelmän hajautuksessa, mikä olisi sopiva tiedon jakamisen muoto eri osapuolten välillä?*
- *Mitkä olivat syyt demoversion suorituksen ongelmiin ja kuinka nämä estetään uudessa versiossa?*

2. MIKÄ ON IEC 61850 -STANDARDI?

Sähköasemilla nykypäivänä käytössä olevilla IED-laitteilla toteutetaan aseman toiminnallisuuden funktioita. Aseman toiminnallisuuteen liittyy sen kontrollointi ja suojaus. Aseman komponenttien suojauksen lisäksi, siihen kuuluu myös asemalta lähtevät sähkölinjat. Hyvä esimerkki sähköaseman suojauksesta on korkeajännitelinjan katkaisija, joka katkaisee virran linjasta vikatilanteissa. Tällainen vikatilanne on esimerkiksi linjan poikki meneminen kaatuneen puun tai pylvään takia. Fyysistä katkaisijaa ohjaa aseman automatiikka, joka toteutetaan IED-laitteilla. IED-laite voi olla kytketty fyysisesti ohjattavaan laitteeseen [26, s. 63–64]. Koko sähköaseman toiminnallisuus koostuu monesta eri funktiosta, jotka on jaettu monelle IED-laitteelle. Jotta systeemi pystyy toimimaan, täytyy IED-laitteiden kommunikoida keskenään ja vaihtaa informaatiota toistensa kanssa. IED-laitteiden täytyy myös kommunikoida asemalta ulospäin erilliselle ohjausasemalle monitorointia ja etäohjausta varten [9, s. 1]. On selvää, että monimutkaisen systeemin ja monen valmistajan kesken tarvitaan yhteiset säännöt kommunikointia varten.

Maailmanlaajuisesti asetettu IEC 61850 -standardi määrittää sähköaseman sisäisen kommunikoinnin säännöt IED-laitteiden välillä. Standardi määrittää myös säännöt asemalta lähtevään liikenteeseen, kuten toiselle sähköasemalle ja ohjausasemalle [26, s. 10]. Ilman yhteistä standardia, jokainen valmistaja olisi vapaa toteuttamaan omat säännöt ja protokollat kommunikointiin. Seurauksena olisi, että laitteet eivät olisi keskenään yhteensopivia eri valmistajien kesken. Standardin tarkoitus on poistaa yhteensopivuusongelmat ja määrittää yhteiset säännöt kommunikoinnin toteuttamiseen [35, s. 1].

Tärkeä ja iso osa standardia on sähköaseman systeemin funktioiden abstrahointi mallien kautta. Standardi määrittää tarkasti kuinka abstraktit mallit määritellään aseman oikeista laiteista ja niiden ominaisuuksista. Tarkoituksena on tehdä mallit tekniikasta ja toteutuksesta riippumattomaksi. Tämän jälkeen määritellään kuinka mallit toteutetaan erikseen toimivaksi jollekin tekniikalle. Abstrahoituja malleja käytetään myös määrittämään sähköaseman IED-laitteiden ja aseman muiden osien konfigurointi. Tekniikasta riippumattomien mallien ansiosta standardi on pohjana tulevaisuuden laajennoksille ja tekniikoille. Uusien tekniikoiden ilmaantuessa, voidaan standardiin lisätä osa, joka toteuttaa abstraktimallit kyseiselle tekniikalle [9, s. 2]. Tässä työssä standardin malleja ja palveluita käytettiin *MMS*-protokollan (engl. *Manufacturing Message Specification*) toteutuksella. *MMS*-protokolla on maailmanlaajuinen *ISO 9506* -standardi, joka on määritetty toimivaksi TCP/IP:n pinon päällä [43]. Jokainen verkkoon kytketty IED-laite tarvitsee IP-osoitteen kommunikointiin.

2.1 Standardin eri osat ja niiden merkitykset

IEC 61850 -standardi on laaja kokonaisuus. Tämän takia se on pilkottu erillisiin dokumentteihin, joista jokainen käsittelee omaa asiaansa. Historian saatossa standardiin on lisätty uusia dokumentteja laajentamaan standardia [31, 47] [24, s. 13]. Tämän työn kirjoitushetkellä standardiin kuului lisäksi paljon muitakin dokumentteja, esimerkiksi uusiin toteutuksiin muille tekniikoille ja vesivoimalaitoksien mallintamiseen liittyviä dokumentteja. Laajuudesta huolimatta standardin voi esittää 10:llä eri pääkohdalla ja näiden alakohdilla. Taulukossa 1 on esitetty standardin pääkohdan dokumentit ja niiden alkuperäiset englanninkieliset otsikot [31]. Tässä työssä tullaan viittaamaan standardin eri osiin, jotta lukija voi tarvittaessa etsiä tietoa asiasta tarkemmin.

Taulukko 1. IEC 61850 -standardin pääkohtien ja niiden alakohtien dokumentit, (pohjautuu taulukkoon [41, s. 2]).

Osa	Otsikko englanniksi
1	Introduction and overview
2	Glossary
3	General requirements
4	System and project management
5	Communication requirements for functions and device models
6	Configuration description language for communication in power utility automation systems related to IEDs
7-1	Basic communication structure - Principles and models
7-2	Basic information and communication structure - Abstract communication service interface (ACSI)
7-3	Basic communication structure - Common data classes
7-4	Basic communication structure - Compatible logical node classes and data object classes
8-1	Specific communication service mapping (SCSM) - Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3
9-2	Specific communication service mapping (SCSM) - Sampled values over ISO/IEC 8802-3
9-3	Precision time protocol profile for power utility automation
10	Conformance testing

Standardin ensimmäiset osat 1–5 kattavat yleistä kuvaa standardista ja sen vaatimuksista. Osiossa 6 käsitellään IED-laitteiden konfigurointiin käytetty *XML* (engl. *Extensible Markup Language*) -pohjainen kieli [25, s. 7–8]. Tämä osuus ei ole tämän työn kannalta tärkeä ja sitä ei sen tarkemmin käsitellä. Osat 7-1–7-4 käsittelevät standardin abstraktia mallia, niiden palveluita ja kuinka se rakentuu. Abstrahoidut palvelut ja mallit standardissa lyhennetään *ACSI* (engl. *Abstract Communication Service Interface*), ja samaa lyhennettä käytetään tässä työssä [26, s. 72]. Osissa 8–9 ja niiden alakohdissa käsitellään abstraktimallien toteuttamista erillisille protokollille, jolloin malleista tulee kyseisestä tekniikasta riippuvaisia. Tässä työssä käytettiin osaa 8-1, joka toteuttaa abstrahoidut mallit MMS-protokollalle. Osa 10 käsittelee testausmenetelmiä, joilla voidaan varmistaa standardin määritysten noudattaminen. Tämä osuus ei myöskään ole tämän työn kannalta tärkeä, ja sitä ei sen tarkemmin käsitellä. [26, s. 15]

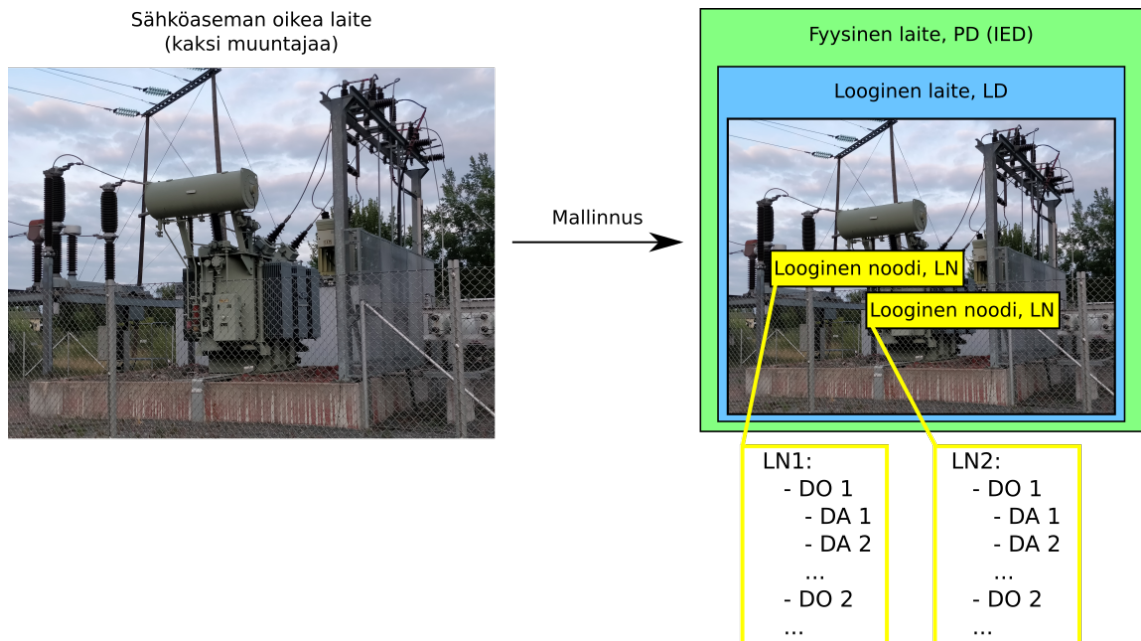
2.2 Abstraktimallin käsitteet ja niiden käyttö

IEC 61850 -standardin lähtökohtana on pilkkoa koko sähköaseman toiminnallisuuden funktiot pieniksi yksilöiksi. Pilkotut yksilöt abstrahoidaan ja pidetään sopivan kokoisina, jotta ne voidaan konfiguroida esitettäväksi erillisellä IED-laiteella. Yksi aseman funktio voidaan hajauttaa monelle eri IED-laitteelle. Esimerkiksi linjan suojaukseen liittyvät komponentit, katkaisija (engl. circuit breaker) ja ylivirtasuojaja (engl. overcurrent protection). Toimiakseen yhdessä, laitteiden täytyy vaihtaa informaatiota keskenään verkon yli [26, s. 31]. Standardi määrittää seuraavat käsitteet sähköaseman funktioiden mallintamiseen:

- *fyysinen laite* (engl. *physical device*, lyhennetään *PD*),
- *looginen laite* (engl. *logical device*, lyhennetään *LD*),
- *looginen noodi* (engl. *logical node*, lyhennetään *LN*),
- *dataobjekti* (engl. *data object*, lyhennetään *DO*),
- *data-attribuutti* (engl. *data attribute*, lyhennetään *DA*).

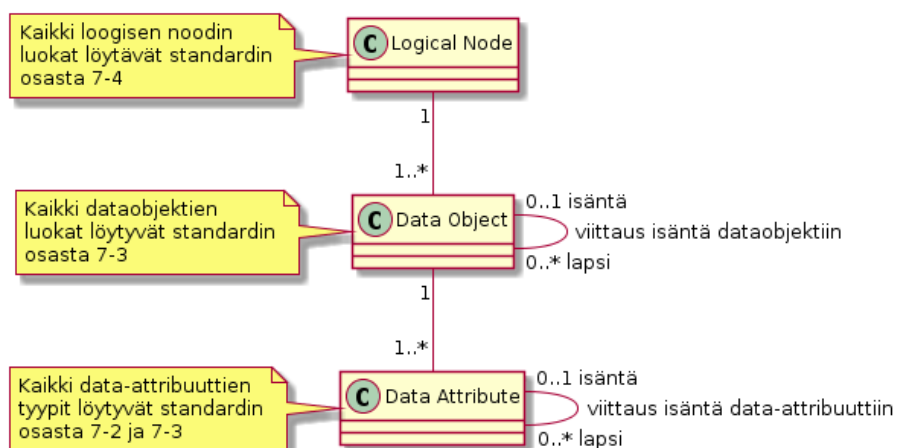
Yllä listatut käsitteet muodostavat mallista hierarkkisen puurakenteen ja ne on listattu hierarkkisessa järjestyksessä. Hierarkian juurena on fyysinen laite, sen alla voi olla yksi tai useampi looginen laite, loogisen laitteen alla yksi tai useampi looginen noodi jne. Käsitteillä standardissa virtualisoidaan aseman funktiot, esimerkiksi suojaus. Kuvassa 1 on esitetty, kuinka sähköaseman fyysiset laitteet voidaan mallintaa standardin määrittämillä käsitteillä. Samaa periaatetta käytetään kaikille aseman laitteille. Kuvassa 1 ensin uloimpana on fyysinen laite, joka ohjaa aseman oikeita laitteita ja tarkkailee niiden toimintaa. Tämä laite voi olla IED-laite, joka on myös samalla kytketty aseman verkkoon ja sillä on IP-osoite. Yksi IED-laite voi olla samaan aikaan kytkettynä aseman moneen muuhun oikeaan laitteeseen. Tämän jälkeen mallinnetaan aseman joukko laitteita loogiseksi laitteeksi. Tällainen voi esimerkiksi olla tietyn jännitetasen (engl. bay) komponentit, kuten katkaisijat, muuntajat jne. Kuvassa kaksi muuntajaa on mallinnettu yhdeksi loogiseksi laitteeksi, koska ne kuuluvat samaan jännitetasoon. Looginen laite koostuu loogisista noodeista. Looginen noodi mallintaa jotakin aseman ohjattavaa yksittäistä laitetta. Kuvassa kaksi muuntajaa mallinnetaan loogisiksi noodeiksi. Jotta oikeaa fyysistä muuntajaa voidaan kuvata mallilla, täytyy siitä pystyä esittämään mitattavia tai kuvaavia arvoja. Tällaisia arvoja ovat esimerkiksi mitatut jännitteen arvot. Näihin tarkoituksiin käytetään käsitteitä dataobjekti ja data-attribuutti. Looginen noodi koostuu dataobjekteista ja dataobjekti koostuu data-attribuuteista. Data-attribuutti esittää yhtä mitattavaa tai kuvaavaa arvoa laitteesta, esimerkiksi sen hetkinen jännite tai laitteen tila. Dataobjekti on tapa koostaa yhteen kuuluvat data-attribuutit saman käsitteen alle, esimerkiksi mittaukseen tai ohjaukseen liittyvät data-attribuutit. [13, s. 2] [24, s. 24]

IEC 61850 -standardin käsitteiden avulla sähköaseman laitteet ja funktiot voidaan esittää malleilla. Malleja voidaan käyttää IED-laitteiden konfiguroinnin määrittämiseen ja tieto-



Kuva 1. Sähköaseman fyysisten laiteiden abstrahointi IEC 61850 -standardin käsitteillä (pohjautuu kuvaan [26, s. 17]).

na, jotka voidaan siirtää verkon yli laitteelta toiselle. Jotta käsitteitä voidaan käyttää konfigurointiin ja kommunikointiin, standardi määrittää lisää tarkkuutta käsitteisiin ja kuinka niitä käytetään. MMS-protokollan kanssa fyysinen laite -käsite yksilöidään IP-osoitteella. Tämä käsite on olemassa standardissa, jotta oikea laite voidaan pitää abstraktina toteutettavasta tekniikasta. Muut käsitteet, eli looginen laite, looginen noodi, dataobjekti ja data-attribuutti määritellään standardissa luokilla tai tyypeillä. Kuvassa 2 olevassa luokkakaa-viossa on esitetty kuinka käsitteet muodostavat hierarkian toisistaan ja mistä standardin osasta käsitteen mallit löytyvät. Huomiona että dataobjektit ja data-attribuutit voivat viitata itseensä. Esimerkkinä dataobjekti voi sisältää myös alidataobjektin, joka taas sisältää data-attribuutteja. [27, s. 20–22]



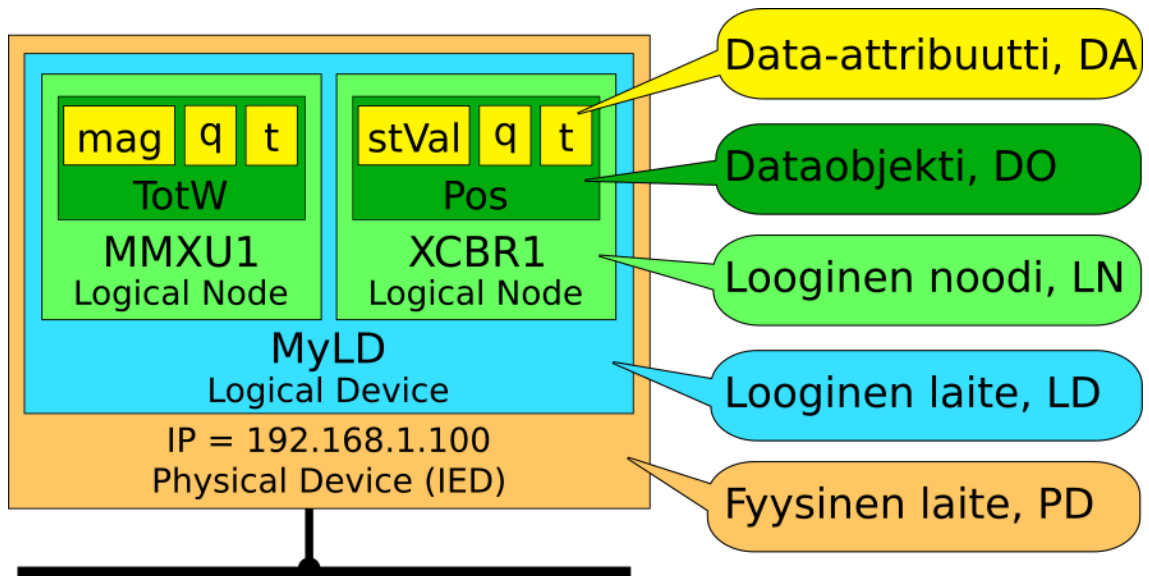
Kuva 2. IEC 61850 -standardissa määritettyjen luokkien hierarkia (pohjautuu kuvaan [27, s. 17]).

Looginen laite ja noodi yksilöidään nimillä, jotka ovat yksilöllisiä IED-laitteessa. Standardi asettaa rajoitteita nimeämiseen kuten pituuden. Looginen noodi esitetään IED-laitteella jonkin standardissa määritetyn luokan instanssina. Standardin osassa 7-4 määritellään valmiita luokkia käytettäväksi eri laitteiden esittämiseen. Esimerkiksi katkaisija on määritetty luokkaan tyypiltään *XCBR* (engl. circuit breaker) [29, s. 105–106]. Sähköaseman insinööri, joka konfiguroi IED-laitteen, määrittää konfiguraatiodostossa, että kytketty katkaisija esitetään *XCBR*-luokan instanssina ja nimeää sen standardin ohjeiden mukaan. Näin IED-laite tietää mitä laitetta se esittää ja ohjaa. IED-laitteessa kaikki eri luokkien instanssit yksilöidään nimillä ja niitä käytetään, kun olioon viitataan esimerkiksi palvelukutsulla tai konfiguraatiolla. Looginen noodi koostui dataobjekteista. Standardissa dataobjektit ovat myös määritetty luokilla, joista tehdään instansseja. Loogisen noodin luokan tyyppi määrittää mitä dataobjektin luokista tehdään instansseja ja millä nimellä ne esitetään. Toisin sanoen, aseman insinööri voi valita käytettävän loogisen noodin instanssin nimen, mutta ei voi valita sen dataobjektin nimeä. Standardi määrittää dataobjektien luokkien tyypit standardissa osassa 7-3. Dataobjekti koostuu data-attribuuteista, kuten loogisen noodin luokka koostuu dataobjekteista. Dataobjektin luokka määrittää käytettävät data-attribuutit ja niiden nimet. Kuitenkaan tällä kertaa data-attribuutti ei välttämättä ole luokka. Data-attribuutit voivat olla primitiivisiä tyyppejä, kuten *integer* ja *float*. Ne voivat myös olla ns. *rakennettuja data-attribuutteja* (engl. *constructed attribute classes*), jotka pitävät sisällään tarkempia data-attribuutteja. Hyvä esimerkki on data-attribuutti nimeltään *q*, jonka tyyppi on *Quality*. Standardin mukaan tällä tyypillä on vielä aliattribuutteina mm. *validity*, *detailQual* jne [28, s. 11]. Tämä on esitetty kuvassa 2 data-attribuutin itseensä viittauksella. Myös dataobjekti voi sisältää alidataobjekteja, jonka alla on taas omat data-attribuutit. Kappaleessa 2.3 käydään tarkemmin läpi, kuinka luokkien hierarkia standardissa rakentuu. [24, 26, 27, 28]

2.3 Loogisen noodin luokkien ja attribuuttien rakentuminen

IEC 61850 -standardissa kaikki luokat määritellään taulukoilla, joissa on standardoitu kentän nimi, tyyppi, selitys ja onko se valinnainen. Tässä kappaleessa mennään syvemmälle luokkien määrittämiseen. Lisäksi esitetään esimerkkinä, kuinka standardin pohjalta tehty loogisen noodin instanssi ja sen alla olevat dataobjektit ja data-attribuutit rakentuvat. Esimerkissä käytetään kuvan 3 rakennetta. Nimet ja luokkien instanssit konfiguroidaan IED-laitteelle XML-pohjaisella konfiguraatiodostolla. Tämä määritellään standardin osassa 6. Kuvassa 3 fyysinen laite on IED-laite ja siihen verkossa viitataan IP-osoitteella 192.192.1.100. IED-laitteelle on konfiguroitu looginen laite nimeltä *MyLD*. Eri loogiset laitteet IED-laitteella yksilöi vain sen nimi. Loogisella laitteella on kaksi instanssia loogisen noodin luokista nimillä *MMXU1* ja *XCBR1*. *MMXU1*-instanssi on tyyppiä *MMXU* (engl. measurement) [29, s. 57–58] ja *XCBR1* on tyyppiä *XCBR* (engl. circuit breaker). Kyseessä on siis vastaavasti mittaukseen liittyvä laite ja aikaisemmin mainittu linjan katkaisija. *XCBR1* loogisella noodilla on dataobjekti nimeltään *Pos* (engl. position), joka on tyyppiä *DPC* (engl. controllable double point). Ja *MMXU1* nimeltään *TotW*

(engl. total active power), joka on tyyppiä *MV* (engl. measured value). Loogisilla noodeilla on määritetty enemmänkin dataobjekteja eri nimillä, mutta kuvassa 3 on esitetty vain yhdet yksinkertaisuuden takia. Pos-dataobjektilla on data-attribuutit nimeltään *stVal*, *q* ja *t*. Ja TotW-dataobjektilla on data-attribuutit *mag*, *q* ja *t*. Esimerkin data-attribuutti *q* on tyyppiä *Quality*, jolla on alidata-attribuutteja ja attribuutti *StVal* on tyyppiä *boolean*. [28, 29]



Kuva 3. Standardin käsitteiden hierarkkinen rakenne ja niiden nimeämisen esimerkki (pohjautuu kuvaan [24, s. 24]).

Standardissa osassa 7-4 on lista kaikista sen määrittämistä loogisen noodin luokista eri tarkoituksiin. Taulukossa 2 on esitetty XCBR-luokan määrittäminen. Taulukosta voi nähdä luokan instanssille määritetyt kenttien nimet ja viimeinen sarake M/O/C, kertoo, onko kenttä pakollinen (Mandatory, M), valinnainen (Optional, O), vai ehdollinen (Conditional, C). Taulukosta voi nähdä kuvan 3 esimerkin XCBR1-instanssin dataobjektin nimeltä Pos ja sen tyyppin DPC. Standardissa dataobjektien luokkia kutsutaan *yleisiksi luokiksi* (engl. *Common Data Class*, lyhennetään *CDC*). Dataobjektin luokkia voidaan käyttää rakentamaan monta eri loogisen noodin luokkaa. Tämän takia dataobjektin luokkia standardissa kutsutaan nimellä *yleiset luokat*. Dataobjektin luokkien on tarkoitus kerätä yhteen samaan asiaan liittyvät data-attribuutit. CDC-luokkien määrittäykset löytyvät standardin osasta 7-3 [24, s. 26]. Joillakin CDC-luokkien attribuutteina voi olla vielä muita CDC-luokkia. Tällöin standardissa puhutaan *yleisistä aliluokista* (engl. *sub data object*). Tämä esiteltiin myös aikaisemmin kuvassa 2 olevalla dataobjektin itseensä viittauksella. Esimerkkinä tästä on CDC-luokka *WYE*, jolla on attribuuttina *phsA* niminen kenttä, joka on tyyppiä *CMV*. *CMV* on CDC-luokka, jolla on taas omat data-attribuutitnsa. [27, s. 51,61] [28, s. 36]

Taulukossa 3 on DPC-luokan määrittäminen. DPC-luokan instanssi esiintyy nimellä Pos ja on myös XCBR-luokan attribuutti. Taulukosta voi nähdä kuvan 3 esimerkissä esitetyt data-attribuutit *stVal*, *q* ja *t* ja niiden tyytit. Attribuuttien tyyppejä on paljon enemmänkin ja

Taulukko 2. IEC 61850 -standardin katkaisijaluokan XCBR -määrittäminen (pohjautuu taulukkoon [29, s. 105–106]).

Dataobjektin nimi	Englanniksi	CDC-luokka	M/O/C
Selitys			
EEName	External equipment name plate	DPL	O
Tila informaatio			
EEHealt	External equipment health	ENS	O
LocKey	Local or remote key	SPS	O
Loc	Local control behaviour	SPS	M
OpCnt	Operation counter	INS	M
CBOpCap	Circuit breaker operating capability	ENS	O
POWCap	Point on wave switching capability	ENS	O
MaxOpCap	Circuit breaker operating capability	INS	O
Dsc	Discrepancy	SPS	O
Mitatut arvot			
SumSwARs	Sum of switched amperes, resettable	BRC	O
Kontrollit			
LocSta	Switching authority at station level	SPC	O
Pos	Switch position	DPC	M
BlkOpn	Block opening	SPC	M
BlkCls	Block closing	SPC	M
ChaMotEna	Charger motor enabled	SPC	O
Asetukset			
CBTmms	Closing time of breaker	ING	O

lukija voi tarvittaessa tarkistaa kaikki tyypit standardista. Tällä periaatteella standardi rakentaa kaikki muutkin luokat hierarkkisesti. Määrittämisavulla voidaan selvittää mitä dataobjekteja looginen noodi sisältää, ja mitä data-attribuutteja dataobjekti sisältää. Taulukossa 3 on myös määritetty data-attribuuttien *funktionaaliset rajoitteet* (engl. *Functional Constraint*, lyhennetään *FC*), sekä mahdolliset *liipaisimet* (engl. *trigger options*, lyhennetään *TrgOp*). Funktionaaliset rajoitteet käsitellään tarkemmin kappaleessa 2.5 ja liipaisimet kappaleessa 2.6.

Kaikkien yllämainittujen luokkien kenttien määrittämisestä lisäksi standardi määrittää palveluita jokaiselle luokkatyypille erikseen. Palvelut ovat abstrahoituja rajapintafunktioita, joille määritellään pyynnöt ja vastaukset. Standardin osa joka määrittää tekniikan toteutuksen, määrittää myös kuinka palvelut sillä toimivat. Tässä työssä esimerkkinä MMS-protokollan määrittäminen, eli osa 8-1. Esimerkkinä palveluista kaikille dataobjekteille on mm. *GetDataValues*, joka palauttaa kaikki dataobjektin attribuuttien arvot. *SetDataValues* kirjoittaa annetut data-attribuuttien arvot. Ja *GetDataDirectory* palauttaa kaikki data-attribuuttien viitteet kyseisessä dataobjektista. Näitä ja muita abstrahoituja malleja viitataan standardissa lyhenteellä *ACSI* (engl. *Abstract Communication Service Interface*). [27, s. 15, 45–46] [26, s. 26]

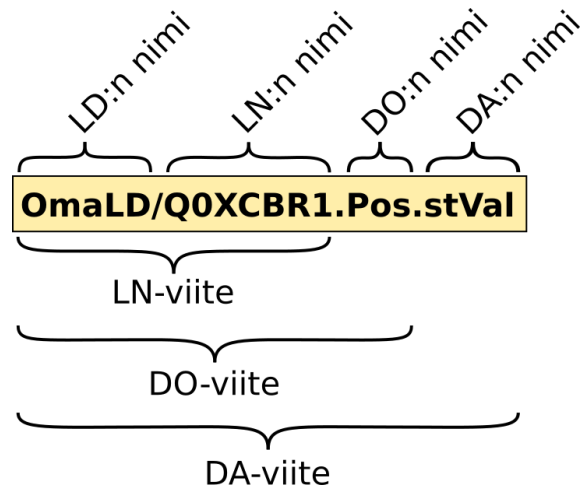
Taulukko 3. IEC 61850 -standardin DPC-luokan määrittäminen ja instanssin nimi on Pos (pohjautuu taulukkoon [28, s. 44]).

Data-attribuutin nimi	Tyyppi	FC	Liipaisin (TrgOp)
Tila ja ohjaus			
origin	Originator	ST	
ctlNum	INT8U	ST	
stVal	CODEC ENUM	ST	dchg
q	Quality	ST	qchg
t	TimeStamp	ST	
stSeld	BOOLEAN	ST	dchg
opRcvd	BOOLEAN	OR	dchg
opOk	BOOLEAN	OR	dchg
tOpOk	TimeStamp	OR	
Vaihtoehtoinen ja estäminen			
subEna	BOOLEAN	SV	
subVal	CODED ENUM	SV	
subQ	Quality	SV	
subID	VISIBLE STRING64	SV	
blkEna	BOOLEAN	BL	
Asetukset, selitys ja laajennos			
pulseConfig	PulseConfig	CF	dchg
ctlModel	CtlModels	CF	dchg
sboTimeOut	INT32U	CF	dchg
sboClass	SboClasses	CF	dchg
operTimeout	INT32U	CF	dchg
d	VISIBLE STRING255	DC	
dU	UNICODE STRING255	DC	
cdcNs	VISIBLE STRING255	EX	
cdcName	VISIBLE STRING255	EX	
dataNs	VISIBLE STRING255	EX	

2.4 Attribuuttien viittaus hierarkiassa

IEC 61850 -standardi määrittää erilaisia palvelukutsuja eri luokkatyypeille. Palvelukutsuilla voidaan mm. asettaa ja lukea arvoja IED-laitteen hierarkiassa. Standardi määrittää viittausformaatin, joka mahdollistaa instanssien viittaamisen IED-laitteen hierarkiassa. Määritettyä viittausta käytetään palvelukutsujen yhteydessä määrittämään mitä instansseja kutsu koskee. Viitteen lisäksi aikaisemmin mainittu funktionaalinen rajoite kertoo mihin data-attribuutteihin kutsu kohdistuu. Funktionaalinen rajoite mahdollistaa monen instanssin viittaamisen hierarkiassa samalla kertaa. Seurauksena on, että yhdellä palvelukutsulla voidaan kirjoittaa tai lukea monta eri data-attribuuttia. Tämä tullaan käsittelemään tarkemmin kappaleessa 2.5. Kuvassa 4 on esitetty kuinka standardi määrittää viitteen muodostumisen loogisesta laitteesta data-attribuuttiin asti. [41, s. 625–626]

Viite muodostuu suoraan laitteessa olevien luokkien instanssien nimien ja hierarkian mukaan. Loogisen laitteen (*LD*) ja loogisen noodin (*LN*) erottimena käytetään *kauttaviivaa* (/), ja muiden osien erottimena käytetään *pistettä* (.). Loogisella laitteella on aseman in-



Kuva 4. IEC 61850 -standardin määrittämä viitteen rakenne (pohjautuu kuvaan [26, s. 93]).

sinöörin määrittämä alle 65-merkkinen nimi. Muuten loogisen laitteen nimeen standardi ei puutu. Loogisen noodin instanssin nimi koostuu alku-, keski- ja loppuosasta. Alkuosan voi insinööri itse päättää. Esimerkiksi kuvassa 4 loogisen noodin nimestä Q0 on alkuosa. Nimen täytyy alkaa kirjaimella, mutta se voi sisältää myös numeroita. Keskiosan täytyy olla loogisen luokan nimi, josta instanssi on tehty. Tässä tapauksessa jo aikaisemmin mainittu katkaisijan luokka, XCBR. Tämä osuus on aina 4 kirjainta pitkä ja aina isoilla kirjaimilla. Loppuosa on instanssin numeerinen arvo, joka ei sisällä kirjaimia. Insinööri voi itse päättää loppuosan, jonka ei tarvitse välttämättä olla juokseva numero. Esimerkiksi kuvassa 4 loogisen noodin nimen loppuosa on 1. Alku- ja loppuosan yhteenlaskettu merkkien pituus täytyy olla alle 13 merkkiä, eli koko loogisen noodin nimen pituus voi olla maksimissaan 17 merkkiä. Dataobjektien (DO) ja attribuuttien (DA) niminä käytetään standardin määrittämiä nimiä, jotka määritetään niitä vastaavissa luokissa osissa 7-3 ja 7-4 (katso taulukot 2 ja 3). Riippuen viittauksesta, näistä muodostuu loogisen noodin viite, dataobjektin viite ja data-attribuutin viite. Dataobjekti voi pitää sisällään toisen dataobjektin kuten aikaisemmin kuvassa 2 esitettiin. Viittausta jatketaan liittämällä instanssien nimiä toisiinsa pisteellä aina data-attribuuttiin asti. Samoin toimitaan, kun data-attribuutti on tyypiltään rakennettu tyyppi, kuten Quality, jolla on alidata-attribuutteja. [27, s. 181–182] [26, s. 93–95]

Standardissa määritetään kaksi näkyvyysaluetta (engl. scope) viittaukselle, jotka ovat palvelin- ja looginen laite -näkyvyysalueet. Palvelin tarkoittaa tässä yhteydessä verkkoon kytkettyä laitetta, eli IED-laitetta. Palvelimen näkyvyysalueelle viitataan ottamalla viittauksesta pois loogisen laitteen nimi. Eli kuvassa 4 viittaus tulisi muotoon /Q0XCBR1.-Pos.stVal. Edellä mainittua viittausta käytetään silloin, kun loogisen noodin instanssi sijaitsee loogisen laitteen ulkopuolella, mutta kuitenkin palvelimella. Loogisen laitteen näkyvyysalueessa viittaus sisältää loogisen laitteen nimen ennen kauttaviivaa, toisin kuin palvelimen näkyvyysalueessa. Esimerkiksi kuvassa 4 oleva viittaus OmaLD/Q0XCBR1.-Pos.stVal. Loogisen laitteen näkyvyysaluetta käytetään silloin kun loogisen noodin ins-

tanssi sijaitsee loogisen laitteen sisällä sen hierarkiassa. Tässä työssä jatkossa käytetään pelkästään loogisen laitteen -näkyvyysaluetta. [27, s. 183]

Standardi määrittää viittausten maksimipituuden. Pituusmääritykset ovat voimassa kummallekin edellä mainitulle näkyvyysalueelle. Ennen kauttaviivaa saa olla maksimissaan 64 merkkiä. Tämän jälkeen kauttaviiva, josta seuraa uudelleen maksimissaan 64 merkkiä. Eli koko viittauksen maksimipituus saa olla enintään 129 merkkiä, kauttaviiva mukaan lukien. [27, s. 24,183]

2.5 Attribuuttien funktionaalinen rajoite ja niistä muodostetut datajoukot

Standardin CDC-luokat määrittävät käytettävät data-attribuutit (katso taulukko 3). Nämä luokat määrittävät myös jokaiselle data-attribuutille aikaisemmin mainitun *funktionaalisen rajoitteen* (engl. *functional constraint*, lyhennetään *FC*). Funktionaalinen rajoite kuvaa attribuutin käyttötarkoitusta, ja sen mitä palveluita attribuuttiin voidaan käyttää. Esimerkiksi kaikilla attribuuteilla, jotka liittyvät laitteen tilaan on funktionaalinen rajoite *ST* (engl. *status information*). Standardi määrittää paljon erilaisia funktionaalisia rajoitteita, jotka ovat kaikki kahden ison kirjaimen yhdistelmiä. Taulukossa 4 on esitetty joitain tärkeimpiä funktionaalisia rajoitteita. Funktionaalinen rajoite määrittää myös, onko attribuutti kirjoitettava tai luettava. [27, s. 53–55]

Taulukko 4. Osa IEC 61850 -standardin määrittämistä funktionaalisista rajoitteista, lyhennetään *FC* (ote taulukosta [27, s. 54]).

Lyhenne	Selite	Luettava	Kirjoitettava
ST	Laitteen tilatieto (status)	Kyllä	Ei
MX	Mittaustieto (measurands)	Kyllä	Ei
CF	Laitteen asetusarvo (configuration)	Kyllä	Kyllä
DC	Selitystieto (description)	Kyllä	Kyllä

Funktionaalista rajoitetta käytetään IED-laitteelle tehdyssä kutsussa viitteen kanssa rajoittamaan mitä data-attribuutteja tehty kutsu koskee. Tästä tulee nimi funktionaalinen rajoite. Funktionaalinen rajoite on pakollinen tieto kutsuissa, jotka lukevat tai kirjoittavat arvoja. Seuraavaksi esitetään esimerkki, kuinka yhdellä kutsulla viitataan moneen data-attribuuttiin. Esimerkkinä otetaan kuvassa 4 olevasta viitteestä osa, joka viittaa dataobjektiin. Eli OmaLD/Q0XCBR1.Pos, jolloin viite on DO-viite. Kutsun vaikutusalue on aina hierarkiassa alaspäin. Eli nyt viitteellä viitataan Pos-dataobjektin kaikkiin alla oleviin data-attribuutteihin. Katso taulukko 3, jossa on esitetty kaikki Pos-dataobjektin alla olevat data-attribuutit. Huomiona, jos viittauksen alla olisi alidataobjekteja, niidenkin data-attribuutit kuuluisivat viittauksen piiriin. Viittauksen vaikutuksen voi siis ajatella jatkuvan viittauskohdasta alaspäin hierarkiassa kaikkiin ali-instansseihin. Funktionaalista rajoitetta käytetään rajoittamaan/suodattamaan kaikista viitatuista data-attribuuteista ne, jotka halutaan kirjoittaa tai lukea. Esimerkkinä jos kutsuun viitteellä OmaLD/Q0XCBR1.Pos

lisättäisiin funktionaalinen rajoite ST, rajoitettaisiin kutsu koskemaan Pos-dataobjektin alidata-attribuuteista vain niitä attribuutteja, joilla on funktionaalinen rajoite ST. Taulukossa 5 on esitetty esimerkkinä ne data-attribuutit, joita kutsu viittaisi. Taulukon attribuutit ovat samat kuin Pos-dataobjektin attribuutit taulukossa 3. Eli taulukon 5 mukaan, attribuutit olisivat origin, ctlNum, stVal, q, t ja stSeld. Muut data-attribuutit suodatetaan pois kutsun vaikutuksesta. Sama suodatus tapahtuu hierarkiassa alaspäin kaikille alidataobjekteille ja alidata-attribuuteille. Esimerkissä olevat attribuutit voisi vain lukea, ei kirjoittaa. Tämä sen takia, että taulukon 4 mukaan funktionaalinen rajoite ST sallii vain lukemisen. IEC 61850 -standardissa määritetään funktionaalinen rajoite XX, joka on sama kuin mikä tahansa muu funktionaalinen rajoite. Kuitenkin standardin osassa 8-1, joka tekee toteutuksen MMS-protokollalle, tämä ei ole tuettu toiminnallisuus. Eli toisin sanoen, jos MMS-protokollan kanssa halutaan lukea kaikki yhden dataobjektin data-attribuutit, joudutaan tekemään kutsu jokaista dataobjektin funktionaalista rajoitetta kohti. MMS-protokollan määrittämisessä ei määritetä kutsua, jolla pystyisi lukemaan vain yhden dataobjektin kaikki data-attribuutit. Monta erillistä kutsua tarvitaan. [27]

Taulukko 5. Pos-dataobjektista viitteellä *OmaLD/Q0XCBRI.Pos* ja funktionaalisella rajoitteella ST viitattut data-attribuutit.

Data-attribuutin nimi	FC	Viittaa
origin	ST	kyllä
ctlNum	ST	kyllä
stVal	ST	kyllä
q	ST	kyllä
t	ST	kyllä
stSeld	ST	kyllä
opRcvd	OR	ei
opOk	OR	ei
tOpOk	OR	ei
subEna	SV	ei
subVal	SV	ei
subQ	SV	ei
subID	SV	ei
blkEna	BL	ei
pulseConfig	CF	ei
ctlModel	CF	ei
sboTimeOut	CF	ei
sboClass	CF	ei
operTimeout	CF	ei
d	DC	ei
dU	DC	ei
cdcNs	EX	ei
cdcName	EX	ei
dataNs	EX	ei

Viittauksen ja funktionaalisen rajoitteen avulla siis suodatetaan hierarkiassa alaspäin olevia dataobjekteja ja data-attribuutteja. IEC 61850 -standardissa on määritetty nimityk-

set käytettäväksi, kun jotakin viittausta suodatetaan funktionaalisella rajoitteella. Nämä ovat FCD (engl. *Functional Constrained Data*) ja FCDA (engl. *Functional Constrained Data Attribute*). Nämä nimitykset ovat standardissa vain käsite ja niitä käytetään, kun asiasta mainitaan. Taulukossa 6 on esitetty viittauksia eri tyyppisiin instansseihin funktionaalisella rajoitteella. Taulukosta selviää, onko viitattu instanssi dataobjekti (DO) vai data-attribuutti (DA). Myös sen instanssin tyyppi ja käytetty nimitys viittaukselle FCD tai FCDA. Viitteestä käytetään FCD-nimitystä vain silloin kun hierarkian ensimmäistä dataobjekti rajoitetaan funktionaalisesti. FCDA-nimitys on käytössä kaikille muille viittauksille hierarkiassa alaspäin, joita rajoitetaan funktionaalisesti. Huomaa taulukossa 6 viittaus OmaLD/MMXU1.PhV.phsA, joka viittaa PhV dataobjektin alidataobjektiin. Tämä on FCDA-viittaus, vaikka kyseessä onkin dataobjekti. Ainoa ero FCD:n ja FCDA:n viittausten välillä on vain se, että FCD-viittaus on aina vain hierarkian ensimmäiseen dataobjektiin ja FCDA-viittaus siitä alaspäin hierarkiassa. [27, s. 55] [30, s. 63]

Taulukko 6. Viitteen nimeäminen lyhenteellä funktionaalisen rajoitteen kanssa.

FC	Viite	Instanssi	Tyyppi	Nimitys
ST	OmaLD/XCBR1.Pos	DO	DPC	FCD
ST	OmaLD/XCBR1.Pos.t	DA	TimeStamp	FCDA
ST	OmaLD/XCBR1.Pos.ctlNum	DA	INT8U	FCDA
MX	OmaLD/MMXU1.PhV	DO	WYE	FCD
MX	OmaLD/MMXU1.PhV.phsA	DO	CMV	FCDA
MX	OmaLD/MMXU1.PhV.phsA.t	DA	TimeStamp	FCDA

Funktionaalista rajoitetta käytetään viitteen kanssa suodattamaan viitatusista kohdasta alaspäin kaikki data-attribuutit. Tätä toiminnallisuutta käytetään hyväksi, kun tehdään kirjoittavia tai lukevia kutsuja ja rajoitetaan kutsulla vaikutettavia data-attribuutteja. Tätä samaa mekanismia käytetään hyväksi, kun IED-laitteeseen määritellään *datajoukkoja*. IEC 61850 -standardissa datajoukko koostuu joukosta IED-laitteessa olemassa olevista data-attribuuteista. Datajoukko on tapa koostaa yhteen kiinnostavat data-attribuutit IED-laitteelta. Datajoukko nimetään ja sijoitetaan IED-laitteen hierarkiaan. Näin siihen voidaan viitata kutsuilla, kuten mihin tahansa muuhun hierarkian instanssiin. Datajoukot IED-laitteelle rakennetaan käyttämällä FCD- ja FCDA-viitteitä. Datajoukko koostuu siis joukosta FCD- ja FCDA -viitteistä. Jokaisella viitteellä on jokin funktionaalinen rajoite, joka suodattaa viitteen alla olevat attribuutit ja sisällyttää ne kyseiseen datajoukkoon. Esimerkkinä datajoukon rakentamisesta taulukon 6 viitteet. Näistä viitteistä voitaisiin rakentaa oikea standardin mukainen datajoukko, nimetä se nimellä Testi1, ja lisätä IED-laitteen hierarkiaan kohtaan OmaLD/LLN0.Testi1. Nyt datajoukkoon voisi viitata ja vaikka lukea kaikki sen arvot yhdellä kertaa. Jotta datajoukko saadaan näin tehtyä, tieto tästä pitäisi lisätä IED-laitteen asetustiedostoon. Datajoukkoja IED-laitteessa käytetään muodostamaan joukkoja tärkeistä data-attribuuteista, joita voidaan esimerkiksi lukea ja kirjoittaa yhdellä kutsulla. Datajoukkoja käytetään myös tilattavien *viestien sisältönä*. Viestejä voi standardin mukaan tilata vain datajoukoista olevista data-attribuuteista. [27, s. 61–68]

2.6 Viestien tilaus ja tilauksen konfigurointi

IEC 61850 -standardi määrittää, kuinka IED-laitteen ulkopuolinen ohjelma voi tilata kiinnostavien data-attribuuttien arvoja verkon yli. Viesti voidaan esimerkiksi lähettää tilaajalle, kun mitatun jännitteen arvo muuttuu. Kyseessä on tilaaja-julkaisija-arkkitehtuurimalli, jossa ulkopuolinen ohjelma on tilaaja ja IED-laite julkaisuja. Standardi määrittää, että viestejä voidaan tilata vain datajoukoissa viitatuilla data-attribuuteilta. Viestien lähetyksen tiheys riippuu siitä, kuinka tilauksen yhteydessä tilaaja asettaa *liipaisimet*. Standardissa määritellään käytettäväksi erilaisia liipaisimia, joilla tilaaja voi muokata millä ehdoilla viesti pitäisi lähettää. Standardissa on myös määritetty mekanismit, joilla tilaajaa voi pyytää kaikki arvot kerralla tai tilata jaksottaisia viestejä tietyn aikavälein. [26]

Standardissa määritetään luokka, jonka tehtävä on hoitaa tilausta ja sen asetuksia. Tässä kappaleessa käydään läpi luokan yleistä toiminnallisuutta. Kappaleessa 2.7 käsitellään luokan attribuutteja ja toimintaa tarkemmin. Niin kuin muutkin luokat standardissa, siitä tehdään instanssi, sille annetaan yksilöivä nimi ja se lisätään IED-laitteen hierarkiaan. Nämä määritellään IED-laitteen asetustiedostossa, kuten kaikki muutkin instanssit. Yksilöivän nimen avulla tilaaja voi viitata kutsulla instanssiin, muuttaa luokan asetuksia ja aloittaa tilauksen. Nämä luokat standardissa ovat *puskuroitu viestintäluokka* (engl. *Buffered Report Control Block*, lyhennetään *BRCB*) ja *ei puskuroitu luokka* (engl. *Unbuffered Report Control Block*, lyhennetään *URCB*). Tekstissä kumpaakin luokkaan viitattaessa käytetään lyhennettä *RCB*. Ainoa ero luokkien toiminnan välillä on, että *BRCB* puskuroi viestejä jonkin aikaa yhteyden katkettua. Yhteyden palautuessa, se lähettää puskuroidut viestit järjestyksessä asiakkaalle. *BRCB* takaa viestien järjestyksen ja saatavuuden. *URCB* lähettää viestejä asiakkaalle ilman puskurointia ja viestit menetetään yhteyden katketessa. Standardissa määritetään, että yksi *RCB*-instanssi voi palvella vain yhtä tilaajaa kerrallaan. IED-laitteeseen täytyy määrittää instansseja sen tilaajien määrän mukaan. [27, s. 93]

Sekvenssikaaviossa 5 on esitetty tilaajan ja IED-laitteella olevan *BRCB*-instanssin välinen viestien tilauksen prosessi. Kaaviossa ensin asiakas tilaa puskuroidun *BRCB*-instanssin (kohdat 1–2). Ensimmäisessä kutsussa tilaaja kirjoittaa *BRCB*-luokan arvot, kuten käytettävät liipaisimet jne. Kutsussa tilaajan on merkittävä *RCB*-instanssi varatuksi, jotta tilaus käynnistyy. *BRCB* aloittaa viestien julkaisun tilaajalle määritettyjen ehtojen mukaan (kohdat 3–4). Jos tilaajan ja IED-laitteen välinen yhteys katkeaa, *BRCB*-instanssi puskuroi viestejä johonkin järkevään rajaan asti. Kun yhteys tilaajaan palaa, *BRCB* lähettää viestit järjestyksessä tilaajalle alkaen ensin puskurista (kohdat 5–7). Tilaaja voi lopettaa tilauksen ja instanssin varauksen merkitsemällä sen taas vapaaksi (kohdat 8–9). [26, s. 41–42]

Standardissa määritetään, että viestejä voidaan tilata vain datajoukoista. IED-laitteen asetustiedostossa täytyy myös määrittää mitä datajoukkoa *RCB*-instanssi käyttää. Tämän jälkeen instanssi tarkkailee datajoukon attribuuttien muutoksia ja lähettää viestin, jos tilaajan asettama liipaisin täsmää. Koska yksi *RCB* voi palvella vain yhtä tilaajaa kerrallaan,



Kuva 5. Puskuroitu viestien tilausprosessi tilaajan ja IED-laitteella olevan BRCB-instanssin välillä (pohjautuu kuvaan [26, s. 42]).

täytyy samaan datajoukkoon viitata monella eri RCB-instanssilla. Näin monta eri tilaajaa saavat viestin samasta tapahtumasta. [27, s. 93]

Standardissa on määritetty seuraavat liipaisimet data-attribuuteille, joita RCB tarkkailee ja reagoi niihin:

- *datan muutos* (engl. *data change*, standardissa lyhenne *dchg*),
- *laadun muutos* (engl. *quality change*, standardissa lyhenne *qchg*), ja
- *datan päivitys* (engl. *data update*, standardissa lyhenne *dupd*).

Standardin luokissa on määritetty mitä liipaisimia data-attribuutti tukee. Esimerkkinä aikaisemmin mainittu DPC-luokan määrittäminen taulukossa 3, jossa TrgOp-sarake kertoo attribuutin liipaisimen. Datan muutos ja päivitys liipaisimien ero on, että datan päivitys liipai-

see tapahtuman, vaikka attribuutin uusi arvo olisi sama. Datan muutos ei liipaise tapahtumaa, jos uusi arvo on sama kuin edellinen arvo. Laadun muutos liipaisin tarkoittaa, että data-attribuuttiin liitetty laatuarvo muuttui. Laatuarvo kertoo tilaajalle ja arvojen lukijalle, voiko attribuuttien arvoihin luottaa. Laatuarvo on tyyppiä Quality ja tästä voi tarvittaessa lukea enemmän standardista. [26, s. 90]

2.7 Raportointi-luokan määrittäminen ja toiminta

BRCB-luokalla on erilaisia attribuutteja, joita tilaaja voi kirjoittaa ja lukea ennen tilauksen aloittamista. BRCB ja URCB -luokat eivät eroa paljon attribuuteilla toisistaan, joten tässä kappaleessa keskitytään vain BRCB-luokan toimintaan. Tarkka määrittäminen luokkien eroista löytyy standardin osasta 7-2. Taulukossa 7 on esitetty standardin määrittämän BRCB-luokan attribuutit, attribuutin nimi englanniksi ja sen selite. Taulukossa ei ole esitetty attribuuttien tyyppejä, koska ne voi lukija tarvittaessa tarkemmin lukea standardin omasta määrittämisestä. Lisäksi tässä kappaleessa käydään läpi luokan attribuuttien toimintaa pääpiirteittäin ja loput tiedot lukija voi tarkistaa standardista. [27, s. 93–118].

Tilaaja voi vapaasti kirjoittaa ja lukea RCB-instanssin arvoja monella peräkkäisellä kutsulla ennen tilauksen aloittamista. Tärkein attribuutti on boolean tyyppinen *RptEna*. Kun attribuutti kirjoitetaan arvoon tosi, aloittaa instanssi tilauksen ja varaa sen kirjoittajalle. Tilaaja voi edelleen lukea ja kirjoittaa sen arvoja tilauksen ollessa päällä, mutta rajoitusti. Joidenkin arvojen kirjoitus pitää tapahtua ennen tilausta tai samassa kutsussa, kun *RtpEna* asetetaan arvoon tosi. Tilaaja lopettaa tilauksen, jos yhteys on poikki tarpeeksi kauan tai *RptEna* kirjoitetaan arvoon epätosi.

RCB-luokan *TrgOps*-attribuutti on binääritietue, jossa yksittäinen bitti ilmaisee mikä liipaisin aiheuttaa viestin lähettämisen. Tällä attribuutilla tilaaja voi päättää mitä liipaisimia hän haluaa käyttää. *TrgOps* sisältää seuraavat liipaisimet:

- *datan muutos* (engl. *data change*, standardissa lyhenne *dchg*),
- *laadun muutos* (engl. *quality change*, standardissa lyhenne *qchg*),
- *datan päivitys* (engl. *data update*, standardissa lyhenne *dupd*),
- *yleinen kysely* (engl. *general-interrogation*, standardissa lyhenne *GI*), ja
- *jatkuva viestintä väliajoin* (engl. *integrity*).

Kolme ensimmäistä liipaisinta *dchg*, *qchg* ja *dupd* ovat aikaisemmin kappaleessa 2.6 määritettyjen data-attribuuttien liipaisimia. Asiakas voi tilata viestejä esimerkiksi vain datan muutoksista. RCB-luokka määrittää data-attribuuttien liipaisimien lisäksi vielä kaksi liipaisinta lisää, yleinen kysely ja jatkuva viestintä väliajoin. Yleinen kysely on viesti, johon RCB sisällyttää kaikki datajoukon attribuutit. Asiakas voi liipaista sen asettamalla luokan attribuutin *GI* arvoksi tosi ja *TrgOps* attribuutissa liipaisin on päällä. Tällöin RCB käynnistää viestin generoinnin ja lähettää sen asiakkaalle. Jos liipaisin ei ole päällä *TrgOps*

Taulukko 7. BRCB-luokan määritetyt attribuutit ja niiden selitteet (pohjautuu taulukkoon [27, s. 94]).

Attribuutti	Englanniksi	Selite
BRCBName	BRCB name	Objektin nimi
BRCBRef	BRCB reference	Objektin viite
RptID	Report identifier	RCB-instanssin yksilöivä id lähetettyihin viesteihin, asiakas voi asettaa
RptEna	Report enable	Varaa RCB:n ja aloittaa viestien lähetyksen
DatSet	Data set reference	Tarkkailtavan datajoukon viite
ConfRev	Configuration revision	Juokseva konfiguraation numerointi, muutos kasvattaa numerointia
OptFlds	Optional fields	Mitä valinnaisia kenttiä viestiin lisätään
BufTm	Buffer time	Puskurointiaika, ennen viestin lähetystä. Tänä aikana tapahtuvat liipaisut yhdistetään samaan viestiin
SqNum	Sequence number	Juokseva lähetetyn viestin numerointi
TrgOps	Trigger options	Millä liipaisimilla viesti lähetetään
IntgPd	Integrity period	Periodisen viestien väli millisekunteina, arvolla 0 ei käytössä
GI	General-interrogation	Käynnistää yleiskyselyn, joka sisältää kaikki datajoukon attribuutit seuraavaan viestiin
PurgeBuf	Purge buffer	Puhdistaa lähettämättömät viestit puskurista
EntryID	Entry identifier	Puskurissa olevan viimeisimmän viestin id. Arvo 0 tarkoittaa tyhjää puskuria
TimeOfEntry	Time of entry	Puskurissa olevan viimeisimmän viestin aikaleima
ResvTms	Reservation time	Instanssin varausaika sekunteina kun yhteys katkeaa, arvo -1 tarkoittaa konfiguraation aikaista varausta ja 0 että ei varausta
Owner	Owner	Yksilöi varaavan asiakkaan, yleensä IP-osoite tai IED-laitteen nimi. Arvo 0 että RCB on vapaa tai ei omistajaa

attribuutissa, ja GI arvoksi asetetaan tosi. RCB ei generoi viestiä. Viestin lähetyksen jäl-

keen RCB itse asettaa GI:n arvoksi epätos. Jatkuva viestintä liipaisin on jatkuvaa viestin lähettämistä tilaajalle väliajoin, johon sisältyy kaikki datajoukon attribuutit, kuten yleisessä kyselyssä. Toiminnon saa päälle, kun asiakas asettaa RCB-luokassa attribuutit *IntgPd* arvoksi muu kuin 0, ja *TrgOps*-attribuutin arvossa kyseinen liipaisin on päällä. Attribuutti *IntgPd* kertoo minkä väliajoin viesti generoidaan ja lähetetään asiakkaalle. Jos *IntgPd* arvo on muu kuin 0 ja *TrgOps* attribuutissa liipaisin ei ole päällä, ei viestiä generoida ja lähetetä asiakkaalle väliajoin.

RCB-luokan attribuutin *OptFlds* avulla asiakas voi valita mitä vaihtoehtoisia kenttiä viestiin sisällytetään. Attribuutin *OptFlds* on binääritietue niin kuin ja *TrgOps*. Taulukossa 8 on esitetty sen asetettavat arvot [27, s. 98]. Taulukon yksittäinen kenttä vastaa *OptFlds* arvon yhtä bittiä. Bittien järjestys määräytyy tekniikalle toteutuksen perusteella. Esimerkiksi MMS-protokolla. Taulukon arvoilla tilaaja voi määrittää mitä lisätietoa viestiin sisällytetään. Esimerkiksi asettamalla reason-for-inclusion bitin päälle, liitetään viestin arvon yhteyteen tieto, miksi tämä viestiin sisällytettiin. Viestin rakennetta ja kuinka *OptFlds*-attribuutin arvoilla sen sisältöön voi vaikuttaa käydään läpi tarkemmin kappaleessa 2.8.

Taulukko 8. RCB-luokan *OptFlds*-attribuutin arvot ja niiden selitteet.

Arvo	Selite
sequence-number	Jos tosi, sisällytä RCB-luokan attribuutti SqNum viestiin
report-time-stamp	Jos tosi, sisällytä RCB-luokan attribuutti TimeOfEntry viestiin
reason-for-inclusion	Jos tosi, sisällytä syy miksi arvo(t) sisällytettiin viestiin
data-set-name	Jos tosi, sisällytä RCB-luokan attribuutti DataSet viestiin
data-reference	Jos tosi, sisällytä datajoukon liipaisseen kohdan rakentamiseen käytetty FCD- tai FCDA-viite viestiin
buffer-overflow	Jos tosi, sisällytä viestiin tieto onko puskuri vuotanut yli kentällä BufOvfl (engl. buffer overflow)
entryID	Jos tosi, sisällytä RCB-luokan attribuutti EntryID viestiin
conf-revision	Jos tosi, sisällytä RCB-luokan attribuutti ConfRev viestiin

Lähetetyt viestit voivat sisältää vaihtelevan määrän sisällytettyjä arvoja. RCB-instanssi mittaa aikaa ensimmäisestä liipaisusta sen attribuutin *BufTm* verran ja tämän ajan jälkeen pakkaa kaikki liipaisseet attribuutit samaan viestiin. Tilaaja voi muuttaa arvoa jos haluaa käyttää pitempää tai lyhyempää puskurointi-aikaa.

2.8 Viestin rakenne ja kuinka sen sisältö muodostuu

IED:n lähettämä viesti on rakenteeltaan hiukan monimutkainen ja lisäksi siihen vaikuttaa RCB-instanssin *OptFlds*-attribuutin asetetut bitit (taulukko 8). Tässä kappaleessa käsitellään viestin mallia, joka on tekniikasta riippumaton. Siitä ei tarvitse välittää minkälainen viestin rakenne on MMS-protokollan tasolla. Toteutetussa ohjelmassa käytettiin kirjastoja, joka hoitaa matalan tason asiat ja tarjoaa helppokäyttöisen rajapinnan viestin sisältöön. Kuitenkin viestin rakenteesta täytyy ymmärtää kuinka vaihtoehtoiset kentät siihen vaikuttavat ja kuinka attribuuttien arvot viestiin sisällytetään. Kuvassa 6 on esitetty standardin määrittämän viestin rakenne ja mitä kenttiä *OptFlds*-attribuutti kontrolloi. Viestin

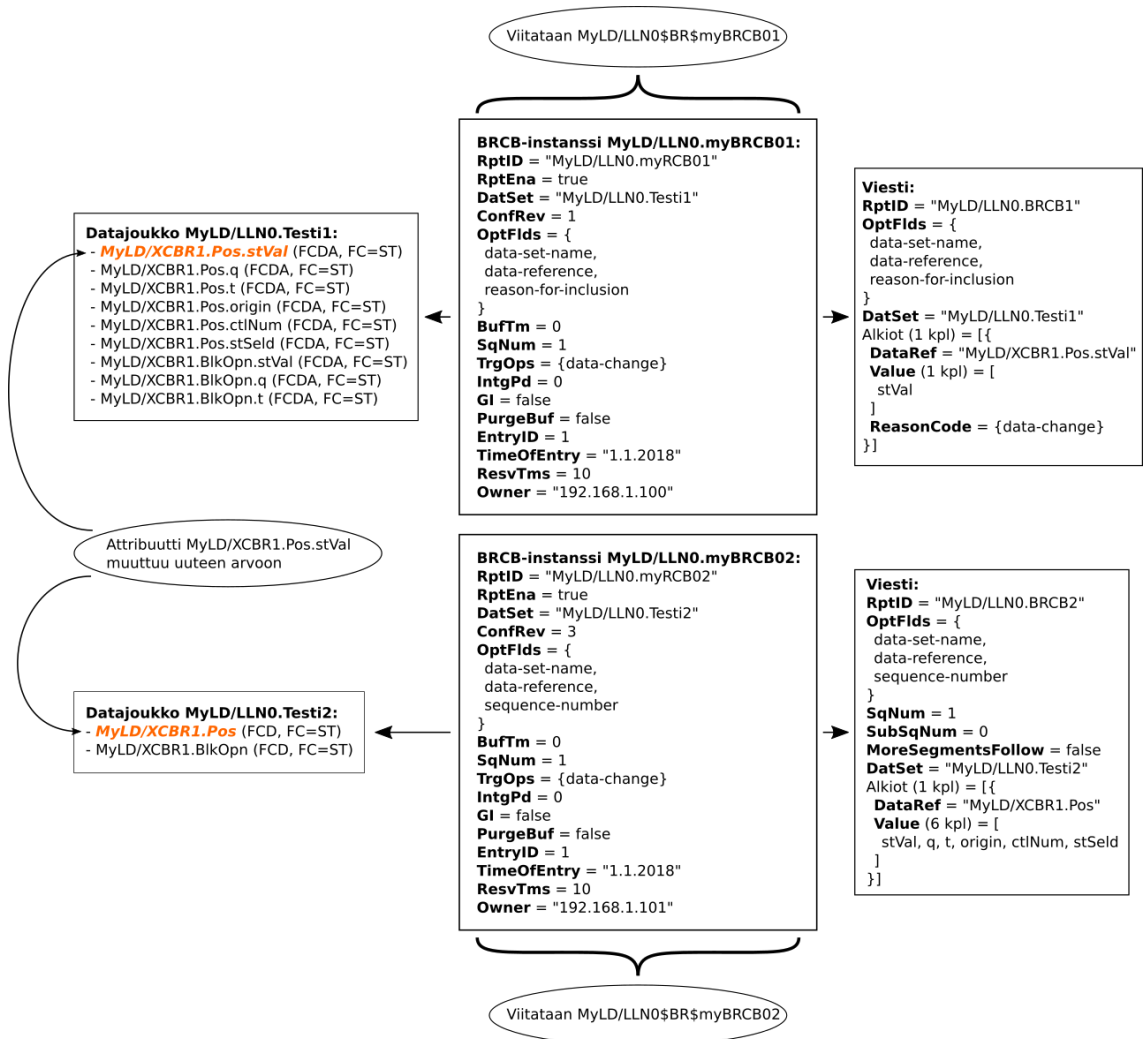
rakenteen voisi ajatella koostuvan kahdesta osasta. Ensin viestissä on yleinen tieto ja viimeisenä taulukko datajoukon alkioista 1–n:ään, jotka liipaisevat viestin lähetyksen.

Viestin rakenteellinen sisältö		
Parametrin nimi	Englanniksi	Selitys
RptID	Report identifier	RCB-instanssin yksilöivä id.
OptFlds	Optional fields	Mitä optionaalisia kenttiä viestiin on sisällytetty
Jos sequence-number = tosi		
SqNum	Sequence number	Juokseva lähetetyn viestin numerointi
SubSqNum	Sub sequence number	Pilkotun viestin juokseva alinumerointi
MoreSegmentsFollow	More segments follow	Tosi jos samalla juoksevalla päänumerolla saapuu vielä lisää viestejä
Jos data-set-name = tosi		
DatSet	Data set	Tarkailtavan datajoukon viite
Jos buffer-overflow = tosi		
BufOvfl	Buffer overflow	Jos arvo on tosi, on viestien puskurit vuotaneet yli
Jos conf-revision = tosi		
ConfRev	Configure revision	Juokseva konfiguraation numerointi
Viestin data		
Jos report-time-stamp = tosi		
TimeOfEntry	Time of entry	Aikaleima milloin viesti generoitiin
Jos entryID = tosi		
EntryID	Entry id	Viestin yksilöivä numero
Liipaissut datajoukon alkio [1..n]		
Jos data-reference = tosi		
DataRef	Data reference	Liipaiseen datajoukon alkion FCD- tai FCDA -viite
Value	Value	Sisältää arvon tai arvot liipaisseesta datajoukon alkoista.
Jos reason-for-inclusion = tosi		
ReasonCode	Reason code	Syykoodi miksi tämä datajoukon kohta on sisällytetty viestiin

Kuva 6. Standardin määrittämä lähetetyn viestin rakenne (pohjautuu kuvaan [27, s. 104]).

Kuvassa 7 on esitetty yleinen kuva kahden viestin lähetyksestä liipaisun tapahtuessa. Kuvassa keskellä on kaksi BRCB-instanssia myBRCB01 ja myBRCB02, jotka tarkkailevat datajoukkoja Testi1 ja Testi2 vastaavasti. Kummatkin instanssit lähettävät viestin, jotka ovat kuvassa oikealle. BRCB-instansseista voi nähdä, mitä niille asetetut attribuuttien

arvot ovat ja datajoukoista näkee mistä FCD- ja FCDA -viitteistä ne koostuvat. Kuvassa attribuutin MyLD/XCBR1.Pos.stVal arvo muuttuu ja tämä liipaisee viestin lähetyksen kummassakin BRCB-instanssissa. Viesteistä voi nähdä sen sisällön ja myös, miten BRCB-instanssien OptFlds-attribuutin arvot vaikuttavat sen sisältöön. Lähetettyjen viestien rakennetta ja sisältöä voi verrata kuvassa 6 määritetyn viestin rakenteeseen. Kuvassa on esitetty myös, kuinka BRCB-instansseihin viitataan MMS-protokollan tapauksessa. Tätä käsitellään tarkemmin kappaleessa 2.9.



Kuva 7. BRCB-instanssi tarkkailee sille määritettyä datajoukkoa ja generoi viestin tapahtuman liipaisesta.

Viestissä *RptID*-kenttä sisältää viitteen RCB-instanssiin, mistä viesti on peräisin. *OptFlds* sisältää binääritietueen viestin vaihtoehtoisista kentistä. Viestin kenttiä *SqNum*, *SubSqNum* ja *MoreSegmentsFollow* käytetään kertomaan asiakkaalle, jos päätason viesti on liian pitkä ja se on pilkottu alaosiin. Kenttä *SqNum* on RCB-instanssin samanniminen kenttä ja toimii juoksevana numerointina päätason viesteille. Kenttä *SubSqNum* on juokseva numerointi alkaen nolasta, mikäli kyseessä on päätason viesti, eli saman *SqNum* arvon sisältävä viesti on pilkottu osiin. Kentän *MoreSegmentsFollow* ollessa tosi asiakas tietää että päätason viesti on pilkottu osiin ja seuraava osa on odotettavissa palvelimelta. Kun

viestin kaikki osat on lähetetty, palvelin asettaa viimeisessä viestissä kentän *MoreSegmentsFollow* arvoksi epätosi ja seuraavassa päätason viestissä *SubSeqNum* kentän arvoksi 0. Kenttä *DatSet* sisältää viitteen datajoukkoon mistä viesti on peräisin. Puskuroidussa BRCB-instanssissa kenttä *BufOvlf* kertoo, onko viestipuskuri vuotanut yli. *ConfRev* kertoo juoksevan konfiguraation numeron, tämä tulee suoraan RCB-instanssin samannimisestä attribuutista. *TimeOfEntry* kertoo, milloin viesti generoitiin IED-laitteen päässä. *EntryID* on viestin yksilöivä numerointi. Tämä kenttä tulee suoraan RCB-instanssin samannimisestä kentästä. Tämän jälkeen viestissä tulee taulukko, joka sisältää liipaisseet datajoukon alkiot. Jokainen taulukon alkio sisältää *Value*-kentän ja vaihtoehtoiset *DataRef*- ja *ReasonCode*-kentät. *DataRef* sisältää datajoukon FCD- tai FCDA-viitteen, joka liipaisi tapahtuman. *ReasonCode*-kenttä kertoo mikä RCB-instanssin *TrgOps*-attribuutilla asetetuista liipaisimista liipaisi tapahtuman ja aiheutti alkion sisällytyksen viestiin. Kentän mahdolliset arvot ovat samat kuin RCB-instanssin *TrgOps*-attribuutin arvot.

Value-kentän arvosta on tärkeä ymmärtää, että se voi sisältää yhden tai monta data-attribuutin arvoa. Tämä riippuu siitä, viittaako datajoukon liipaissut alkion FCD- vai FCDA-viitteellä useaan data-attribuuttiin. Viittauksen ollessa FCDA-viite, joka viittaa vain yhteen data-attribuuttiin, sisältää *Value*-kenttä vain kyseisen data-attribuutin arvon. Jos viittaus on FCD- tai FCDA-viite, joka viittaa moneen attribuuttiin hierarkiassa alaspäin. Sisältää *Value*-kenttä kaikki nämä arvot, vaikka niistä olisi liipaissut vain yksi attribuutti. FCD- ja FCDA-viittauksen toimintaa ja mitä attribuutteja se viittaa hierarkiassa alaspäin, käydään läpi kappaleessa 2.5. Esimerkki tästä on kuvassa 7, jossa liipaisu yhdessä attribuutissa aiheuttaa eri määrän arvoja kumpaankin viestiin. Tähän vaikuttaa kuinka liipaisevaan attribuuttiin on viitattu datajoukossa. Kuvassa 7 Testi1 attribuuttiin *MyLD/XCBR1.Pos.stVal* on viitattu FCDA-viitteellä, jossa funktionaalinen rajoite on ST. Eli FCDA-viite viittaa vain *stVal*-attribuuttiin, ei muihin. Tämän takia *myBRCB01*-instanssilta tuleva viestin *Value*-kenttä sisältää vain *stVal*-attribuutin arvon. Datajoukon Testi2 FCD-viite *MyLD/XCBR1.Pos* funktionaalisella rajoitteella ST sisältää kaikki *Pos*-instanssin ST data-attribuutit. Tämä sisältää myös muuttuneen *MyLD/XCBR1.Pos.stVal* data-attribuutin. Tämä aiheuttaa sen, että kaikki datajoukon viitteen *MyLD/XCBR1.Pos* viitatut attribuutit lisätään viestiin. BRCB-instanssilta *myBRCB02* tuleva viestin *Value*-kenttä sisältää kaikki viitatut attribuutit ja viestin *DatRef*-kenttä sisältää datajoukossa käytetyn viitteen. *Pos*-dataobjektin attribuutit voi tarkistaa taulukosta 3. [26, s. 40–44] [27, s. 108]

2.9 Abstraktimallin sovitus MMS-protokollaan

Tähän asti käsitelty IEC 61850 -standardin mallit ja palvelut ovat olleet abstrahoituja ja tekniikasta riippumattomia. Tässä työssä käytettiin IEC 61850 -standardin MMS-protokollan toteutusta. Tästä toteutuksesta on tarkemmin määritetty IEC 61850 -standardin osassa 8-1. MMS-protokolla on maailmanlaajuinen *ISO 9506* -standardi viestintään, joka on määritetty toimivaksi TCP/IP:n pinon päällä [43]. Tämän työn kannalta lukijan ei tarvitse ymmärtää MMS-protokollaa ja sen toimintaa. Suunnitellussa ohjelmistossa käytettiin apuna kirjastoa, joka hoitaa matalan tason kommunikoinnin IED-laitteen

kanssa. Tässä osiossa käsitellään työn kannalta tärkeitä tietoja, mitä toteutuksesta MMS-protokollalle kuitenkin tarvitsee tietää. [62]

IEC 61850 -standardin mallinnuksessa aikaisemmin esitetty instanssien viittaus hierarkiassa muuttuu ja nyt viittaus sisältää myös funktionaalisen rajoitteen. Esimerkkinä kuvassa 4 oleva viite `OmaLD/Q0XCBR1.Pos.stVal` funktionaalisella rajoitteella `ST` muuttuu muotoon `OmaLD/Q0XCBR1STPos$stVal`. Tässä viittauksessa pisteet (.) korvataan dollarin merkillä (\$). Ja kaksikirjaiminen funktionaalinen rajoite sijoitetaan loogisen noodin ja ensimmäisen dataobjektin nimien väliin. Muuten viittaus säilyy identtisenä alkuperäiseen, ja samat rajoitteet ja nimeämiskäytännöt ovat voimassa edelleen. [30, s. 34–35, 111]

Tämän uuden viittauksen takia jokaiselle viitattavalle kohteelle täytyy olla funktionaalinen rajoite. Niinpä esimerkiksi RCB-luokkien instansseille täytyy olla myös funktionaalinen rajoite. Puskuroitua RCB-instanssia viitataan funktionaalisella rajoitteella `BR`. Ja puskuroimatonta funktionaalisella rajoitteella `RP`. Esimerkin tästä viittauksesta voi nähdä aikaisemmin mainitusta kuvasta 7. [30, s. 32–34, 75]

3. HAJAUTETTU JÄRJESTELMÄ

3.1 Mikä on hajautettu järjestelmä?

Hajautettu järjestelmä (engl. *distributed system*) on verkko toisiinsa kytkettyjä fyysisiä- tai ohjelmistopohjaisia komponentteja, jotka kommunikoivat toistensa kanssa viestien välityksellä. Hajautetussa järjestelmässä osapuolten etäisyydellä ei ole merkitystä. Niiden välimatka voi olla eri maa tai sama rakennus. Hajautetut järjestelmät ovat oma tieteenala, joka lähti liikkeelle käyttöjärjestelmien arkkitehtuurien tutkimuksista 1960-luvulla [3, s. 384]. Ensimmäinen laajalle levinnyt hajautettu järjestelmä oli lähiverkot (engl. Local Area Network tai LAN), joka keksittiin 1970-luvulla [3, s. 32]. Hajautetun järjestelmän määrittämisestä ja toteuttamisesta on nykypäivänä olemassa hyvin kirjallisuutta ja tietoa, esimerkiksi [21, 46, 45, 5].

Järjestelmän hajautuksessa ja sen käytössä on pääasiassa kyse resurssien jakamisesta osapuolien kesken. Resurssi on abstrakti käsite ja voi tarkoittaa tekniikasta tai toteutuksesta riippuen montaa eri asiaa. Resurssilla voidaan esimerkiksi kuvata jaettua fyysistä laitetta kuten levyä tai tulostinta, ohjelmiston tapauksessa oliota tai tietokantaa [21, s. 2–3]. Nykyinen internet mahdollistaa monien eri laitteiden kytkemisen verkkoon ja niiden kommunikoinnin keskenään, ja on nykypäivänä hyvä esimerkki todella laajasta hajautetusta järjestelmästä.

Hajautetussa järjestelmässä voidaan puhua osapuolten *heterogeenisyydestä* (engl. *heterogeneity*), eli osapuolet voivat kommunikoida toistensa kanssa tekniikasta tai toteutuksesta riippumatta. Tämä voidaan kuvata kerrosarkkitehtuurin avulla. Korkean ja matalan tason ohjelmistojen välissä on ns. *väliohjelmistokerros* (engl. *middleware*). Tämän kerroksen tehtävä on abstrahoida matalan tason ohjelmisto tai alusta ja tehdä siitä heterogeeninen ylemmän tason ohjelmistoille ja palveluille. Kuvassa 8 on esitetty edellä mainittu kerrosarkkitehtuuri. [21, s. 16–17] [46, s. 2–3]

3.1.1 Kuinka osapuolet kommunikoivat?

Hajautetussa järjestelmässä osapuolet kommunikoivat keskenään viestien välityksellä. Jotta viestit voitaisiin vaihtaa tekniikasta riippumattomasti osapuolten välillä, täytyy tieto esittää alustariippumattomassa muodossa. Kommunikoivien osapuolten täytyy sopia yhteisestä viestin formaatista. Ohjelmat yleensä käsittelevät tietoa ohjelmistokielen tarjoamilla tietorakenteilla kuten esimerkiksi listoilla, puurakenteilla ja luokilla. Jotta tieto saadaan lähetettyä viestinä, täytyy se ensin muuntaa lähetykseen sopivaan muotoon. Tämä prosessi tunnetaan englannin kielellä nimellä *marshalling*. Jotta vastaanotettua tietoa



Kuva 8. Väliohjelmistokerros abstrahoimaan alusta heterogeeniseksi ylemmän tason ohjelmistolle (pohjautuu kuvaan [21, s. 52]).

voidaan käyttää, täytyy viesti purkaa takaisin ohjelmistokielen rakenteiksi. Tämä prosessi englannin kielessä tunnetaan nimellä *unmarshalling*. [21, s. 158]

Kommunikointiin voidaan osapuolten välillä sopia takuita lähetyksistä ja tiedon oikeudesta. Lähettäjä voi esimerkiksi vaatia vastaanottajaa kuittaamaan viestin vastaanottamisen. Jos kuittausta ei tule tietyn ajan sisällä, lähettäjä uudelleenlähettää viestin vastaanottajalle. Esimerkki tästä on TCP-protokollan (engl. Transmission Control Protocol) paketit, jossa lähettäjä odottaa vastaanottajan kuittausta paketista [55, s. 9–10]. On myös tilanteita, jossa lähettäjä ei välitä saako vastaanottaja viestin. Tässä tapauksessa osapuoli lähettää viestejä ilman tietoa siitä ottaako niitä kukaan vastaan. Esimerkki tästä on UDP-protokolla (User Datagram Protocol, jossa lähettäjä ei odota kuittausta paketteihin [54]. Uuden onnistuneesti lähetetyn paketin odotetaan korvaavan edellisen tieto. Minkälainen takuu viestien lähetykseen valitaan, riippuu ohjelmiston vaatimuksista.

3.1.2 Kommunikoinnin luokittelu

Hajautetuissa järjestelmissä osapuolten kommunikoinnin välillä voi olla *suora-* tai *epä-suora liitos*. Suora liitos tarkoittaa tilannetta, jossa osapuolet tietävät toistensa identiteetin. Esimerkiksi lähettäjä lähettää viestin suoraan vastaanottajalle. Epäsuora liitos tarkoittaa tilannetta, jossa osapuolet eivät tiedä toistensa identiteettiä. Epäsuorassa liitoksessa osapuolet yleensä kommunikoivat välittäjän kautta, joka hoitaa viestien lähettämisen toiselle osapuolelle. Suorassa liitoksessa toisen osapuolen vaihtaminen on vaikeampaa kuin epäsuorassa liitoksessa. Esimerkkinä tästä on yksinkertainen asiakas-palvelin-malli. Suoran liitoksen takia palvelin on vaikeampi vaihtaa toiseen samanlaiseen (palvelin tulkaa HTML-sivuja asiakkaalle). Epäsuorassa liitoksessa palvelimen vaihto samanlaiseen on helpompaa, jos niiden välissä on tarpeeksi epäsuoruutta (geneerinen rajapinta tai välittäjä). [21, s. 230]

Hajautetuissa järjestelmissä voidaan puhua erilaisista heikkojen liitoksien luokittelumal-leista. Kirjallisuudessa näitä kutsutaan

- *heikko tilaliitos* (engl. *space uncoupling*), tarkoittaa liitosta, jossa osapuolet eivät tiedä toistensa identiteettiä, ja
- *heikko aikaliitos* (engl. *time uncoupling*), tarkoittaa liitosta, jossa osapuolien ei tarvitse olla olemassa samaan aikaan.

Näiden mukaan voidaan esittää malli, jolla luokitellaan osapuolten välistä liitosta. Tämä malli on esitetty taulukossa 9. [21, s. 230] [16, s. 116]

Taulukko 9. *Hajautetussa järjestelmässä osapuolten kommunikoinnin luokittelun malli (pohjautuu taulukoihin [21, s. 231] [12, s. 84]).*

	Vahva aikaliitos	Heikko aikaliitos
Vahva tilaliitos	Kommunikointi tarkoitettu suoraan toiselle osapuolelle. Osapuolten täytyy olla olemassa samaan aikaan, esimerkiksi suora viestintä tai etäfunktiokutsu.	Kommunikointi tarkoitettu suoraan toiselle osapuolelle. Osapuolet voivat olla olemassa eri aikaan.
Heikko tilaliitos	Osapuolten ei tarvitse tietää toistensa identiteettiä. Osapuolten täytyy olla olemassa samaan aikaan, esimerkiksi IP-ryhmälähetys.	Osapuolten ei tarvitse tietää toistensa identiteettiä. Osapuolet voivat olla olemassa eri aikaan, esimerkiksi julkaisija-tilaaja ja viestijono

Taulukossa 9 vasemmassa yläkulman luokittelu tarkoittaa kommunikointia, missä osapuolet tietävät toistensa identiteetin ja niiden täytyy olla olemassa samaan aikaan. Tämä on siis kaikista vahvin liitos mitä osapuolten välillä voi olla ja jossa on vähiten epäsuoruutta. Esimerkkinä tästä kommunikoinnista on etäfunktiokutsu tai suora viestintä prosessien välillä. Oikeassa yläkulmassa on tilanne, jossa osapuolet edelleen tietävät toistensa identiteetin, mutta niiden ei tarvitse olla olemassa samaan aikaan. Esimerkkinä osapuoli lähettää viestin tietylle identiteetille, mutta vastaanottaja ottaa viestin vastaan vasta myöhemmin. Teknistä esimerkkiä on hankalampi esittää tähän tilanteeseen kuin taulukon muihin kohtiin. Taulukon vasemmassa alakulmassa on tilanne, jossa osapuolet eivät tiedä toistensa identiteettiä, mutta niiden täytyy olla olemassa samaan aikaan. Esimerkkinä tästä on IP-ryhmälähetys, jossa viesti lähetetään kaikille verkon osapuolille ilman tietoa niiden identiteetistä. Vastaanottaja on olemassa samaan aikaan ja vastaa lähettäjälle ilman identiteettiä. Taulukon oikeassa alakulmassa on tilanne missä osapuolten välillä on kaikista eniten epäsuoruutta muista luokitteluista. Osapuolet eivät tiedä toistensa identiteettiä ja niiden ei tarvitse olla olemassa samaan aikaan. Esimerkkinä julkaisija-tilaaja- ja viestijonoparadigmat. [21, s. 230–232] [12]

Epäsuoruus ohjelmoinnissa tuo hyötyjä ja joustavuutta ohjelmaan ja sen toimintaan kuten aikaisemmin tuotiin esille. Epäsuoruuden mukana tulee myös haittoja, kuten kommunikointi voi olla vaikeampaa osapuolten välillä ja epäsuoruus yleensä heikentää ohjelman suorituskykyä. Suorituskyky ja kommunikoinnin vaikeudet vaihtelevat tekniikasta ja toteutuksesta riippuen.

3.2 Hajautuksen paradigmoja

Lisätä tähän ongelmakohtaiset ja systeemikohtaiset osapuolet? Nyt on vain Ongelmakohtaiset osapuolet.

Hajautetussa järjestelmässä kommunikoinnin ja sen toteuttamisen mahdollisuudet ovat laajat ja vaihtoehtoja on paljon. Siksi on tärkeää ymmärtää mitä ovat järjestelmän kommunikoivat osapuolet ja miten ne kommunikoivat. Näiden ymmärtäminen auttaa kehittämään paremmin hahmottamaan vaihtoehtoja ja kokonaisuuden toimintaa.

Hajautetuissa järjestelmissä kommunikoivien osapuolien voidaan ajatella olevan *olioita*, *komponentteja* tai *web-palveluita* (engl. *World Wide Web*). Oliot tulevat suoraan olio-ohjelmoinnista ja on tarkoitettu jäsentämään asiaa tai toiminnallisuutta pienempiin omiin kokonaisuuksiinsa, joilla on oma sovittu rajapinta. Rajapinnan tarkoituksena on kapseloida toiminnallisuutta helppokäyttöiseksi rajapinnaksi sen käyttäjälle. Komponentti on kokoelma olioita, jotka muodostavat loogisen käytettävän kokonaisuuden. Komponentit myös kommunikoivat rajapinnan läpi kuin oliot. Ero näiden välillä on, että komponentti oman rajapintansa lisäksi olettaa tiettyjä rajapintamäärittäjiä muilta komponenteilta. Komponentti käyttää muiden komponenttien rajapintoja toteuttaakseen sille määritettyä toiminnallisuutta. Web-palvelut noudattavat samaa periaatetta rajapintojen kanssa kuin olio ja komponentti, mutta toimivat web-teknologioiden päällä. Olioita ja komponentteja käytetään toteuttamaan tiukemmin sidottuja ohjelmistoja. Web-palveluita käytetään toteuttamaan omia palvelukokonaisuuksia, joita voidaan liittää yhteen toteuttamaan kokonaisia applikaatioita. [21, s. 42–43]

Hajautetussa järjestelmässä kommunikoinnin paradigmat voidaan jakaa kolmeen kategoriaan, jotka on esitetty taulukossa 10. Taulukossa tyyppien alla on esitetty sille tyypillisiä kommunikoinnin paradigmoja. Näitä paradigmoja käsitellään tarkemmin kappaleissa 3.2.1, 3.2.2 ja 3.2.3.

Taulukko 10. Hajautetun järjestelmän kommunikointiparadigmat kolmella päätasolla (pohjautuu tauluun [21, s. 46]).

Prosessien välinen kommunikatio	Etäkutsu	Epäsuora kommunikatio
Viestien välitys (message passing)	Pyyntö-vastaus (request-reply)	Joukkokommunikointi (group communication)
Soketti (socket)	Etäproseduurikutsu (RPC)	Julkaisija-tilaaja (publish-subscribe)
Ryhmäkutsu (multicast)	Etämetodikutsu (RMI)	Viestijono (message queue)
		Jonotaulu (tuple space)
		Hajautetusti jaettu muisti (DSM)

Prosessien välinen kommunikointi (engl. *interprocess communication*) on matalan tason kommunikointia osapuolten välillä yleensä suoralla yhteydellä ohjelmointirajapintaan.

Etäkutsut (engl. *remote invocation*) tarkoittavat toisen osapuolen kutsumista, joka suorittaa pyynnön ja palauttaa siihen vastauksen. Tyypillinen esimerkki tästä on asiakkaan pyyntö palvelimelle, johon palvelin lähettää takaisin vastauksen. Kahdessa aikaisemmin mainitussa kommunikoinnissa yhteistä on, että osapuolet tietävät eksplisiittisesti toistensa identiteetin ja niiden välillä on yleensä vahva aikaliitos. *Epäsuora kommunikaatio* (engl. *indirect communication*) tapahtuu käyttäen kolmatta osapuolta viestien välitykseen. Tämä mahdollistaa heikon liitoksen osapuolten välillä sekä ajallisesti että tilallisesti. Lähettäjä ei tiedä vastaanottajan identiteettiä ja toisin päin. Kolmas osapuoli vastaa viestin ohjaamisesta vastaanottajalle. [21, s. 43–45]

3.2.1 Prosessien välinen kommunikaatio

Prosessien välinen kommunikointi on matalan tason kommunikointia suoralla rajapinnan käytöllä. Esimerkkinä matalan tason kommunikoinnista on internet-protokollien käyttö, esimerkiksi UDP ja TCP. Käyttöjärjestelmät tarjoavat matalan tason rajapinnan kommunikointiin, esimerkiksi soketti-rajapinta. Soketti-rajapinnalla voidaan käyttää molempia UDP:tä ja TCP:tä [36, s. 1152]. Tyypillistä tämän tason kommunikoinnille on, että sen osapuolet tietävät toistensa identiteetin.

Käyttöjärjestelmän rajapintojen avulla prosessit voivat välittää viestejä suoraan toisilleen. Voidaan puhua, että prosessit lähettävät ja vastaanottavat toisilleen viestejä. Vastaanottaja yleensä toteuttaa jonon viestien vastaanottamiseen ennen käsittelyä. Jos kommunikointi on molemminsuuntaista, kummatkin osapuolet toteuttavat puskurin viestien vastaanottamiseen. Vastaanottaja voi kysellä tietoa jonosta toistuvasti saadakseen tiedon uudesta viestistä tai siitä voidaan ilmoittaa keskeytyksellä. Viestien lähetys voi olla synkronista tai asynkronista. Synkronisessa viestien vaihdossa lähettäjä ja vastaanottaja synkronoidaan jokaisella viestillä. Eli viestin lähetys ja vastaanotto ovat pysäyttäviä (engl. *blocking*) operaatioita. Lähettäjän suoritus pysähtyy niin kauan, kunnes vastaanottaja vastaa ja suoritus jatkuu. Asynkronisessa kommunikoinnissa operaatiot eivät ole pysäyttäviä (engl. *non-blocking*). Lähettäjä voi jatkaa muuta prosessointia heti kun viesti on kopioitu lähetyspuskuriin ja viestin lähetys jatkuu rinnakkain muun prosessoinnin kanssa. [21, s. 147–148]

Hyviä puolia matalan tason kommunikoinnissa on, että sillä saadaan tehtyä saumaton kommunikointi prosessien välille ja sitä tukee moni nykyaikainen käyttöjärjestelmä. Matalan tason kommunikoinnin toteuttaminen vaatii paljon enemmän aikaa ja vaivaa ohjelmoijalta kuin korkeamman tason rajapinnan käyttö. Matalalla tasolla osapuolet ovat vahvasti liitoksissa ajallisesti ja tilallisesti. Osapuolet tietävät toistensa identiteetit ja niiden täytyy olla olemassa samaan aikaan. Vastaanottajan täytyy olla ottamassa viesti vastaan lähettäjältä samoihin aikoihin, kun se lähetetään. Lisäksi matalan tason ohjelma ei välttämättä ole modulaarinen ja on sidoksissa ympäristöönsä. Esimerkkinä Linux-käyttöjärjestelmälle toteutettu ohjelma ei toimi Windows-käyttöjärjestelmällä. Tähän kuitenkin voidaan vaikuttaa ohjelman sisäisillä abstrahointitasoilla.

3.2.2 Etäkutsu

Etäkutsu paradigmoja ovat *pyyntö-vastaus* (engl. *request-reply*), *etäproseduurikutsu* (engl. *remote procedure call*, lyhennetään *RPC*) ja *etämetodikutsu* (engl. *remote method invocation*, lyhennetään *RMI*). Etäkutsuja voi suorittaa prosessit tai korkeamman tason objektit ja palvelut. Primitiivisin etäkutsu paradigmoista on pyyntö-vastaus, joka edustaa mallia aikaisemmin mainitun viestien välityksen päällä ja lisää siihen kaksisuuntaisen viestien vaihdon. Paradigmaa käytetään asiakas-palvelin kommunikoinnissa. [21, s. 185–186]

Todella tärkeä määrittäminen nykypäivän hajautettujen järjestelmien kannalta oli etäproseduurikutsut (RPC). Tämän määrittivät Birrell ja Nelson vuonna 1984 [8]. Se mahdollisti ohjelmoijan kutsua proseduuria toisella koneella etänä samoin kuin paikallista proseduuria. RPC-systeemi piilotti taustalle kaiken teknisen toteutuksen mitä kutsuun etänä tarvittiin, esimerkkinä tiedon siirron, pakkaamisen ja purkamisen [21, s. 195–196]. Etämetodikutsu (RMI) toiminta on sama kuin RPC:n, mutta se on laajennettu toimivaksi olioilla. Olioiden metodeita voidaan kutsua niin kuin ne olisivat sen paikallisia metodeita [21, s. 204]. Sekä RPC ja RMI tarjoavat saman tason abstraktion ohjelmoijalle ja piilottavat teknisen toteutuksen alleen.

Etäkutsuparadigmat ovat korkeamman tason paradigmoja kuin aikaisemmin mainittu prosessien välinen kommunikointi. Hyvänä puolena paradigmoissa on, että ohjelmoijan ei välttämättä tarvitse kirjoittaa matalan tason rajapinnan ohjelmaa. Rajapinta on abstrahoitu helppokäyttöisemmäksi ja sen toteutus ei vie niin paljon aikaa ja resursseja kuin matalan tason implementointi. Kuitenkin etäkutsut kärsivät samoista vahvoista liitoksista kuin prosessien väliset kutsut. Osapuolet ovat vahvasti liitoksissa ajallisesti sekä tilallisesti.

3.2.3 Epäsuora kommunikaatio

Epäsuora kommunikaatio tarkoittaa osapuolten välistä kommunikaatiota välittäjän avulla. Osapuolet eivät vaihda tietoa suoraan keskenään ja eivät tiedä toistensa identiteettiä. Välittäjä huolehtii viestien reitittämisestä ja lähettämisestä vastaanottajalle. Välittäjän tarkempi toiminta ja tarkoitus vaihtelee toteutuksesta riippuen. Aikaisemmin mainituissa kahdessa paradigmatokategoriassa liitokset osapuolten välillä ovat pitkälti vahvoja ajallisesti sekä tilallisesti. Poikkeuksena tähän on esimerkiksi IP-ryhmälähetys, jossa osapuolilla on heikko tilaliitos, mutta vahva aikaliitos. Epäsuora kommunikointi osapuolten välillä vähentää liitoksien vahvuutta. Liitokset voivat olla heikkoja tilallisesti sekä ajallisesti ja niiden heikkous vaihtelee toteutuksesta riippuen. Epäsuora kommunikointi mahdollistaa toisen osapuolen helpomman vaihdon, siirron ja päivittämisen kuin suora kommunikointi. Useasti epäsuorassa kommunikoinnissa vastaanottajia voi olla monta yhden sijaan. Tällöin voidaan puhua yksi-moneen-suhteesta (engl. *one-to-many*) osapuolten välillä. Epäsuoruus tuo hyötyjä, mutta se tuo myös väistämätöntä suorituskykykuormaa epäsuoruden vaativan toiminnan takia. [21, s. 230–231]

Epäsuoran kommunikoinnin paradigmoja ovat *joukkokommunikointi* (engl. *group commu-*

nication), julkaisija-tilaaja (engl. *publish-subscribe*), viestijono (engl. *message queue*), tuplesäilö (engl. *tuple space*) ja hajautetusti jaettu muisti (engl. *distributed shared memory*, lyhennetään *DSM*). Nämä esitettiin aikaisemmin taulukossa 10. Jokaista paradigmaa käsitellään erikseen tulevilla kappaleilla.

3.2.4 Joukkokommunikointi

Joukkokommunikointi on paradigma, jossa osapuoli lähettää viestin ryhmälle, jonka jälkeen viesti uudelleenlähetetään kaikille ryhmän osapuolille. Ryhmä vastaanottajia tunnistetaan yksilöivällä ryhmätunnisteella. Lähettäjä käyttää tunnistetta kohdentamaan viestin haluamalleen ryhmälle. Tässä tapauksessa lähettäjä ei ole tietoinen vastaanottajien identiteetistä [21, s. 232–233]. Joukkokommunikointi tunnetaan myös *joukkokommunikointisysteeminä* (engl. *Group Communication System*, lyhennetään *GCS*). Briman keksi ja kuvasi ensimmäisen tällaisen systeemin 1986-luvulla [6]. Joukkokommunikointi on tärkeä paradigma hajautettujen järjestelmien kannalta ja sillä on olemassa monta eri käyttökohdetta. Applikaatioina esimerkiksi voi olla kollaboraatio- ja monitorointi-ohjelmistot, jossa kaikkien osapuolien täytyy tietää uusimmasta muutoksesta.

Joukkokommunikoinnissa ryhmät voivat olla ns. avoimia tai suljettuja. Kuvassa 9 on esitetty avoimen ja suljetun ryhmän toiminta. Avoin ryhmä mahdollistaa ulkopuolisen osapuolen lähettää viesti kaikille sen jäsenille. Suljettu ryhmä on tarkoitettu ainoastaan sen osapuolten väliseen kommunikointiin. Suljetussa ryhmässä yksi osapuoli voi ryhmälähetää viestin kaikille sen osapuolille ryhmän tunnisteella, samoin kuin ulkopuolinen avoimen ryhmän tapauksessa. Avoimen ja suljetun ryhmän lisäksi ryhmillä voi olla muitakin tärkeitä piirteitä. Ryhmät voivat olla päällekkäisiä tai ei päällekkäisiä. Päällekkäiset ryhmät mahdollistavat yhden osapuolen kuulumisen yhtä aikaa moneen eri ryhmään. Ei päällekkäisessä osapuoli voi kuulua enimmillään yhteen ryhmään. Joissakin tapauksissa ryhmän osapuolten voidaan sallia liittyä ja lähteä ryhmästä. Tällöin erillisen osapuolen täytyy pitää kirjaa ryhmän osapuolista ja tarjota toiminnallisuudet liittyä ja poistua ryhmästä. [21, s. 233–235] [7, s. 48]

Ryhmät mahdollistavat yhden-moneen-suhteen kommunikoinnissa. Yksi viesti saadaan lähetettyä monelle osapuolelle yhdellä kertaa. Tämä säästää kaistaa verrattuna tilanteeseen, jossa viesti lähetettäisiin jokaiselle osapuolelle erikseen. Joukkokommunikoinnissa osapuolten välillä on heikko tilaliitos, mutta vahva aikaliitos. Joukkokommunikointisysteemit ovat monimutkaisia ja niiden lähetystakuiden vaatimukset vaativat paljon vaivannäköä systeemiltä. Lähetystakuihin yleensä kuuluu, että jokainen ryhmän jäsen saa sille lähetetyn viestin ainakin kerran jossakin vaiheessa. Dynaamisen ryhmän tapauksessa, jossa osapuolia voi tulla ja lähteä ryhmästä, lähetystakuiden kiinni pitäminen monimutkaistuu entisestään. [14] [21, s. 236]

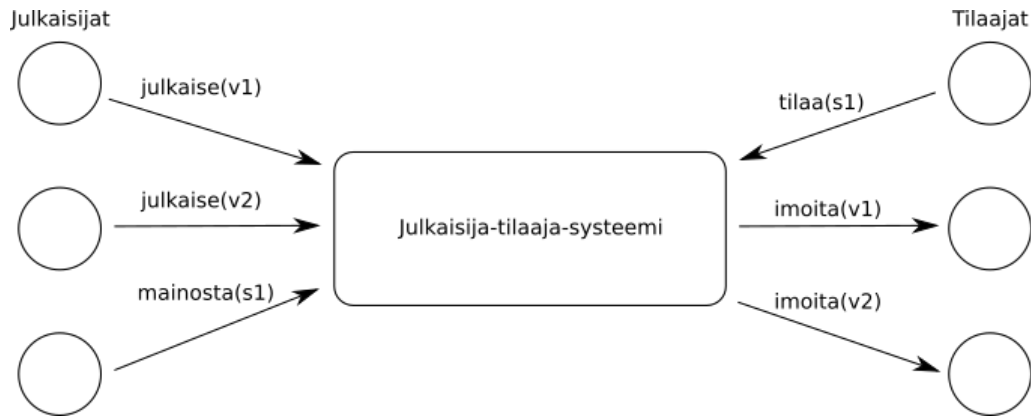


Kuva 9. Osapuolten kommunikointi avoimessa ja suljetussa ryhmässä (pohjautuu kuvaan [21, s. 235]).

3.2.5 Julkaisija-tilaaja

Julkaisija-tilaaja on kommunikointiparadigma, jossa *julkaisijat* julkaisevat tapahtumia/viestejä ja *tilaajat* tilaavat haluamiaan tapahtumia/viestejä *tilauksilla*. Osapuolten välissä on julkaisija-tilaaja-systeemi, joka vastaa viestien reitittämisestä tilaajille tehtyjen tilauksien perusteella. Järjestelmä mahdollistaa monen tilaajan tilata viestejä samalta julkaisijalta. Näin ollen kommunikointisuhde osapuolten välissä on yksi-moneen, kuten joukkokommunikoinnissa. Systeemiin tehdyllä tilauksella tilaaja voi tilata samalla kertaa monta eri julkaisijaa. Tehty tilaus on ns. *suodatin/malli* (engl. *pattern*), joka systeemin sääntöjen mukaan voi täsmätä enemmän kuin yhteen julkaistuu viestiin. Kirjallisuudessa paradigma tunnetaan nimellä *julkaisija-tilaaja-systeemi* (engl. *publish-subscribe system*) [5], sekä *hajautettu tapahtumapohjainen systeemi* (engl. *distributed event-based system*) [46]. Julkaisija-tilaaja-paradigmalle on olemassa monia erilaisia käyttökohteita hajautetuissa järjestelmissä. Varsinkin systeemeissä, jossa erilaisten tapahtumien ja viestien jakaminen eri osapuolille on tarpeen. IEC 61850 -standardissa käsitelty viestien tilaus IED-laitteelta käyttää juuri tätä kommunikointiparadigmaa.

Julkaisija-tilaaja-systeemin voidaan ajatella tarjoavan funktioita, joita osapuolet käyttävät toimiakseen sen kanssa. Kuvassa 10 on esitetty systeemin toiminta näitä funktioita käyttäen. Julkaisija julkaisee viestin systeemiin funktiolla *julkaise(v)*, jossa parametri *v* kuvaa julkaistavaa viestiä. Tilaaja tilaa viestejä funktiolla *tilaa(s)*, jossa *s*-parametri tarkoittaa suodatinta viesteihin joihin tilaaja osoittaa kiinnostusta. Viestin saapuessa systeemiin ja tilauksen suodattimen täsmätessä, viesti lähetetään tilaajalle *ilmoita(v)* funktiolla, jossa *v* on julkaistu viesti. Tilaajien on myös mahdollista peruuttaa tilaus *peruuta_tilaus()* funktiolla. Joissakin systeemeissä julkaisijoiden on myös mahdollista mainostaa viestejä. Julkaisija kutsuu *mainosta(s)* funktiota, jossa *s*-parametri kertoo viestien tyypistä ja noudattaa samaa formaattia kuin tilaajien suodattimet. Mainostus voidaan perua *peruuta_mainos()* funktiolla. [5, s. 2–3] [46, s. 26–28]



Kuva 10. *Julkaisija-tilaaja-systeemi välikätenä viestien välittämisessä julkaisijoiden ja tilaajien välissä (pohjautuu kuvaan [21, s. 246]).*

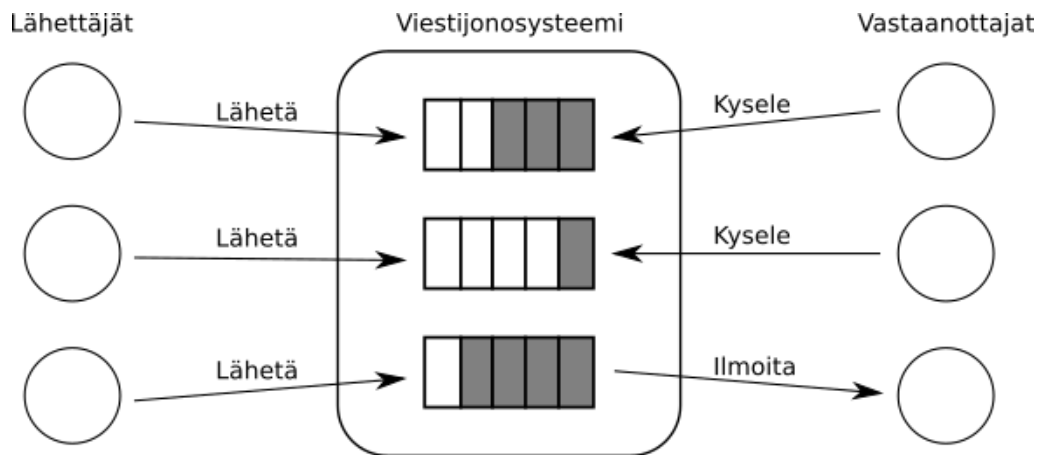
Julkaisija-tilaaja-systeemin ansiosta kommunikointi osapuolten välillä on epäsuoraa. Kommunikoinnissa osapuolten välillä on heikko tilaliitos ja vahva aikaliitos. Heikossa tilaliitoksessa osapuolet eivät tiedä toistensa identiteettiä kuka julkaisi viestin ja kuka sen vastaanottaa. Systeemi osapuolten välissä mahdollistaa tämän. Osapuolten välillä on kuitenkin vahva aikaliitos. Jotta tilaaja saa viestin, täytyy sen olla olemassa samaan aikaan kuin julkaisijan. Yksinkertaisin julkaisija-tilaaja-systeemi on helppo implementoida yhdellä välittäjällä. Tämä voi kuitenkin tulla ongelmaksi tai pullonkaulaksi järjestelmässä, missä tiedon vaihto on nopeaa ja osapuolia on paljon tai välittäjä kaatuu kesken kaiken. Tällaisen systeemin skaalaaminen ylöspäin on vaikeampaa ja vaatii hajautettua välittäjäverkkoa [21, s. 248–249]. Lisäksi systeemin epäsuoruus tuo mukanaan kommunikointiin vaikeutta ja suoritukseen kuormaa verrattuna suoraan kommunikointiin.

3.2.6 Viestijono

Viestijono paradigmassa osapuolet kommunikoivat epäsuorasti jonon välityksellä. Joukkokommunikointi ja julkaisija-tilaaja paradigmot ovat yksi-moneen-suhde osapuolten välillä, kun taas viestijono on yksi-yhteen-suhde (engl. point-to-point). Lähettäjä lähettää viestin jonoon, josta vastaanottaja poistaa sen käsittelyyn. Viestijonon tarkoitus on puskuroida viestejä vastaanottajalle ja näin taata niiden saatavuus ja järjestys millä ajan hetkellä hyvänsä. Viestijono mahdollistaa siis osapuolten välillä heikon tila- ja aikaliitoksen. Jonon ansiosta lähettäjä ja vastaanottaja voivat olla olemassa eri aikaan [21, s. 254]. Kuvassa 11 on esitetty viestijonosysteemin toiminta osapuolten välillä.

Vastaanottaja voi poistaa viestejä jonosta kolmella eri periaatteella:

- *pysäyttävä vastaanotto* (engl. *blocking receive*), joka pysäyttää suorituksen, kunnes viesti on saatavissa,
- *ei pysäyttävä vastaanotto* (engl. *non-blocking receive*), joka tarkistaa jonon tilan ja palauttaa viestin jos saatavilla, ja



Kuva 11. Viestijonosysteemi puskuroi viestejä lähettäjiltä vastaanottajille (pohjautuu kuvaan [21, s. 255]).

- *ilmoita* (engl. *notify*), joka lähettää tiedon uudesta viestistä, kun sellainen on saatavilla [21, s. 254].

Ei pysäyttävä vastaanotto on sama kuin vastaanottaja kyselisi viestejä jonosta tietyin väliajoin (engl. *poll*). Viestijonosysteemissä jonoa ei ole rajoitettu yhteen lähettäjään ja vastaanottajaan. Systeemissä moni lähettäjä voi lähettää viestejä samaan jonoon ja moni vastaanottaja voi vastaanottaa niitä samasta jonosta. Jonojen jonotuspolitiikka on yleensä FIFO-periaate (engl. *First-In-First-Out*). Moni systeemi kuitenkin tukee myös muitakin periaatteita, kuten viestien priorisointia, jossa ylemmän prioriteetin viestit käsitellään ennen alemman prioriteetin viestejä [16, s. 120].

Viestijonon hyvänä puolena on osapuolten heikon aikaliitoksen mahdollistaminen. Tämä mahdollistetaan sillä, että viestit jonossa ovat pysyviä (engl. *persistent*). Systeemi tallentaa viestit levyille, jossa ne säilyvät niin kauan, kunnes vastaanottaja poistaa ne jonosta. Systeemi takaa viestien lähettämisen vastaanottajalle. Viesti tullaan lähettämään jossakin vaiheessa ja enintään kerran. Lisäksi lähetetty viesti vastaa alkuperäistä lähettäjän viestiä. [21, s. 255]

Aikaisemmin käsiteltiin viestien välitystä prosessien välisessä kommunikoinnissa ja mainittiin että prosessit voivat implementoida jonon viestien vastaanottoon. Jonosysteemillä on paljon samanlaisia piirteitä tämän kanssa. Kuitenkin viestien välityksessä jonot ovat liitoksissa sen osapuoleen ja ovat implisiittisiä. Viestijonosysteemissä jonot ovat kolmannen osapuolen tarjoamia eksplisiittisiä jonoja, joka erottaa lähettäjät ja vastaanottajat toisistaan. Tämä on tärkeä ero, joka tekee viestijonosta oman epäsuoran kommunikointiparadigman. [21, s. 256]

4. KUINKA JÄRJESTELMÄ HAJAUTETAAN?

Tässä kappaleessa pohditaan, kuinka diplomityössä haluttu hajautettu järjestelmä toteutetaan. Kappaleessa käsitellään järjestelmän arkkitehtuuria, sen osapuolten välisiä liitoksia ja verrataan erilaisia toteutuksen paradigmoja. Huomioon otetaan asetetut vaatimukset ja IEC 61850 -standardin asettamat rajoitteet. Lopputuloksena on suunnitelma järjestelmän hajautukseen korkealla tasolla ja sen osapuolten väliseen kommunikointiin. Tätä suunnitelmaan käytetään myöhemmin pohjana tarkempaan ohjelmiston suunnitteluun ja tekniikoiden valintaan.

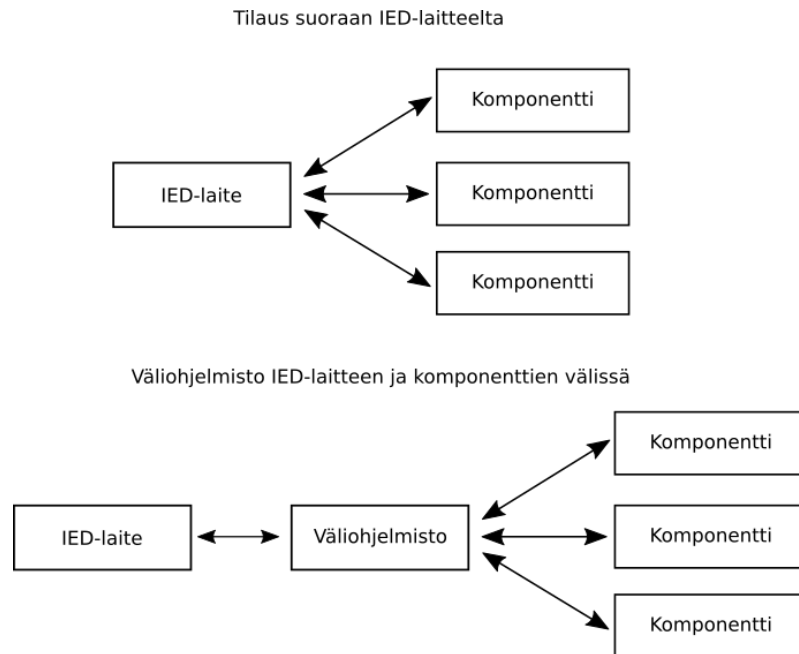
4.1 Arkkitehtuurin analyysi

IEC 61850 -standardi määrittää, että viestit IED-laitteelta tulevat julkaisija-tilaaja-paradigman mukaisesti. Viestit tilataan IED-laitteelta olevilta RCB-luokkien instansseilta. RCB-instanssi on kytketty laitteella olevaan datajoukkoon, jonka tiedoista ollaan kiinnostuneita. Rajoituksena standardi asetti, että RCB-instanssi täytyy tilaajan varata ja yksi RCB-instanssi voi palvella vain yhtä tilaajaa kerrallaan. RCB-instansseja IED-laitteissa on rajallinen määrä yhtä datajoukkoa kohti ja näitä voidaan myös käyttää aseman sisäiseen toimintaan. Tässä työssä käsitellyssä IED-laitteessa yhteen datajoukkoon oli esimerkiksi määritetty viisi eri RCB-instanssia. Seurauksena on, että kyseisen datajoukon voi tilata vain viisi saman aikaista tilaajaa. Lisäksi tässä työssä testattu IED-laite rajoitti avoimet yhteydet viiteen. Tästä ylimeneviä yhteyksiä ei avattu ja IED-laite palautti standardin mukaisen negatiivisen vastauksen.

Vaatimuksissa määriteltiin, että IED-laitteen tieto täytyy saada jaettua järjestelmän muiden komponenttien kanssa. Työn tekohetkellä komponentteja järjestelmässä oli kaksi: mittaustiedon näyttämiseen ja tilatiedon tarkkailuun. Vaatimuksissa kuitenkin määriteltiin, että toteutuksessa haluttiin varautua tulevaisuuden varalle komponenttien suhteen. Eli tilanteeseen, jossa niitä olisi enemmän kuin kaksi ja niiden määrä voisi vaihtua tilaamisen aloitusten välillä.

Edelle mainituista IED-laitteen rajoituksista ja työlle asetetuista vaatimuksista voidaan tehdä johtopäätöksiä hajautuksen arkkitehtuurin suhteen. Samalle IED-laitteelle avattujen yhteyksien määrä halutaan pitää pienenä. Tämän lisäksi varattujen RCB-instanssien määrä jokaista datajoukkoa kohti halutaan myös pitää pienenä. Nämä sen takia, koska halutaan mahdollisimman vähän varata aseman resursseja sen muulta käytöltä. Lisäksi järjestelmän IED-laitteelta vaatimat resurssit halutaan pitää ennalta määrättyinä lukuna. Tämä helpottaa aseman insinöörin suunnittelutyötä, koska hän voi ottaa luvut huomioon IED-laitteiden konfiguroinnissa.

Edellä mainittuun tilanteeseen ratkaisuna voisi ajatella, että järjestelmän yksittäiset komponentit tilaisivat niiden tarvitsemat tiedot suoraan IED-laitteelta. Tämä on esitetty kuvan 12 yläosassa. Ongelmana tässä kuitenkin on aikaisemmin mainittu yhteyksien määrän rajoitus IED-laitteelle ja se, että niiden määrä haluttiin minimoida ja pitää vakiona. Lisäksi viestit tilataan ja palautetaan komponentille MMS-protokollamäärittelynsä mukaisesti. Seurauksena on, että jokainen komponentti joutuu käsittelemään MMS-protokollan binaaridataa itse tai kirjaston avulla. Viestin muoto olisi parempi olla ymmärrettävämpi. Näin viestin lukeminen eri tekniikoilla olisi helpompaa. Tämä asetettiin ohjelmiston vaatimuksissa ja oli myös yksi kohta työlle asetetuista tutkimuskysymyksistä.



Kuva 12. IED-laitteelta viestien tilaus suoraan ja väliohjelmiston avulla.

Ratkaisuna edellä mainittuun tilanteeseen on kommunikoinnin epäsuoruuden lisääminen. Samoin menee myös kuuluisa lainaus henkilöltä David Wheeler [65, s. 290]:

All problems in computer science can be solved by another level of indirection.

Epäsuoruutta saadaan aikaan toteuttamalla erillinen ohjelmistokomponentti IED-laitteen ja muiden järjestelmän komponenttien väliin. Tätä komponenttia voisi kutsua myös nimellä *väliohjelmisto* (engl. *middleware*) ja on esitetty kuvan 12 alaosassa. Väliohjelmisto tilaisi viestit IED-laitteelta ja halutuilta RCB-instansseilta. Samalla komponentti muokkasi saapuvat viestit parempaan muotoon, joka olisi helpompi muiden järjestelmän komponenttien lukea. Väliohjelmiston avulla yhteyksien määrä IED-laitetta kohti saadaan yhteen. Tämän avulla myös saadaan minimoitua varattujen RCB-instanssien määrä datajoukkoa kohti yhteen. Tuloksena on vakiomäärät yhteyksiä ja RCB-instansseja datajoukkoa kohti, jotka ovat helpompi ennustaa ja konfiguroida etukäteen tarpeiden mukaan.

Vaatimuksissa mainittiin myös, että muu järjestelmä ohjaa viestien tilauksen aloittamista ja lopettamista. Väliohjelmistoa on mahdollista muun järjestelmän ohjata tilauksien mu-

kaan. Tietysti tieto tilauksesta täytyy myös saada järjestelmän muille komponenteille. Väliohjelmisto ja epäsuoruus myös helpottavat viestien puskuroinnin toteuttamista komponenteille, joka myös oli vaatimuksena. Ilman epäsuoruutta, jokaisen komponentin pitäisi toteuttaa oma sisäinen puskuri viestien vastaanottamiseen.

Tässä kappaleessa analysoitiin IEC 61850 -standardin asettamia rajoja ja ohjelmistolle asetettuja vaatimuksia. Näistä analysoitiin mikä olisi toimiva ratkaisu tässä tilanteessa järjestelmän hajauttamiseen korkealla tasolla. Tuloksena järjestelmään päätettiin lisätä epäsuoruutta toteuttamalla väliohjelmisto IED-laitteen ja järjestelmän muiden komponenttien väliin. Tämän jälkeen täytyy vielä miettiä mitkä kommunikointiparadigmat toteuttavat väliohjelmiston ja komponenttien vaatimukset? Mihin muotoon MMS-tason viesti väliohjelmistossa pitäisi muuttaa jakoa varten? Mitkä ovat väliohjelmiston ja muiden komponenttien välisten liitoksien vahvuudet? Kuinka viestien puskurointi väliohjelmiston avulla toteutetaan?

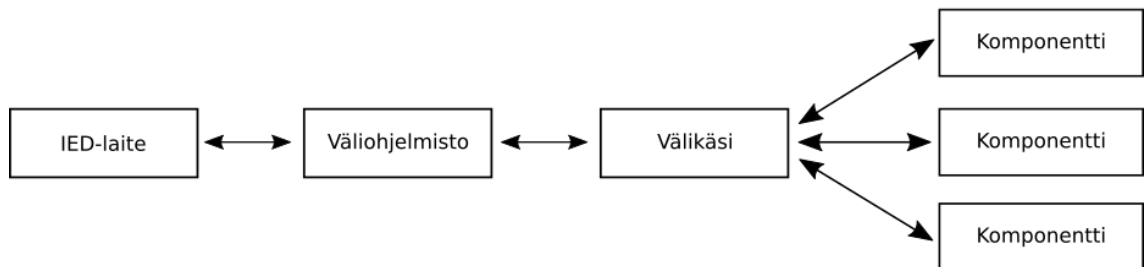
4.2 Osapuolten liitoksien analyysi

Aikaisemmin kappaleessa 3.1.2 käsiteltiin hajautetun järjestelmän osapuolten välisiä liitoksia. Erilaisten liitoksien luokittelut esiteltiin taulukossa 9. Lisäksi hajautetussa järjestelmässä kommunikointi osapuolten välillä voi olla suoraa tai epäsuoraa. Aikaisemmin kappaleessa 4.1 päädyttiin lisäämään epäsuoruutta IED-laitteen ja järjestelmän muiden komponenttien väliin.

IED-laitteen ja viestien tilaajan välinen kommunikointi on suoraa ja se ei tapahdu välikäden kautta. Lisäksi osapuolten välillä on vahva tila- ja aikaliitos. Tilaliitos tulee, kun kummatkin osapuolet tietävät toistensa identiteetin (IP-osoitteen). Aikaliitoksessa osapuolien täytyy olla olemassa samaan aikaan. Tilaajan täytyy olla ottamassa viesti vastaan, kun IED-laite sen lähettää ja IED-laitteen täytyy olla olemassa, kun tilaus tehdään. Kaikki edellä mainitut tulevat IEC 61850 -standardin määrityksien seurauksena ja näihin ei työn puitteissa voi vaikuttaa.

Työn aloitushetkellä järjestelmässä oli kaksi tietoa tarvitsevaa komponenttia. Vaatimusten mukaan haluttiin varautua tulevaisuuteen, jossa niitä olisi enemmänkin. Tästä seurauksena väliohjelmiston ja muiden järjestelmän komponenttien välinen suhde on yksi-moneen. Vaatimuksena oli, että tietoa tarvitsevien komponenttien määrä pystyisi muuttumaan tilauksien välillä. Toteuttamalla suora kommunikointi väliohjelmiston ja järjestelmän muiden komponenttien väliin, väliohjelmiston tarvitsee tietää muiden komponenttien olemassaolosta ja kenelle viestit täytyy ohjata. Tämä lisäisi osapuolten välistä riippuvuutta ja vähentäisi toteutuksen joustavuutta. Ratkaisuna on lisätä epäsuoruutta väliohjelmiston ja muiden komponenttien väliin välikädellä. Tämä on esitetty kuvassa 13. Välikäsi vähentää osapuolten välistä riippuvuutta ja lisää toteutuksen joustavuutta. Se myös auttaa toteuttamaan asetettuja vaatimuksia, kuten viestien puskurointia ja uuden viestin ilmoitusta. Vaatimuksena oli, että IED-laitteelta tulevaa tietoa pitäisi pystyä jakamaan komponenteille IED-laitteen perusteella. Välikäden tuoma epäsuoruus auttaa myös tämän vaatimuksen

toteuttamisessa. Tällä vastuu väliohjelmistolta viestien jakamisesta saadaan siirrettyä välikäden vastuulle.



Kuva 13. Välikäsi väliohjelmiston ja komponenttien välissä lisäämään epäsuoruutta ja joustavuutta.

Välöohjelmiston ja muiden komponenttien välille edellä mainitun perusteella halutaan heikko tilaliitos. Välöohjelmiston ei tarvitse tietää järjestelmän muiden komponenttien identiteettiä ja tämä parantaa toteutuksen joustavuutta. Aikaliitos asetettujen vaatimusten perusteella pystyisi olemaan vahva tai heikko. Kuitenkin muu järjestelmä ohjaa tilauksen aloittamista, jolloin muutkin komponentit tietävät asiasta. Tämä vaatimus poistaa tarpeen heikolle aikaliitokselle.

Tässä kappaleessa analysoitiin hajautetussa järjestelmässä osapuolten välisten liitoksien vahvuutta. IEC 61850 -standardi asettaa rajoitteet IED-laitteen ja välöohjelmiston välille, joihin ei voida vaikuttaa. Välöohjelmiston ja muiden komponenttien väliin päädyttiin toteuttamaan epäsuora kommunikointi joustavuuden ja vaatimusten takia. Samojen osapuolten väliin haluttiin toteuttaa heikko tilaliitos ja vahva aikaliitos. Kysymyksenä jää miettiä millä hajautuksen paradigmoilla välikäsi pitäisi toteuttaa, jotta halutut ominaisuudet saadaan toteutettua?

4.3 Paradigmojen analyysi

Aikaisemmissa kappaleissa analyysien ja vaatimusten pohjalta päädyttiin kuvan 13 hajautetun järjestelmän arkkitehtuuriin. Tässä kappaleessa vertaillaan ja analysoidaan eri hajautuksen paradigmoja. Tarkoituksena on selvittää mitä paradigmoja tarvitaan, jotta asetetut vaatimukset voidaan toteuttaa. Näitä olivat viestien puskurointi, ilmoitukset komponenteille uuden viestin saapuessa ja viestien suodattamisen mahdollisuus IED-laitteen mukaan. Tässä kappaleessa käsitellyt paradigmat koskevat kuvan 13 välikättä välöohjelmiston ja järjestelmän komponenttien välissä. Hajautetun järjestelmän eri paradigmat oli esitetty taulukossa 10.

Järjestelmään haluttiin epäsuoruutta välikädellä. Tätä parhaiten tarjoavat epäsuorat kommunikointiparadigmat. Vaatimuksena oli, että viestejä pitäisi pystyä puskuroimaan myöhempään ajan hetkeen, jos komponentti ei niitä ehdi käsitellä. Tämän ominaisuuden parhaiten tarjoaa viestijonoparadigma. Viestejä haluttiin erotella IED-laitteen mukaan, ja

komponentit voisivat päättää itse mistä ovat kiinnostuneita. Tätä ominaisuutta epäsuorista paradigmoista tarjoavat joukkokommunikointi ja julkaisija-tilaaja. Joukkokommunikoinnissa komponentti pystyisi olemaan osa haluttuja ryhmiä. Julkaisija-tilaaja-paradigmassa komponentti pystyisi tilaamaan halutut viestit. Kummatkin edellä mainituista tarjoavat myös halutut ilmoitukset. Joukkokommunikointi- ja julkaisija-tilaaja-systeemissä vastaanottajat saavat ilmoituksen uuden viestin saapuessa. Jotta joukkokommunikoinnilla saadaan haluttu toiminnallisuus, pitää ryhmän olla avoin ja sen pitää mahdollistaa osapuolten liittyminen ja poistuminen ryhmästä. Lisäksi ryhmien pitää sallia olevan päällekkäisiä. Tämä sen takia, että komponentin on mahdollisesti saada viestejä useammasta lähteestä samaan aikaan.

Järjestelmään halutun epäsuoruuden takia suorat kommunikointiparadigmat eivät sovellu kovin hyvin hajautuksen toteuttamiseen. Näitä olivat prosessien välinen kommunikointi ja etäkutsut. Hajautuksessa osapuolien välillä haluttiin olevan heikko tilaliitos ja vahva aikaliitos. Kummassakin edellä mainitussa paradigmat liitokset ovat vahvoja. Suoralla kommunikoinnilla vastaanottavan osapuolen pitäisi toteuttaa viestipuskuri itse, verrattuna jos käytettävä epäsuora systeemi tarjoaisi puskurin sen sijaan. Tämä hankaloittaa uusien komponenttien kehitystyötä. Muu järjestelmä on toteutettu web-applikaationa, josta seurasi vaatimus, että kommunikoinnin pitäisi toimia TCP/IP-protokollaperheen päällä tai vastaavalla. Prosessien välinen kommunikointi tapahtuu mm. soketeilla ja näin ollen on vaatimukseen nähden liian matalaa. Etäkutsut tarjoavat tähän paremman vaihtoehdon, mutta vaatimuksissa ei ollut tarvetta pyyntö-vastaus-kommunikoinnille. Viestien suunta on tässä tapauksessa yhden suuntaista IED-laitteelta järjestelmän komponentille.

Asetettuihin vaatimuksiin nähden epäsuorat paradigmat sopivat toteutukseen parhaiten. Näistä tarvitaan viestijonoparadigmaa viestien puskurointiin ja joukkokommunikointi tai julkaisija-tilaaja niiden lähettämiseen komponenteille. Joukkokommunikointi ja julkaisija-tilaaja paradigmat ovat kummatkin tilanteeseen sopivia vaihtoehtoja. Jäljelle jää miettiä millä tekniikalla halutut paradigmat toteutetaan. Valitun tekniikan pitäisi yhdistää kaksi eri paradigmaa niin, että viestien oikea reitittäminen ja puskurointi ovat mahdollisia.

4.4 Toteutuksien analyysi

Hajautetun järjestelmän toteuttamiseen löytyy erilaisia avoimia standardeja kuten *AMQP* (engl. *Advanced Message Queuing Protocol*) [2] ja *MQTT* (engl. *Message Queuing Telemetry Transport*) [44]. Standardien tarkoitus on määrittää yhteiset säännöt osapuolten kommunikointiin hajautetussa järjestelmässä. Standardien pohjalta on toteutettu erilaisia viestien välitysohjelmistoja, johon muut osapuolet voivat ottaa yhteyttä standardin mukaisesti tekniikasta riippumatta. Kummatkin edellä mainitut standardit ovat määritetty toimivaksi TCP/IP-protokollaperheen päällä [49, s. 1] [1, s. 22].

MQTT on julkaisija-tilaaja-paradigmaan pohjautuva kommunikointistandardi. MQTT-määrittelyksien mukainen välittäjäpalvelin tarjoaa myös viestien puskuroinnin mahdollisuuden [49]. MQTT on pääasiassa tarkoitettu kommunikointiin, missä kaista on rajallista

ja kommunikoinnista huolehtivan koodin jalanjälki täytyy olla pientä. Tästä syystä se on paljon käytetty standardi IoT-laitteissa (engl. Internet of Things) ja kotiautomaatiossa [23, s. 9–11].

AMQP-standardi on tarkoitettu MOM:in toteuttamiseen (engl. Message-Oriented Middleware) ja näin ollen mahdollistaa monen eri kommunikointiparadigman toteuttamisen [1, s. 6]. MOM tarkoittaa hajautetussa järjestelmässä *väliohjelmistoa* (middleware), jota käytetään lähettämään ja vastaanottamaan viestejä. MOM:in tarkoitus on tarjota heterogeeninen alusta viestien vaihtoon tekniikasta ja verkkoprotokollasta riippumatta [42]. AMQP-standardi mahdollistaa esimerkiksi viestijonot, etäkutsut ja erilaiset reititykset kuten pisteestä pisteeseen ja julkaisija-tilaaja. AMQP tarjoaa toteutukseen enemmän paradigma vaihtoehtoja kuin MQTT.

Tässä työssä toteutuksen tekniikaksi valittiin AMQP. AMQP tarjoaa kaikki vaaditut ominaisuudet välikäden toteuttamiseen. AMQP ei mahdollista joukkokommunikoinnin toteuttamista, mutta mahdollistaa julkaisija-tilaaja-paradigman. Aikaisemmin julkaisija-tilaaja-paradigma todettiin toteutukseen sopivaksi vaihtoehdoksi joukkokommunikoinnin kanssa. AMQP tarjoaa viestien puskuroinnin jokaista tilaajaa kohden ja komponenttien on mahdollista myös suodattaa viestejä kiinnostuksensa mukaan. MQTT olisi myös todennäköisesti sopinut toteutukseen, koska se tarjosi kaikki vaaditut ominaisuudet. Työssä kuitenkin päädyttiin AMQP:n valintaan tekijän aikaisemman kokemuksen ja muiden työntekijöiden keskustelun tuloksena. Viestien lähetykselle järjestelmässä ei vaadittu takuita, mutta nämä olisi hyvä olla olemassa tulevaisuuden takia. AMQP tarjoaa takuumeکانismit viestien lähettämiseen transaktioina ja vastaanottamiseen niiden kuittaamisella [1, s. 14,21]. Kuinka AMQP tarkalleen toimii, on tämän diplomityön ulkopuolella ja siitä kerrotaan vain lyhyesti kohdissa missä tietoa tarvitaan. Lukija lukea enemmän asiasta sen dokumentaatiosta [1] ja verkkosivulta [2].

4.5 Viestin formaatti

IED-laitteelle kommunikointi ja siltä tulevat viestit esitetään MMS-protokollan binäärimäärittelynsien mukaan. Jotta tilaavien komponenttien olisi helppo lukea viestin sisältö, täytyy se muuntaa toiseen muotoon. Hajautetussa järjestelmässä viestejä voidaan lähettää lähettäjän formaatin tai yhteisen hyväksytyn formaatin mukaan. Jos viestin lähettäjä päättää formaatin, täytyy viestissä olla tieto sen muodosta, jotta vastaanottajan on mahdollista se lukea. Järjestelmän yhteisessä formaatissa tätä tietoa ei tarvita, koska kaikki osapuolet käyttävät samaa formaattia ilman poikkeuksia. Viestejä voidaan lähettää binääri- tai tekstimuodossa. Binäärimuodossa datarakenteet esitetään binääreinä ja tekstimuodossa ne esitetään tekstimuodossa. Tekstimuoto on yleensä pidempi esitysmuoto kuin binäärimuoto.

Aikaisempien kappaleiden pohjalta päädyttiin kuvan 13 pohjaiseen arkkitehtuuriin. Arkkitehtuurissa väliohjelmiston tehtävä on tilata viestejä IED-laitteelta, muuntaa ne ymmär-

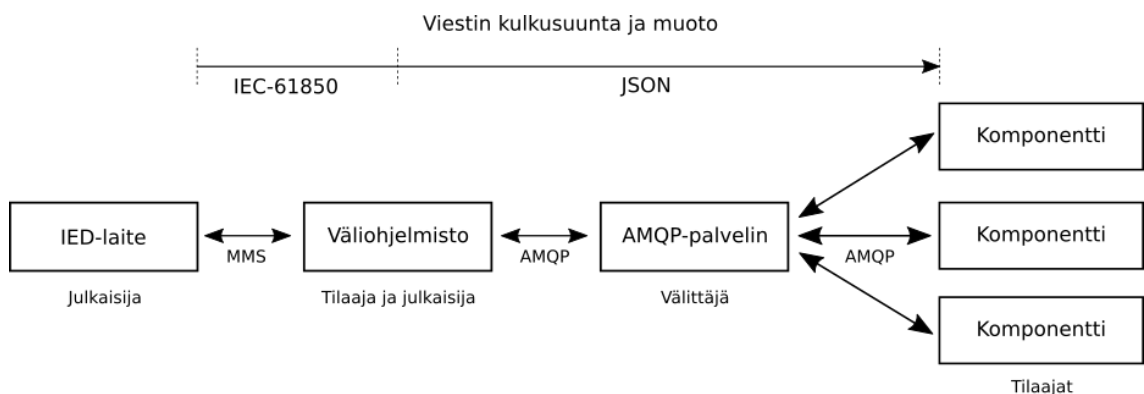
rettävään muotoon ja julkaista AMQP-välittäjäpalvelimelle. Järjestelmän komponentit tilaavat viestejä AMQP-palvelimelta tarpeidensa mukaan.

Järjestelmän komponenteille viestin lukeminen haluttiin pitää helppona ja viestin koolla ei ollut teknisiä rajoitteita. Tämän takia viestit päätettiin esittää mieluummin tekstiformaatissa. Tekstimuoto on helpompi ihmisen lukea esimerkiksi vikatilanteissa. Binääritiedon lukeminen yleensä tarvitsee erillisen ohjelman. Nykypäivänä web-teknologioissa on käytössä kaksi tunnettua tekstimuotoista esitystapaa, joita ovat XML (engl. *Extensible Markup Language*) [17] ja JSON (engl. *JavaScript Object Notation*) [32].

Työssä viestien välityksen tekniikaksi valittiin JSON. Viestin muutoksen JSON-muotoon tekee väliohjelmisto, joka tilaa viestit IED-laitteelta. JSON on nopeampi ja kevyempi tiedonsiirtoformaatti kuin XML [48]. Lisäksi JSON on nykypäivänä paljon käytetty tiedonsiirron muoto web-rajapinnoissa kuten REST (engl. *Representational State Transfer*). JSON:in lukeminen ihmiselle on helppoa ja sille on olemassa tuki valmiina monelle eri ohjelmointikielelle ilman erillistä kirjastoa. JSON on myös kasvattanut suosiotaan ajan saatossa XML:ään verrattuna [22]. Ja asiasta on kirjoitettu erilaisia blogiposteja kuten [64, 66, 53].

4.6 Yhteenveto

Eri analyysien ja vaatimusten pohjalta päädyttiin lopulta kuvassa 14 olevaan järjestelmän arkkitehtuuriin. Kuvassa on esitetty viestin kulku järjestelmän läpi ja sen muoto. Lisäksi osapuolten väliin on merkitty niiden käyttämät kommunikointiprotokollat.



Kuva 14. Suunniteltu korkean tason järjestelmän hajautus ja kommunikointiprotokollat osapuolten välillä.

Arkkitehtuurissa väliohjelmisto tilaa viestejä IED-laitteelta IEC 61850 -standardin mukaisesti MMS-protokollan avulla. Viesti päädyttiin muuttamaan JSON-formaattiin helpomman luettavuuden saamiseksi ja sen muuntamisen hoitaa väliohjelmisto. Välikäden kommunikointiprotokollaksi valittiin AMQP-standardi ja kommunikointiparadigmaksi julkaisija-tilaaja ja viestijono. Välikäsi tilaa viestejä IED-laitteelta ja uudelleenjulkaisee ne JSON-muodossa välittäjälle. Järjestelmän muut komponentit tilaavat viestejä välittäjältä

AMQP-standardin mukaisesti. Suunniteltua mallia tullaan tarkentamaan teknisesti myöhemmin kun suunnitellaan ohjelmiston toteutusta.

5. DEMOVERSION TOIMINTA JA ANALYYSI

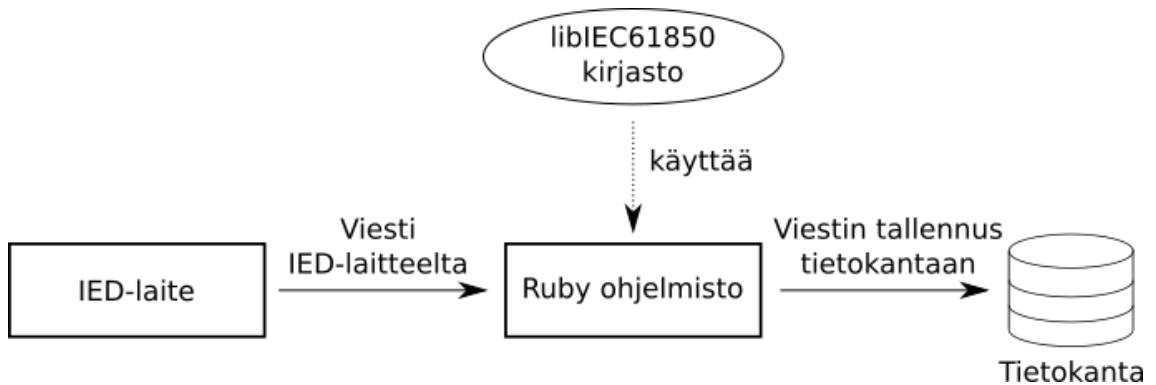
Ennen tämän työn aloitusta diplomityön tekijä oli kehittänyt ohjelmiston, joka kykeni viestien tilaukseen ja tallentamiseen. Ohjelma oli tarkoitettu demoksi tai prototyypiksi ennen varsinaista toteutusta. Demon tarkoituksena oli opettaa tekijää IEC 61850 -standardin suhteen, todentaa viestien tilaamisen mahdollisuus ja tuoda esille toteutukseen liittyviä ongelmia. Ohjelma kykeni tilaamaan viestejä yhden IED-laitteen kaikilta RCB-instansseilta, prosessoimaan viestit ja tallentamaan ne relaatiotietokantaan.

Demoa ei ollut mahdollista käyttää tuotannossa osana muuta järjestelmää sen arkkitehtuurin ja toiminnan epävarmuuden takia. Tässä kappaleessa käydään läpi demon toimintaa ja siihen liittyviä ongelmia. Demosta on tarkoitus analysoida sen toiminnan epävarmuutta ja saada selville mistä se mahdollisesti johtui. Näitä tietoja käytetään myöhemmin apuna uuden version suunnittelussa.

5.1 Arkkitehtuuri

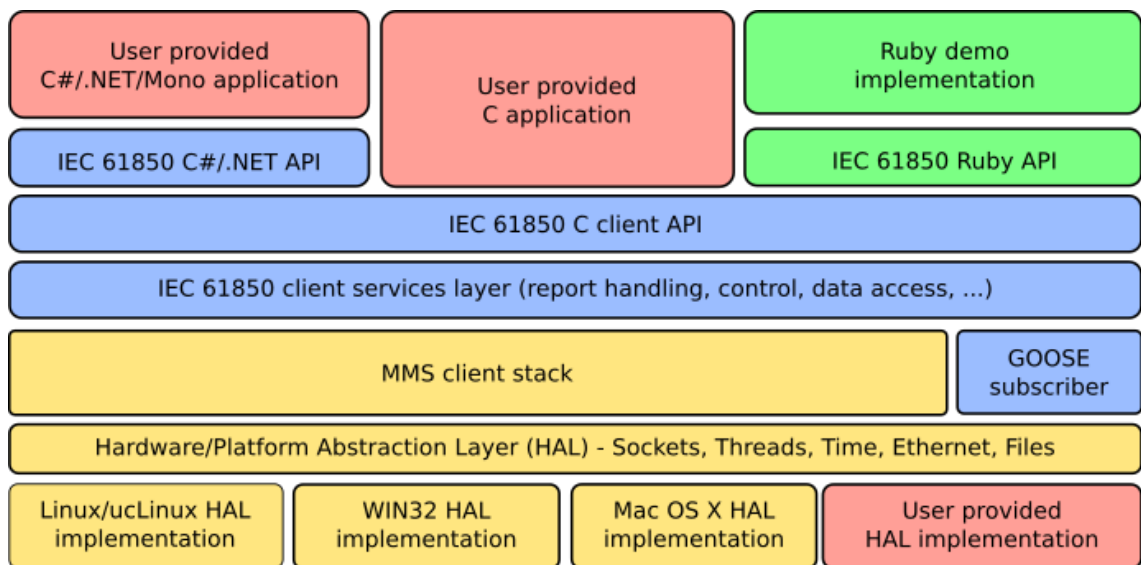
Demoversio oli ohjelmoitu Ruby-ohjelmointikielellä. Kuvassa 15 on esitetty demoversion arkkitehtuuri korkealla tasolla ja kuinka viesti IED-laitteelta siirtyy tietokantaan. Yksi ajettu demoversion prosessi pystyi tilaamaan yhden IED-laitteen kaikki RCB-luokkien instanssit. Instanssien tiedot luettiin relaatiotietokannasta. Ohjelmisto prosessoi viestit ja tallensi ne relaatiotietokantaan myöhempää käyttöä varten. Ruby-ohjelmistossa tärkeässä osassa oli *libIEC61850*-kirjasto [40]. *libIEC61850*-kirjasto on avoimen lähdekoodin C-kielellä toteutettu kirjasto, joka abstrahoi IEC 61850 -standardin matalan tason määrittämiä palvelukutsuja ja datarakenteita helppokäyttöiseksi rajapinnaksi. Kirjasto tarjosi toiminnallisuuden IED-laitteella olevan palvelinohjelmiston, sekä IED-laitetta käyttävän asiakasohjelmiston toteuttamiseen. IED-laitteen palvelimelle kirjasto tarjosi funktioita ja rakenteita standardin määrittämien luokkien hierarkian rakentamiseen ja käsittelyyn. IED-laitteen asiakasohjelmalle kirjasto tarjosi funktioita ja rakenteita standardin määrittämiin palveluihin, kuten arvojen lukuun ja asettamiseen, datajoukkojen käyttöön ja viestien tilaamiseen. Demoa toteutettiin käyttäen oikeaa IED-laitetta, joten kirjastosta tarvittiin vain sen asiakasohjelman ominaisuudet. Demon toteutuksen aikana kirjasto todettiin hyväksi vaihtoehdoksi ja sitä päätettiin käyttää myös uuden version toteutuksessa.

LibIEC61850-kirjasto on rakennettu käyttämään MMS-protokollaa tiedonsiirrossa IED-laitteen ja sen asiakasohjelman välillä IEC 61850 -standardin 8-1 osan mukaan. Kuvassa 16 on esitetty kirjaston kerrosarkkitehtuuri asiakasohjelmalle. Kirjastoon on toteutettu *laiteabstraktiokerros* (engl. *Hardware Abstraction Layer*, lyhennetään *HAL*). *HAL*:in avulla kirjasto voi toimia monella eri laitealustalla, ja käyttäjä voi tarvittaessa lisätä oman *HAL*-implementaation. Demoversiota suoritettiin Linux-käyttöjärjestelmällä, joten kirjastosta



Kuva 15. Ruby:lla toteutetun demoversion arkkitehtuuri ja tiedonsiirto.

käytettiin olemassa olevaa Linux HAL -toteutusta. Kuvassa 16 on punaisella merkitty laatikot, jotka kirjaston käyttäjä voi tarjota itse, keltaisella kirjaston uudelleenkäytettävät MMS-protokollan osuudet ja sinisellä IEC 61850 -standardin toteuttavat osuudet. Kuvaan on merkitty vihreällä demoon toteutetut osuudet, eli Ruby-kielelle liitos C-kieleen ja tämän päälle Ruby:lla toteutettu ohjelmisto.



Kuva 16. LibIEC61850-kirjaston kerrosarkkitehtuurin komponentit, vihreällä Ruby toteutukseen lisätyt osat (pohjautuu kuvaan [38]).

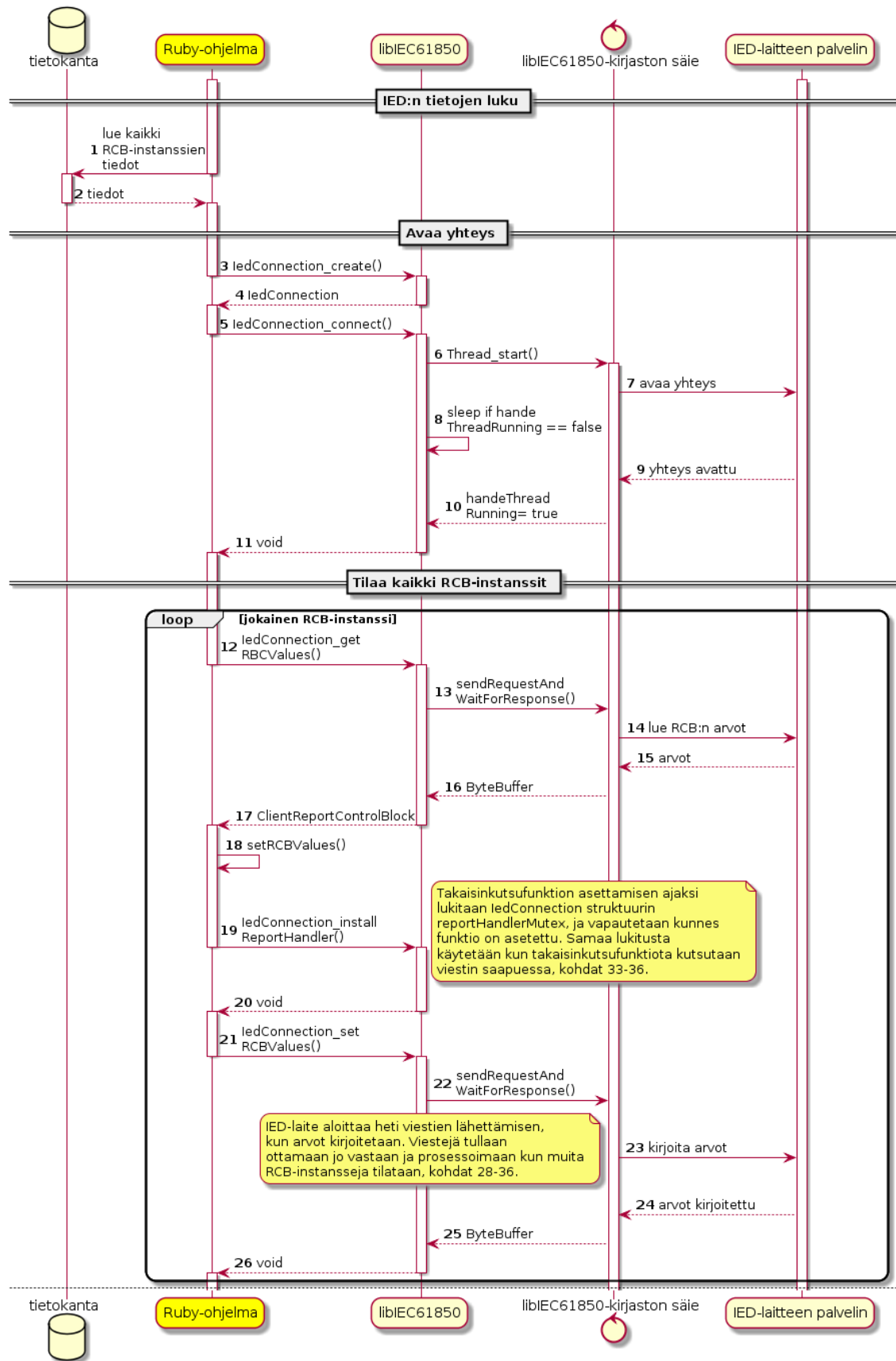
Ruby-koodista C-kielen funktioiden kutsuminen ei ole suoraan mahdollista, vaan kielten väliin täytyy toteuttaa liitos. Demoversion liitos oli tehty käyttäen Ruby:lle saatavaa *ruby-ffi*-kirjastoa [61] (engl. *Foreign Function Interface*, lyhennetään *FFI*). Liitoksen avulla Ruby voi kutsua C-kielen funktioita ja käyttää sen struktuureita ja muuttujia. Demossa kirjasto huolehti matalan tason IEC 61850 asiat, ja Ruby-osuus keskittyi liitoksen avulla viestien tilaamiseen, käsittelyyn ja tallentamiseen.

5.2 Toiminta

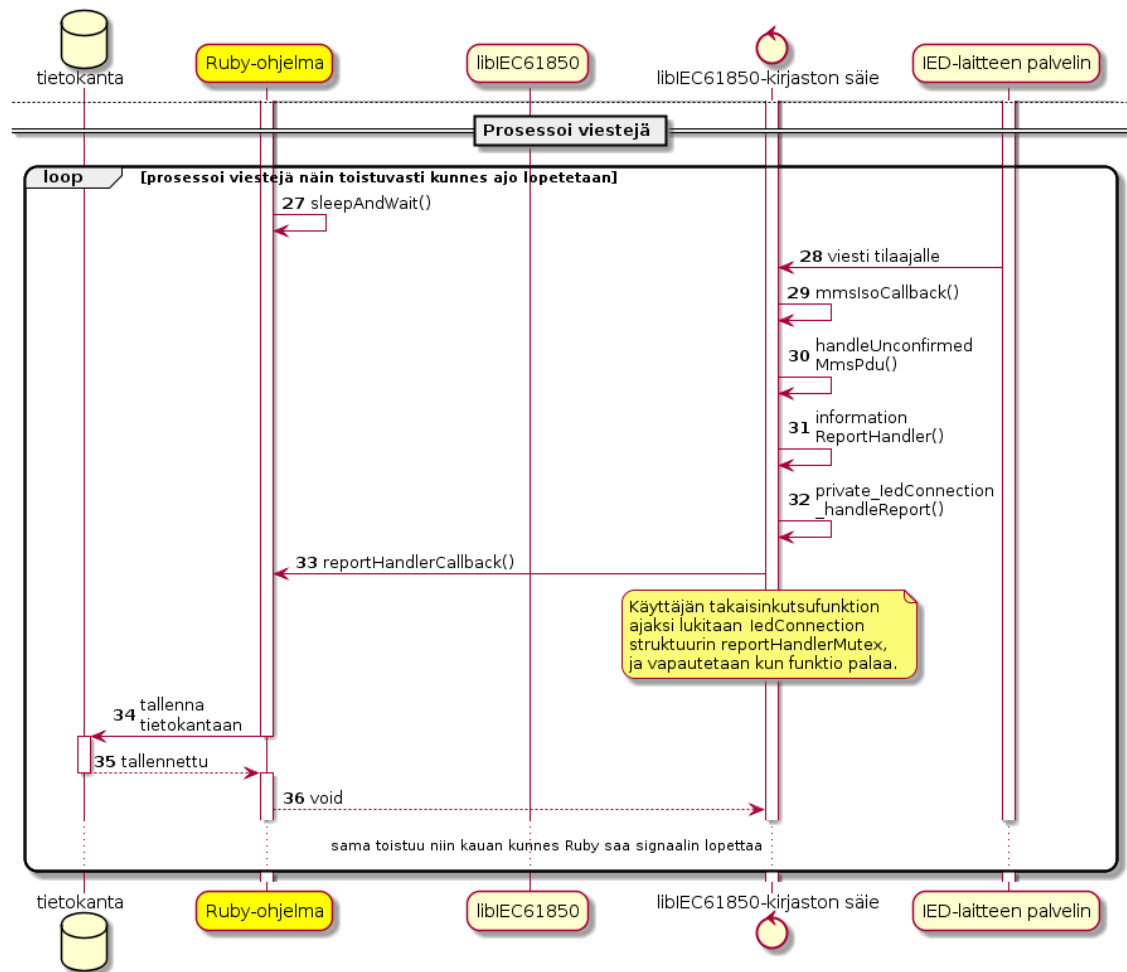
Ohjelman toiminta on esitetty sekvenssikaavioissa 17 ja 18. Sekvenssikaavio 17 jatkuu kuvassa 18. Kuvissa ohjelman kaksi eri silmukkaa on esitetty loop-laatikoilla. Sekvenssikaaviossa osallisena ovat tietokanta, Ruby-ohjelma, libIEC61850-kirjasto, libIEC61850-kirjaston natiivisäie ja IED-laitteen palvelinohjelma. Kirjaston natiivisäie on vastuussa yhteyden ylläpidosta ja datan siirtämisestä IED-laitteen ja kirjastoa käyttävän prosessin välillä. Sekvenssikaavioon on merkitty paksulla suorituksessa olevat palkit, esimerkiksi IED-laitteen palvelinohjelmisto on koko ajan suorituksessa. Kuvissa kaikki kohdat on numeroitu ja näihin viitataan tulevassa tekstissä.

IED-laitteella viestejä mahdollisesti generoidaan ja lähetetään samaan aikaan. Seurauksena niitä voi saapua libIEC61850-kirjastolle ennen kuin edellinen viesti on käsitelty. Tätä varten kirjasto toteuttaa sisäisen puskurin viestien vastaanottamiseen. Puskurista prosoidaan seuraava viesti, kun edellinen on prosessoitu. Toisin sanoen kirjasto ottaa viestejä vastaan sitä mukaa kun ne saapuvat ja ottaa niitä puskurista yksi kerrallaan saapumisjärjestyksessä. Kirjasto varaa yhden puskurin avattua yhteyttä kohti. Jos ohjelma avaa vain yhden yhteyden, kirjaston käyttäjän ei tarvitse huolehtia rinnakkaisuudesta. [51]

Ensimmäisenä ohjelma luki tietokannasta IED-laitteen, sekä sen kaikki RCB-instanssien tiedot. Tämän avulla ohjelma tiesi mikä IED-laitteen IP-osoite on ja mitkä olivat RCB-instanssien viitteet (kohdat 1–2). Tämän jälkeen ohjelma pystyi muodostamaan yhteyden IED-laitteelle tekemällä instanssin `IedConnection` struktuurista funktiolla `IedConnection_create()` (kohdat 3–4). Tämän jälkeen struktuuri annetaan `IedConnection_connect()` funktiolle, joka avaa yhteyden IED-laitteelle ja palaa vasta kun vastaus saapuu (kohdat 5–11). Tässä vaiheessa libIEC61850-kirjasto käynnistää erillisen natiivisäieen yhteyden viestien vastaanottoon. Tätä säiettä kirjasto käyttää tulevien viestien vastaanottoon ja lähettämiseen. Yhteyden avauksen jälkeen jokainen RCB-instanssi tilataan lukemalla ensin sen arvot IED-laitteelta funktiolla `IedConnection_getRCBValues()` (kohta 12). Funktiokutsu nukkuu ja palaa vasta, kunnes erillinen säie ilmoittaa, että vastaus on saapunut tai yhteyden aika ylittyy. Kirjaston funktio `sendRequestAndWaitForResponse()` nukkuu ja odottaa vastausta (kohdat 13–16). RCB-arvot luettuaan, kirjasto palauttaa struktuurin `ClientReportControlBlock`, joka sisältää luetut tiedot RCB-instanssista (kohta 17). Samaa struktuuria käytetään arvojen muuttamiseen ja niiden takaisin kirjoittamiseen IED-laitteelle. Ennen muunneltujen RCB-arvojen takaisin kirjoittamista ja viestien tilaamista, täytyy kirjastolle asettaa takaisinkutsufunktio, jota kirjasto kutsuu aina kun tilattu viesti saapuu IED-laitteelta. Takaisinkutsufunktioksi asetetaan funktiolla `IedConnection_installReportHandler()` (kohdat 19–20). Asetuksen ajaksi kirjasto lukitsee `reportHandlerMutex`:in. Tätä samaa lukitusta käytetään, kun takaisinkutsufunktiota kutsutaan viestin saapuessa (kohdat 33–36). Tilanteessa, jossa takaisinkutsufunktiota asetetaan samalla kun viesti on saapunut, joutuu toinen osapuoli odottamaan lukituksen vapautumista. Tämän jälkeen arvot kirjoitetaan takaisin IED-laitteelle funktiolla `IedConnection_setRCBValues()` (kohdat



Kuva 17. Sekvenssikaavio kuinka Ruby-ohjelma avaa yhteydet ja tilaa kaikki IED-laitteen RCB-instanssit (jatkuu kuvassa 18).



Kuva 18. Sekvenssikaavio kuinka Ruby-ohjelma prosessoi ja tallentaa viestejä libIEC61850-kirjastoa käyttäen (jatkoa kuvalle 17).

21–26). Tämä funktio palaa vasta kun IED vastaa tai yhteyden aika ylittyy. Heti arvojen kirjoitusten jälkeen IED aloittaa lähettämään viestejä tilaajalle. Eli samalla kun muita RCB-instansseja tilataan, tilatut RCB-instanssit lähettävät jo viestejä ja aiheuttavat takaisinkutsufunktion suorittamisen. Kun kaikki RCB-instanssit on tilattu, ohjelma jää viimeiseen silmukkaan odottamaan ja prosessoimaan viestejä (kohdat 27–36). Kun viesti saapuu, säie kutsuu ensin sisäisesti `mmsIsoCallback()` funktiota, joka kutsuu muita kirjaston sisäisiä funktioita ja lopuksi asetettua takaisinkutsufunktiota (kohdat 28–33). Takaisinkutsufunktio on liitetty Ruby-funktioon, joka tallentaa raportin tiedot tietokantaan (kohdat 33–36). Ruby-funktion suorituksen ajaksi kirjasto lukitsee `reportHandlerMutex`:in, ja vapautetaan kunnes Ruby-funktion suoritus palaa. Tätä jatkuu niin kauan kunnes ohjelmalle lähetetään jokin signaali joka lopettaa sen suorituksen. [51]

5.3 Ongelmien analyysi

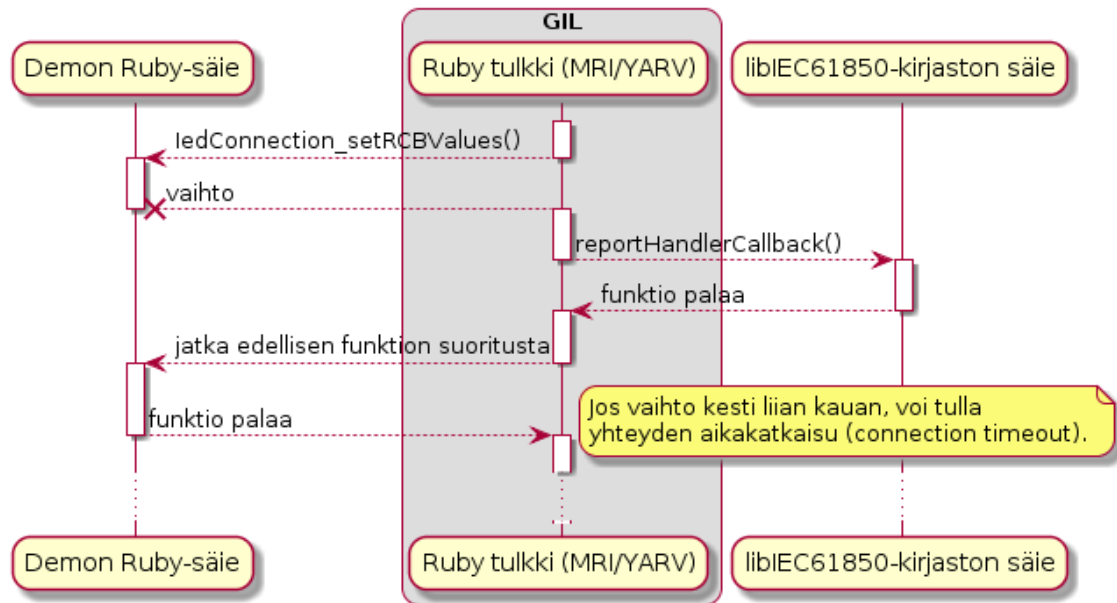
Demo oli toteutettu käyttäen *Ruby on Rails* -kehystä, lyhennetään *RoR*. RoR on tarkoitettu web-sovellusten kehittämiseen Ruby-kielellä. Demo toteutettiin suoritettavaksi RoR:in

tarjoamalla Ruby-koodin suorituksen mekanismilla [60]. Mekanismi sallii Ruby-koodin suorituksen RoR:in kontekstissa. Konteksti salli järjestelmän kirjastojen ja koodien käytön demossa. Huonona puolena tässä oli, että yksinkertaisen ohjelman suoritus vaatii järjestelmän kontekstin muistiin lataamisen ennen suoritusta. Tästä seurauksena yksi suoritettu demon prosessi varasi muistia noin 150 Mt, verrattuna uuteen RoR-projektiin, joka vei noin 67 Mt muistia. Ohjelman yksinkertaisuuteen nähden varatun muisti määrä on suuri ja sitä olisi mahdollista pienentää.

Demossa isoimpana ongelmana oli sen huono suorituskyky ja toiminnan epävarmuus RCB-instanssien määrän ollessa enemmän kuin muutama. RCB-instanssien määrän ollessa liian suuri ohjelma saattoi epäonnistua osan tilaamisessa, koska yhteys aikakatkaistiin arvojen kirjoituksessa tai luvussa. Lisäksi ongelmaksi muodostui usean RCB instanssin tilaamisen kulunut aika. Yhteensä aikaa saattoi kulua noin 30 sekuntia 10 instanssin tilaamiseen. RCB-instanssien määrä vaihtelee IED-laitteen mukaan. Tässä työssä käsitellyt määrät olivat 3–13 instanssia.

Huonoon suorituskykyyn oli syynä muutama asia. Yksi niistä oli Ruby-kielen huonompi suorituskyky verrattuna natiivisti käännettyyn C-kieleen. Ruby on tulkattava kieli kuten esimerkiksi Python, joka tulkataan rivi kerrallaan ja suoritetaan. Lähdekoodia ei käännetä kokonaan ensin konekäsikykiksi erillisellä kääntäjällä, kuten C-kielessä. Valmiiksi käännetty lähdekoodi tarvitsee vain ajaa, kun taas tulkattavassa kielessä rivi täytyy ensin tulkata ja sitten ajaa. Ruby:ssa käytettiin sen oletustulkkia *MRI/YARV* (engl. *Matz's Ruby Interpreter*, lyhennetään *MRI* tai *Yet another Ruby VM*, lyhennetään *YARV*). Ruby versiosta 1.9 eteenpäin käyttää YARV-tulkkia. Toinen syy oli Ruby-kielen oletustulkissa oleva *globaali tulkkilukitus* (engl. *Global Interpreter Lock*, lyhennetään *GIL*, tai *Global Virtual Machine Lock*, lyhennetään *GVL*). *GIL* pakottaa Ruby-ohjelman ajoon vain yhdellä ytimellä ja vain yksi säie vuorossa kerrallaan ja on täysin riippumaton käyttöjärjestelmän vuorottajasta [50, s. 131–133]. Kuvassa 19 on esitetty kuinka Ruby-tulkki vuorottaa kahta ajossa olevaa säiettä. Kuvassa demon Ruby-koodi kutsuu `IedConnection_setRCBValues()` funktiota, ajo jää kesken ja tapahtuu vaihto, koska viesti saapui. Takaisinkutsufunktio suoritetaan ja suoritus palaa takaisin aikaisempaan funktion suoritukseen. Tässä vaiheessa, jos vaihto on huonolla hetkellä ja kesti liian kauan, tulee yhteyden aikakatkaaisu ja RCB-instanssi jää tilaamatta. Huonoon suorituskykyyn mahdollisesti vaikutti myös lukitus `reportHandlerMutex`, jota kirjastossa käytetään, kun takaisinkutsufunktio asetetaan tai sitä suoritetaan. Lukitus aiheuttaa säikeen nukkumisen niin kauan kunnes lukitus vapautuu. Tässä tapauksessa, jos viestin prosessointi kestää liian kauan (kuvassa 18 kohdat 33–36) ja samalla tilataan muita RCB-instansseja (kuvassa 17 kohdat 12–26). Säie joutuu odottamaan lukituksen vapautusta takaisinkutsufunktion asettamisen ajan (kohdat 19–20). Ratkaisuna tähän olisi pitää takaisinkutsufunktio mahdollisimman lyhyenä suoritusajan suhteen. [37, 63]

Edellä mainittujen lisäksi demototeutuksessa oli muistivuoto huonon ohjelmoinnin takia. Muistivuoto on tilanne missä ohjelma varaa lisää muistia ilman, että sitä vapautetaan takaisin käyttöjärjestelmälle. Muistivuoto johtui todennäköisesti ohjelmointivirhe-



Kuva 19. Ruby-tulkin globaalin lukituksen toiminta, joka vuorottaa ajossa olevia säikeitä riippumatta käyttöjärjestelmän vuorottajasta.

tä ruby-ffi -kirjastolla. Kun liitos Rubysta tehdään C-kieleen, täytyy ohjelmoijan miettiä varatun muistin vapauttamista. Ruby-ohjelmoijan ei normaalisti tarvitse tästä huolehtia automaattisen roskien keruun ansiosta. Muistivuoto havaittiin kun ohjelma jätettiin suoritukseen pitemmäksi aikaa ja se oli varannut melkein kaiken käyttöjärjestelmän muistista itselleen. Tämän pystyi havaitsemaan helposti ohjelman suorituksen aikana Linuxin htop-ohjelmalla MEM%-sarakkeesta. Sarake kertoo prosessin käyttämän prosentuaalisen osuuden koko käyttöjärjestelmän muistista [56]. Luku kasvoi tasaisesti ja sen verran nopeasti, että sen havaitseminen oli mahdollista ilman pitempää suoritusaikaa.

5.4 Yhteenveto

Demon jatkokehitys toimivaksi olisi vaatinut paljon vaivaa huomioon ottaen tässä kappaleessa käsitellyt ongelmat. Tämän lisäksi sen kehityksessä ei ollut huomioitu järjestelmän hajautuksen vaatimuksia. Tiedon jakaminen muun järjestelmän kanssa tietokannan kautta ei ole hyvä ratkaisu. Se johtaisi tilanteeseen missä järjestelmän komponentit lukisivat viestejä tietokannasta jatkuvasti, ilman tietoa milloin uusi viesti on saapunut. Tästä aiheutuu turhaa kuormaa tietokannalle ja komponentin saama tieto ei välttämättä ole ajan tasalla. Isoilla muutoksilla demo olisi ollut mahdollista saada täyttämään asetetut vaatimukset ja sen ongelmat korjattua. Demo kuitenkin päätettiin korvata kokonaan uudella toteutuksella sen vaatiman työmäärän takia.

Ohjelmiston huonoon suoritussykyyn ja epävarmuuteen pääasiassa on syynä Ruby-kielen GIL ja suoritussyky tulkattavana kielenä. Varatun muistin määrän oli suuri yksinkertaista ohjelman ajamista varten. Syynä todennäköisesti oli RoR-kehityksen ajoympäristö, joka latti muistiin muuta järjestelmää ja sen kirjastoja. Ohjelmassa oli muistivuoto, joka toden-

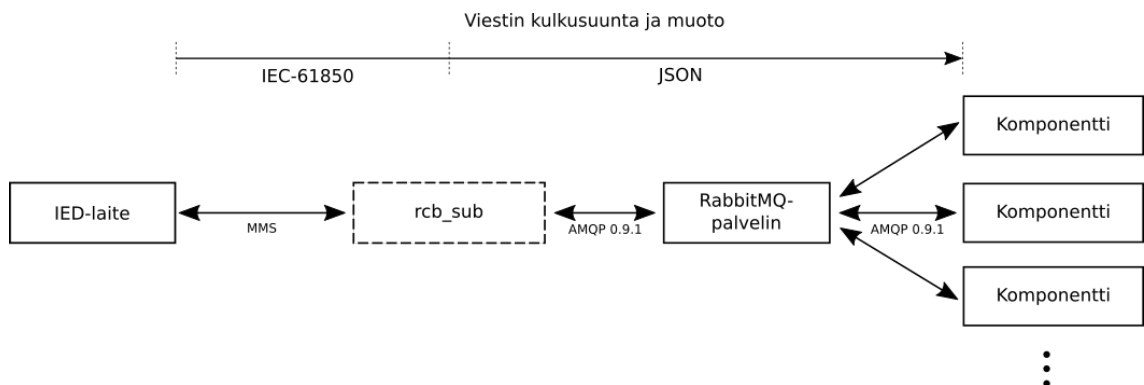
näköisesti johtui Ruby:n ja C-kielen liitoksen huonosta ohjelmoinnista. Edelle mainittuja tietoja käytetään apuna suunnittelussa esimerkiksi tekniikoiden valinnassa. Demototeutuksen perusteella libIEC61850-kirjasto todettiin hyväksi ja sitä käytettiin myös uudessa versiossa. Suunnittelussa kysymyksenä jää miettiä mitkä tekniikat valitaan toteutukseen, jotta suorituskyyongelmat vältetään ja varattu muisti pidetään pienenä. Muistivuoto ohjelmassa taas vältetään huolellisella ohjelmoinnilla.

6. SUUNNITTELU

Tässä kappaleessa käydään läpi uuden järjestelmän teknistä suunnittelua. Halutun systeemin arkkitehtuuri oli esitetty aikaisemmin kuvassa 14. Tämän osion suunnittelu koskee väliohjelmistoa ja AMQP-välittäjää. Suunnittelu ja päätökset pohjautuvat työssä aikaisemmin käsiteltyihin päätelmiin ja tuloksiin. Suunnittelu aloitetaan ensin antamalla kattava kokonaiskuva lukijalle. Tämän jälkeen tulevilla kappaleilla mennään tarkemmin yksityiskohtaan ja kerrotaan miten päätökset tehtiin.

6.1 Kokonaiskuva

Suunnittelun ohjelman toiminta noudatti paljon demon toimintaperiaatteita pienin muutoksin. Kaiken aikaisemman tiedon ja suunnittelun pohjalta päädyttiin kuvassa 20 esitettyyn systeemin arkkitehtuuriin. Kuva tarkentaa aikaisemmin suunniteltua arkkitehtuuria (kuva 14) tekniikoilla ja nimillä.



Kuva 20. Suunnittelun järjestelmän arkkitehtuuri sekä viestin kulku ja muoto sen osapuolten läpi.

AMQP-välittäjäpalvelin päädyttiin toteuttamaan RabbitMQ ohjelmistolla, joka on AMQP-standardiin perustuva välittäjäohjelmisto [59]. Väliohjelmistolle annettiin nimeksi `rcb_sub` ja on merkitty kuvaan katkoviivalla. Nimeä käytetään tästä eteenpäin tekstissä viittaamaan kyseiseen komponenttiin. Kuvassa vasemmalla on IED-laite, josta `rcb_sub` tilaa viestit MMS-protokollan avulla. `Rcb_sub` prosessoi saapuneet viestit JSON-muotoon ja uudelleenjulkaisee ne RabbitMQ-palvelimelle. Järjestelmän muut komponentit tilaavat JSON-viestejä välittäjäpalvelimelta tarpeidensa mukaan.

`Rcb_sub` päädyttiin toteuttamaan C-kielellä komentorivipohjaiseksi ohjelmistoksi. Tilauksen tekemiseen tarvittavat tiedot ohjelmalle annettiin komentoriviparametreinä. `Rcb_sub` pystyi tilaamaan yhden IED-laitteen halutun määrän RCB-instansseja. AMQP-standardista

on olemassa eri versioita ja valittu RabbitMQ-ohjelmisto käytti versiota 0.9.1. Rcb_sub käytti demosta tuttua libIEC61850-kirjastoa hoitamaan matalan tason IEC 61850 -standardin toiminnallisuuden.

6.2 AMQP-välittäjäpalvelin

AMQP-pohjaisen välittäjäpalvelimen toteutukseen löytyy erilaisia ohjelmistoja. Joita on mm. RabbitMQ, Apache Qpid ja StormMQ. Työssä AMQP-pohjaisen palvelimen toteuttamiseen valittiin RabbitMQ. RabbitMQ on ilmainen avoimen lähdekoodin välittäjäpalvelin ja sille on olemassa kattava tuki monelle eri kielelle asiakasohjelmiston toteuttamiseen [15]. Vertailun perusteella se vaikutti toteutukseen varteenotettavimmalta vaihtoehdolta.

AMQP-standardista on julkaistu monta eri versiota, ja työn tekohetkellä viimeisin versio oli 1.0. RabbitMQ-ohjelmisto on suunniteltu käytettäväksi standardin version 0.9.1 kanssa, ilman asennettuja lisäosia. Versioiden välinen ero on suuri ja siirto uuteen ei ollut mahdollista, koska standardin versiot eivät olleet keskenään yhteensopivat. RabbitMQ tuki versiota 0.9.1 ja sen kehittäjät mieltävät standardin version 1.0 kokonaan eri protokollaksi [58]. Tämä ei kuitenkaan sen käyttöä haitannut, koska versio 0.9.1 kattaa kaikki suunnitellut hajautetun järjestelmän paradigmat. Paradigmoja olivat viestijono ja julkaisija-tilaaja. RabbitMQ:ta voi käyttää AMQP version 1.0 kanssa erillisellä lisäosalla. RabbitMQ lupaa jatkaa version 0.9.1 tukemista, jolloin sitä on myös mahdollista käyttää jatkossakin [58].

6.3 Tilauksen orkestrointi ja tiedon välitys

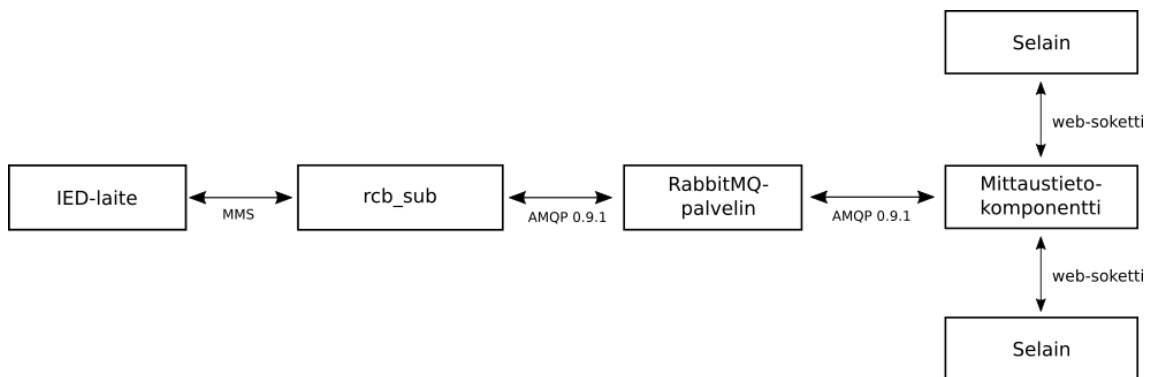
Muun järjestelmän on tarkoitus ohjata rcb_sub-ohjelman suoritusta. IED-laitteilta viestien tilauksia käyttäjä voi ohjata järjestelmän käyttöliittymästä. Tilauksen aloittaessa järjestelmä käynnistää rcb_sub-ohjelmiston omana prosessinaan yhtä IED-laitetta kohti. Tilauksen loputtua järjestelmä lopettaa rcb_sub-prosessin suorituksen. Suorituksen aikana tulevat virheet ohjataan järjestelmälle, joka voi toimia tarvittaessa niiden mukaan, esimerkiksi käynnistää prosessin uudestaan. Kaikkien rcb_sub-prosessien on tarkoitus ohjata JSON-viestit saman RabbitMQ-palvelimen läpi muulle järjestelmälle.

Rcb_sub-ohjelmaa oli tarkoitus ajaa prosessina, siispä se ei tarvinnut käyttöliittymää. Tämän takia se päätettiin toteuttaa komentorivipohjaisena ohjelmana. Muu järjestelmä oli rakennettu suoritettavaksi Linux-käyttöjärjestelmän päällä, joten rcb_sub toteutettiin myös samalle käyttöjärjestelmälle. Jotta rcb_sub voi tehdä tilauksen IED-laitteelle ja tietää mikä RCB-instanssi tilataan, täytyy järjestelmän tarjota tämä tieto. Tarvittavaa tietoa ovat IED-laitteen ja AMQP-palvelimen IP-osoitteet, tilattavien RCB-instanssien viitteet ja arvot, viestien julkaisuun välittäjäpalvelimelle tarvittavat tiedot. RCB-instanssille kirjoitettavat arvot sisältävät vaihtoehtoiset kentät (OptFlds) ja liipaisimet (TrgOps). Julkaisuun tarvittavia tietoja ovat käytettävän *vaihteen* (engl. *exchange*) nimi ja *reititysavain* (engl. *routing key*). Vaihde on AMQP-palvelimella käsite, johon tilaajat tekevät tilauksia ja on vastuussa viestien reitittämisestä oikeille tilaajille. Reititysavain on viestin tunniste millä

se julkaistaan. Tämän ja tilaajan tekemän tilauksen mukaan vaihde reitittää viestit oikeille tilaajille. Toisin sanoen reititysavain sisältää IED-laitteen tunnisteen, mistä viesti on peräisin ja tämän perusteella tilaaja voi tilata haluamansa IED-laitteen viestit.

Tiedon välittämiseen prosessien välillä on olemassa monia eri tapoja. Jos tieto on pysyvää ja siinä ei ole muutoksia, yksi vaihtoehto olisi ollut konfiguraatiotiedosto. Järjestelmässä kuitenkin tilattavien RCB-instanssien määrä ja IED-laitteen tiedot voivat muuttua. Tämän takia päädyttiin käynnistyksen yhteyteen annettuihin komentoriviparametreihin. Muu järjestelmän osa, joka rcb_sub-prosessin käynnistää, voi kaiken tarvittavan tiedon antaa prosessille parametreilla käynnistyksen yhteydessä. Vaikka tieto tilauksien välillä muuttuu, prosessi käynnistetään aina viimeisimmillä tiedoilla. Ohjelmalle ei ollut asetettu vaatimusta, että tietoja pystyisi muuttamaan tilauksen aikana. Jos tietoja tarvitsee muuttaa, lopetetaan edellinen tilaus ja käynnistetään uusi prosessi uusilla parametreilla. Sama periaate on myös järjestelmän käyttöliittymässä. Myöhemmin tulevaisuudessa tarpeen vaatiessa voidaan siirtyä dynaamisen tilauksen muutokseen, mutta tällä hetkellä sille ei ollut tarvetta.

AMQP ei tarjoa julkaisujen mainostukseen mahdollisuutta, kuten käsiteltiin julkaisijatailaaja-paradigman yhteydessä [1]. Järjestelmän komponenttien pitää saada tieto olemassa olevista julkaisijoista muulta järjestelmältä. Tämä tieto järjestelmässä siirretään komponenteille tietokannan kautta. Kuvassa 21 on esitetty käyttötapaus esimerkki, jossa mittaustietoa käyttävä komponentti tilaa viestejä ja lähettää sen käyttäjän selaimen käyttöliittymään web-sokettia pitkin [18]. Selaimessa JavaScript-koodi päivittää käyttöliittymän komponentteja saadun tiedon mukaan.



Kuva 21. Esimerkkikäyttötapaus, jossa mittaustietoa tilaava komponentti lähettää tietoa selaimen käyttöliittymään web-soketin avulla.

6.4 Suorituskyky ja kielen valinta

Ennen koko ohjelman uudelleenkirjoitusta, kokeiltiin demoa korjata vaihtamalla Ruby-tulkkiä. Rubyn oletustulkki yritettiin vaihtaa JRuby-tulkkiin [33]. Tavoitteena vaihdossa oli saada Ruby-ohjelma toimimaan ilman globaalia tulkkilukitusta (GIL). JRuby on Ruby-tulkki, joka suorittaa Ruby-koodia *Java-virtuaalikoneen* (engl. *Java Virtual Machine*,

lyhennetään *JVM*) päällä. JRuby mahdollistaa säikeiden suorituksen rinnakkain JVM:n omilla säikeillä ja näin ollen suorituksen pitäisi olla nopeampaa [67]. Aidolla rinnakkaisuudella ohjelman suoritus ei olisi pysähtynyt viestin saapuessa takaisinkutsufunktion suorituksen ajaksi. Tämä ei vielä olisi kuitenkaan ratkaissut kaikkia ohjelmassa olevia ongelmia, kuten muistivuotoa ja hitaampaa suorituskkyä verrattuna käännettävään kieleen. Tämä toteutus ei kuitenkaan toiminut, ja yrityksen jälkeen päätettiin palata suunnitelmaan kirjoittaa koko ohjelma uudestaan. JRuby ei tukenut kaikkia projektin käyttämiä kirjastoja. Seurauksena olisi ollut saman projektin ylläpitäminen kahdelle eri tulkille tai asennettavien kirjastojen erottaminen. Kaikkiaan oli helpompaa kirjoittaa ohjelma alusta toisella tekniikalla.

Uuden toteutuksen kieleksi valittiin C-kieli. Isona syynä kielen valintaan oli sen suorituskky. C-koodi käännetään alustalle suoraan konekäskyiksi, joiden suoritus on nopeampaa kuin tulkattavan kielen, kuten Ruby ja Python. Valintaan vaikutti myös tekijän iso mieltymys matalan tason ohjelmointiin ja C-kieleen. Kielen valinnan yhteydessä varmistettiin kaikkien suunniteltujen liitosten mahdollisuus. C-kielelle löytyi kirjastoja RabbitMQ-välittäjäpalvelimen käyttämiseen ja lisäksi JSON-rakenteen muodostamiseen. Hyötynä vielä C-kielen valinnasta oli, että demossa käytettyä libIEC61850-kirjastoa pystyttiin käyttämään suoraan ilman erillistä liitosta, koska kirjasto oli myös toteutettu C-kielellä.

6.5 JSON-viestin rakenne

IED-laitteelta saapuva viesti päädyttiin muuntamaan JSON-muotoon helpompaa lukemista varten. LibIEC61850-kirjastossa viestin tiedot esitetään ClientReport-struktuurin instanssina. Sen sisältöä voi lukea käyttämällä kirjaston tarjoamia funktioita [39]. Liitteessä A on esitetty JSON-viestin rakenne mihin päädyttiin. JSON:n noudattaa pääosin standardin mukaista viestin rakennetta. Standardin määrittämä viestin rakennetta ja sisältöä käytiin läpi kappaleessa 2.8. Erona standardin malliin on, että *rcb_sub* lisäsi jokaiseen attribuuttiin sen koko viitteen, tyypin ja koon bitteinä. Nämä tiedot todettiin tarpeellisiksi, koska niiden avulla tilaajan on helpompi ymmärtää viestin sisältö. Tarvittavat lisätiedot luetaan IED-laitteelta erillisellä palvelukutsulla ennen tilauksen aloittamista. Nämä tiedot yhdistetään saapuneen viestin kanssa ja sijoitetaan JSON-rakenteeseen. Tulevassa tekstissä käydään läpi JSON:in rakennetta ylhäältä alaspäin ja viitataan liitteen A rivinumeroihin.

JSON:in päätaso sisältää standardin mukaista viestin informaatiota riveillä 2–6. Viestin kenttien määrää pystyi muuttamaan RCB-instanssin *OptFlds*-attribuutilla. JSON:iin kuitenkin haluttiin lisätä kaikki mahdolliset kentät selkeyden vuoksi. Jos kenttä puuttui viestistä, asetettiin sen arvoksi JSON:issa *null*-arvo. Esimerkiksi kentän *confRevision* arvo rivillä 4 on *null*. Tällöin RCB-instanssissa *OptFlds*-attribuutin *conf-revision*-bitti on ollut epäatosi. Samaa periaatetta käytettiin kaikille muillekin vaihtoehtoisille kentille. Tällä periaatteella viestin *OptFlds*-kentän arvo voitiin kokonaan jättää pois JSON:ista.

JSON-rakenne koostuu kahdesta sisäkkäisestä *values*-taulukosta (alkavat riveiltä 7 ja 13). Ensimmäinen *values*-taulukko riveillä 7–90 sisältää viestissä olevat datajoukon FCD- tai FCDA-viitteet ja niihin liittyvät kentät. Samalla periaatteella, kuin standardin määrittämässä viestin rakenteessa taulukon arvot 1–n:ään (kuva 6). Eli viestin *Reason Code* arvo on laitettu *reasonForInclusion*-attribuuttiin. Viestin *DataRef*-kenttä on pilkottu kolmeen eri kenttään *mmsReference*, *reference* ja *functionalConstraint*. Viestien viitteet tulevat MMS-protokollamäärittäytymisen muodossa, eli pisteet (.) on korvattu dollarin merkillä (\$) ja viite sisältää funktionaalisen rajoitteen. Nyt *mmsReference* sisältää viestin alkuperäisen MMS-viitteen, *reference* sisältää standardin abstraktin viitteen ja *functionalConstraint* sisältää funktionaalisen rajoitteen. Nämä on erotettu selkeyden takia, koska mahdollisesti jotkin komponentit saattavat tarvita standardin käyttämää abstraktia viitettä ja näin välttää tekstimuunnokset.

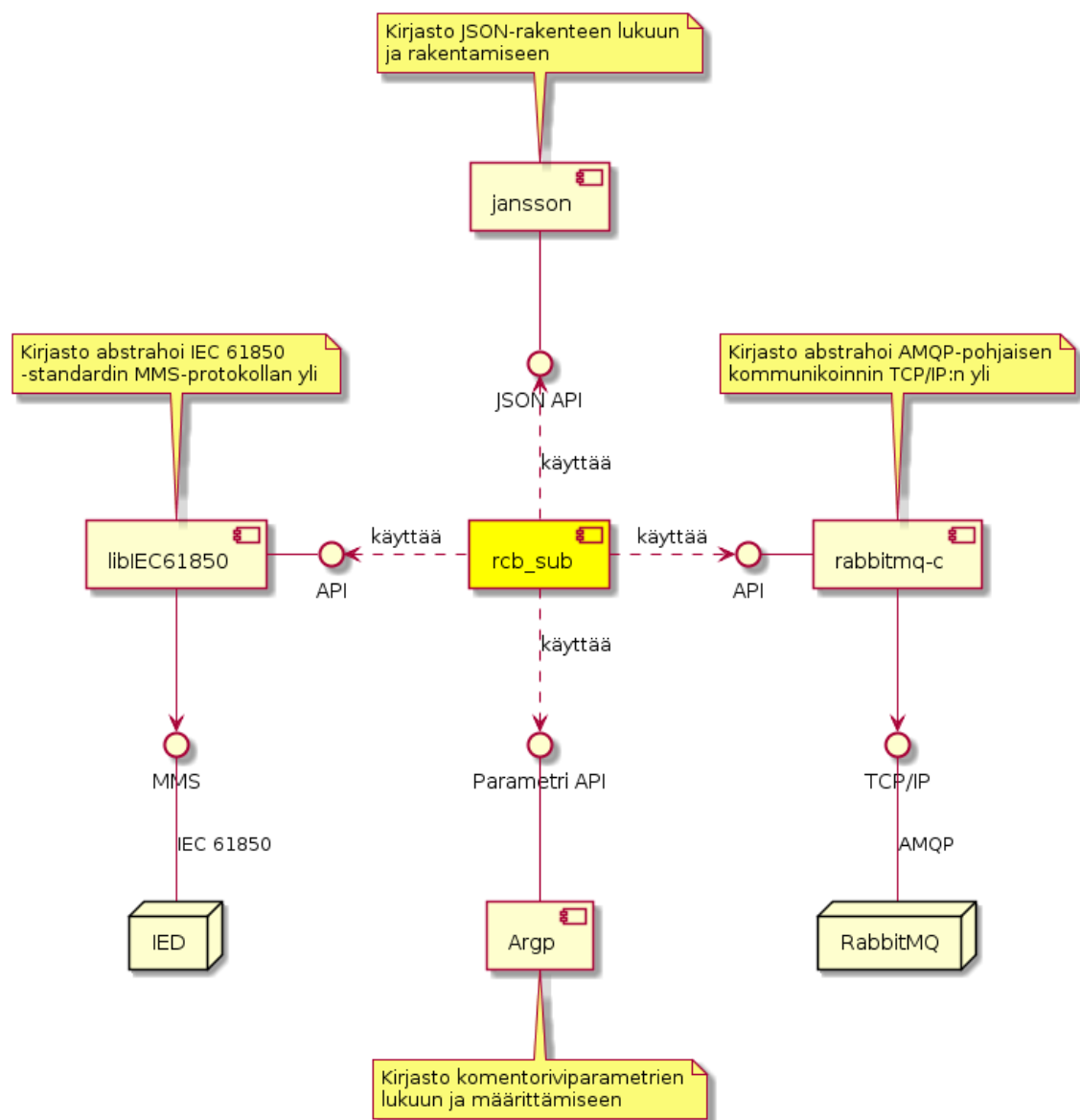
JSON:in sisempi *values*-taulukko riveillä 13–31 sisältää FCA- tai FCDA-viitteen viitattut attribuutit. Jokaiseen attribuuttiin lisättiin sen koko viite, tyyppi ja koko bitteinä. Viitteen avulla tilaaja voi yhdistää arvon attribuuttiin ilman tietoa IED-laitteen hierarkiasta. Standardin määrittämässä viestissä saapuva viite on datajoukon FCD- tai FCDA-viittaus ja sen alla taulukko pelkkiä arvoja. Taulukon arvot ovat hierarkiassa oikeasti viitattujen attribuuttien arvoja. Standardin viestin ymmärtämiseen tilaaja tarvitsee lisätietoa IED-laitteen hierarkiasta, jotta arvo voidaan yhdistää oikeaan attribuuttiin. Lisäämällä tiedot viestiin helpotetaan järjestelmän komponenttien kehitystä ja arvojen lukua. Esimerkiksi riveillä 20–24 attribuutti LD0_CTRL/CBCILO1.EnaCls.q, joka on tyyppiä *bit-string*, on 13-bittia pitkä ja sen arvo on 0. Standardin mukainen viesti sisältää vain arvon 0 ja siihen viittaavaan FCDA-viitteen LD0_CTRL/CBCILO1.EnaCls. Standardin viestin pohjalta tilaajan täytyy katsoa arvon indeksi viestistä. Indeksillä tietää IED-laitteen hierarkiassa viitteestä LD0_CTRL/CBCILO1.EnaCls alaspäin viitattu attribuutti. Standardin mukainen ratkaisu on vaikea ja ei sovi tarkoituksiin.

Lisätyt kentät sisältävät joitakin poikkeuksia. Kokoa bitteinä ei ole lisätty *boolean* ja *utc-time* tyyppisille attribuuteille, koska tätä tietoa ei saa IED-laitteelta. *Bit-string* tyyppille lisättiin kaksi arvo-kenttää *valueLittleEndian* ja *valueBigEndian* yhden sijaan, koska se on mahdollista lukea eri bittijärjestyksellä (engl. little ja big endian). Aikayksiköt päätettiin antaa suoraan samassa formaatissa kuin viestissä. Viestin päätason aika-leima on millisekunteja UNIX-ajanlaskun alusta 1. tammikuuta 1970 klo 00:00:00 UTC (engl. epoch) tähän hetkeen. Attribuuteissa tyyppiltään *utc-time*, luku on sekunteja samasta UNIX-ajanlaskusta tähän hetkeen [27, s. 26–27].

7. TOTEUTUS

7.1 Yleiskuva

Kuvassa 22 on esitetty komponenttikaavio rcb_sub-ohjelmasta ja sen käyttämistä kirjastoista. Kuvasta voi nähdä miten eri komponentit ovat relaatiossa keskenään ohjelman kanssa ja mitkä osat kommunikoivat IED-laitteen ja RabbitMQ-palvelimen kanssa.



Kuva 22. Rcb_sub-ohjelman komponenttikaavio.

Toteutukseen valittiin seuraavat kirjastot:

- *libIEC61850* [51],
- *rabbitmq-c* [57],
- *jansson* [11], ja
- *Argp* [52].

Kaikki käytetyt kirjastot ovat toteutettu C-kielelle. Kirjastojen tarkoitus on abstrahoida tietyn asian käyttö, ja tarjota käyttäjälle siitä helppokäyttöinen ja ymmärrettävä rajapinta. LibIEC61850-kirjasto abstrahoi IEC 61850 -standardin käyttöä ja hoitaa matalan tason MMS-protokollan kommunikoinnin [51]. Samaa kirjastoa käytettiin myös demoversiossa ja kirjaston kerrosarkkitehtuuri esitettiin aikaisemmin kuvassa 16. Kuvassa 22 libIEC61850 kommunikoi suoraan IED-laitteen kanssa MMS-protokollaa käyttäen. Rabbitmq-c-kirjasto abstrahoi RabbitMQ-palvelimen käytön ja hoitaa matalan tason AMQP-pohjaisen kommunikoinnin [57]. Toteutuksessa rabbitmq-c kommunikoi suoraan RabbitMQ-palvelimen kanssa. Jansson-kirjasto abstrahoi JSON-rakenteiden lukua ja käsittelyä C-kielelle [11]. Kirjastoa käytettiin muuntamaan IEC 61850 -standardin viesti JSON-muotoon. JSON-rakenne on nähtävissä liitteessä A. Argp-kirjasto auttaa ohjelman komentoriviparametrien määrittämisessä ja käsittelyssä [52]. Kirjastolla voidaan toteuttaa UNIX-tyyliset *parametrit* (engl. *arguments*) ja *valitsimet/vivut* (engl. *options/switches*). Esimerkki parametreista on Linux-komento `mv foo.txt bar.txt`, jossa *foo.txt* ja *bar.txt* ovat parametreja *mv*-ohjelmalle. Vivut voidaan ohjelmalle antaa lyhyessä tai pitkässä muodossa. Esimerkkinä lyhyistä ja pitkistä vivuista `-b` ja `--bytes` vastaavasti. Vivut voivat myös vaatia parametreja toimiakseen. Parametri voidaan kirjoittaa lyhyen vivun perään välilyönnillä tai ilman. Pitkän vivun kanssa se erotetaan välilyönnillä tai yhtäsuuruusmerkillä (=). Esimerkkinä lyhyestä `-w 5` ja pitkästä `-width=5`, jossa *width*-vivulle annetaan parametrina 5. Kirjasto lisää ohjelmaan automaattisesti Linuxista käyttäjille tutut `--help` ja `--version` vivut. Vivulla `--help` kirjasto tulostaa Linuxilta tutun ohjelman aputekstin käyttäjälle, jossa on esitetty sen kaikki parametrit, vivut ja niiden selitteet [4].

Kuvassa 23 on esitetty *rcb_sub*-ohjelman sekvenssikaavio pääpiirteisestä toiminnasta. Ohjelman suoritus paikoin noudattaa samoja periaatteita kuin demon suoritus (kuvat 17 ja 18). Seuraavaksi käydään läpi ohjelman pääpiirteinen toiminta ja myöhemmin jokainen kohta tarkemmin läpi kappaleessa 7.2. Ensin ohjelman suoritus alkaa lukemalla annetut parametrit ja vivut Argp-kirjastolla (kohdat 1–2). Parametreissa tulee tiedot yhteyden muodostamiseen IED-laitteelle ja RabbitMQ-palvelimelle (kohdat 3–6). Parametreissa on myös tiedot RCB-instansseista, jotka halutaan IED:ltä tilata. Yhteyksien muodostamisen jälkeen jokainen parametrina annettu RCB käydään läpi silmukassa ja sen arvot ja datajoukon viitteet luetaan IED:ltä (kohdat 7–12). Tämän jälkeen sisäkkäisessä silmukassa luetaan datajoukon viitteiden muuttujien *spesifikaatiot* (kohdat 11–12). Spesifikaatio antaa tiedot attribuuttien pituudesta ja tyypistä, jotka lisätään JSON:iin myöhemmin. Tämän jälkeen tehdään toinen silmukka, jossa jokainen RCB-instanssi tilataan ja niille asetetaan takaisinkutsufunktio (kohdat 13–16). Arvojen kirjoitushetkellä (kohta 15) RCB

varataan ja se aloittaa viestien lähettämisen. Jokaisen RCB:n kirjoituksen jälkeen ohjelma jää loputtomaan silmukkaan ottamaan viestejä vastaan (kohdat 17–22). Viestin saapuessa kutsutaan asetettua takaisinkutsufunktiota, jonka parametrina on saapunut viesti (kohta 17). Viesti muutetaan JSON-muotoon jansson-kirjastolla ja julkaistaan RabbitMQ-palvelimelle rabbitmq-c-kirjastolla (kohdat 18–21).

7.2 Ohjelman toiminta

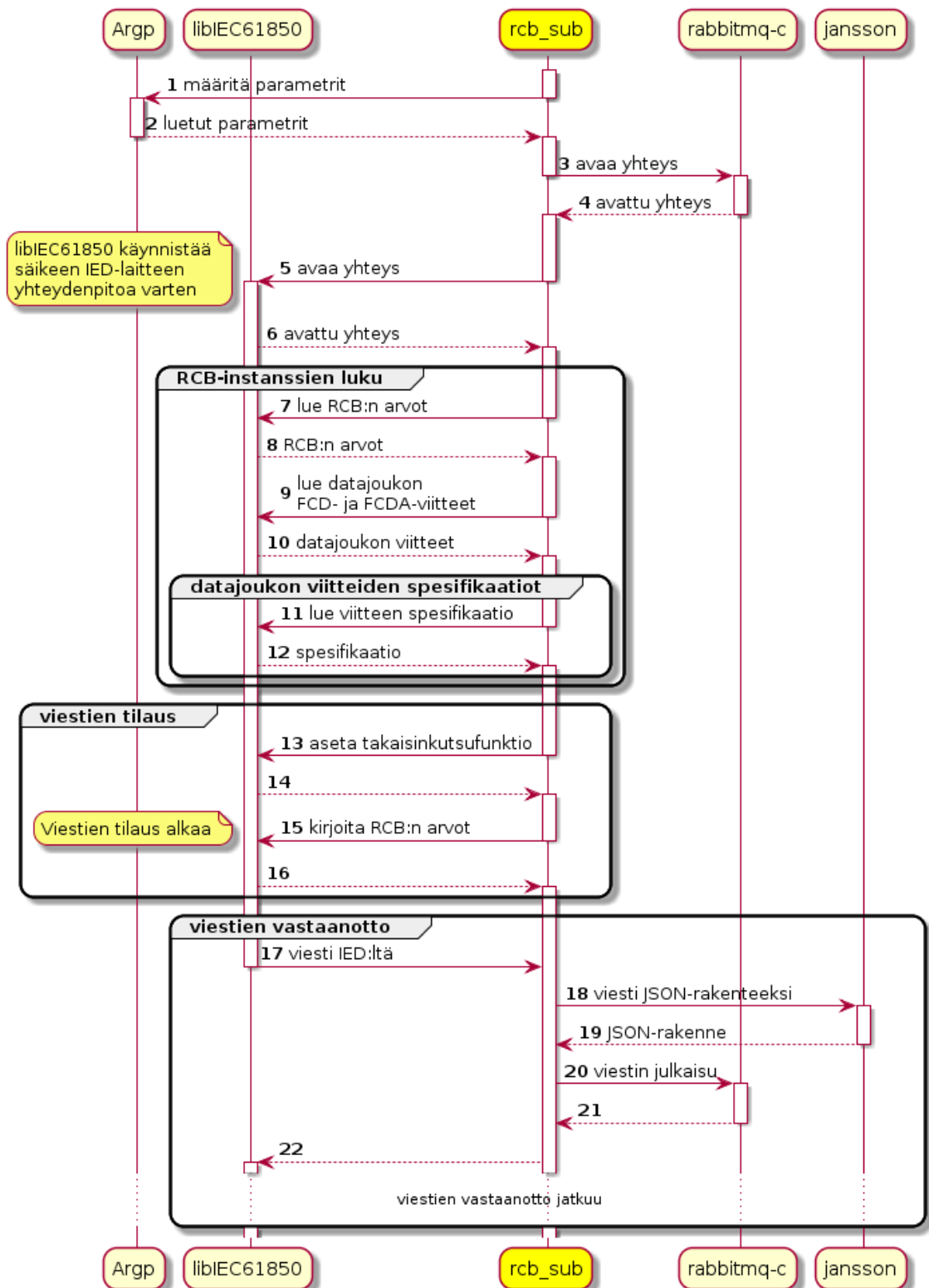
Tulevissa kappaleissa käydään läpi tarkemmin rcb_sub-ohjelman toimintaa. Kappaleiden järjestys noudattaa kuvassa 23 olevan sekvenssikaavion järjestystä ja jokainen kappale tarkentaa tiettyä osaa siitä. Toisin sanoen ohjelmaa käydään tarkemmin läpi sen suorituksen järjestyksessä.

7.2.1 Parametrisointi

Ohjelma parametrisoitiin Argp-kirjastolla. Kirjasto tarjoaa rajapinnan komentoriviparametrien käsittelyyn ja määrittämiseen. Parametrien muodot ovat tutut muista Linux-käyttöjärjestelmän parametreista ja samaa periaatetta käytettiin tässäkin ohjelmassa. Kirjasto myös lisäsi ohjelmaan automaattisesti aputekstin käyttäjää varten. Aputeksti sisältää tietoa ohjelman parametreista ja niiden käytöstä. Aputekstin pystyi tulostamaan vivulla `--help`. Liitteessä B on esitetty ohjelman tulostama aputeksti. Liitteestä voi myös nähdä kaikki ohjelman parametrit ja lyhyen selityksen mihin kutakin käytetään. Aputeksti ei sinänsä ollut tarpeellinen, koska muu järjestelmä hallitsee ohjelman suoritusta ja parametrien antamista. Se kuitenkin päätettiin lisätä pienen vaivan vuoksi ja toimii hyvänä dokumentaationa myöhemmin.

Ohjelmiston parametrien ja vipujen voidaan ajatella koostuvan kolmesta eri ryhmästä (liite B rivit 1–4). Ensin päätason vaihtoehtoiset vivut `OPTIONS` (rivi 1). Pakolliset parametrit `EXCHANGE` ja `ROUTING_KEY` (rivi 2). Viimeisenä ryhmänä `RCB_REF` parametri ja siihen liittyvät vivut `RCB_OPTIONS` (rivi 3). Näitä ryhmiä voi olla n-kappaletta, mutta vähintään yksi. Liitteessä B riveillä 71–72 on esitetty esimerkki, joka tilaa viestit IED-laitteelta osoitteesta 192.168.2.220. AMQP-vaihteen nimi on *testexchange* ja reititysavaimen nimi on *testkey*. IED-laitteelta tilataan RCB-instanssi viitteellä `MY_LD0/LLN0-BR.rcbMeas01`. Instanssille asetetaan yleinen kysely (`-g1`), liipaisimet (`-t27`) ja viestin vaihtoehtoiset kentät (`-o16`). Liipaisimet ja vaihtoehtoiset kentät annetaan numeroarvoilla summaamalla niitä yhteen. Vaihtoehdot näkee ohjelman aputekstistä (esimerkiksi liipaisimet riveillä 53–58).

Suurin osa `OPTION` vivuista ovat itsestäänselviä. Esimerkkinä `--amqp-host`, joka kertoo AMQP-palvelimen IP-osoitteen, ja `--ied-host`, joka kertoo IED-laitteen IP-osoitteen. Parametrit `EXCHANGE` ja `ROUTING_KEY` määrittävät nimet RabbitMQ-palvelimen vaihteelle ja reititysavaimelle. Parametri `RCB_REF` määrittää viitteen tilattavaan RCB-instanssiin IED-laitteella. Tätä seuraa vaihtoehtoinen `RCB_OPTIONS` vipu, joka



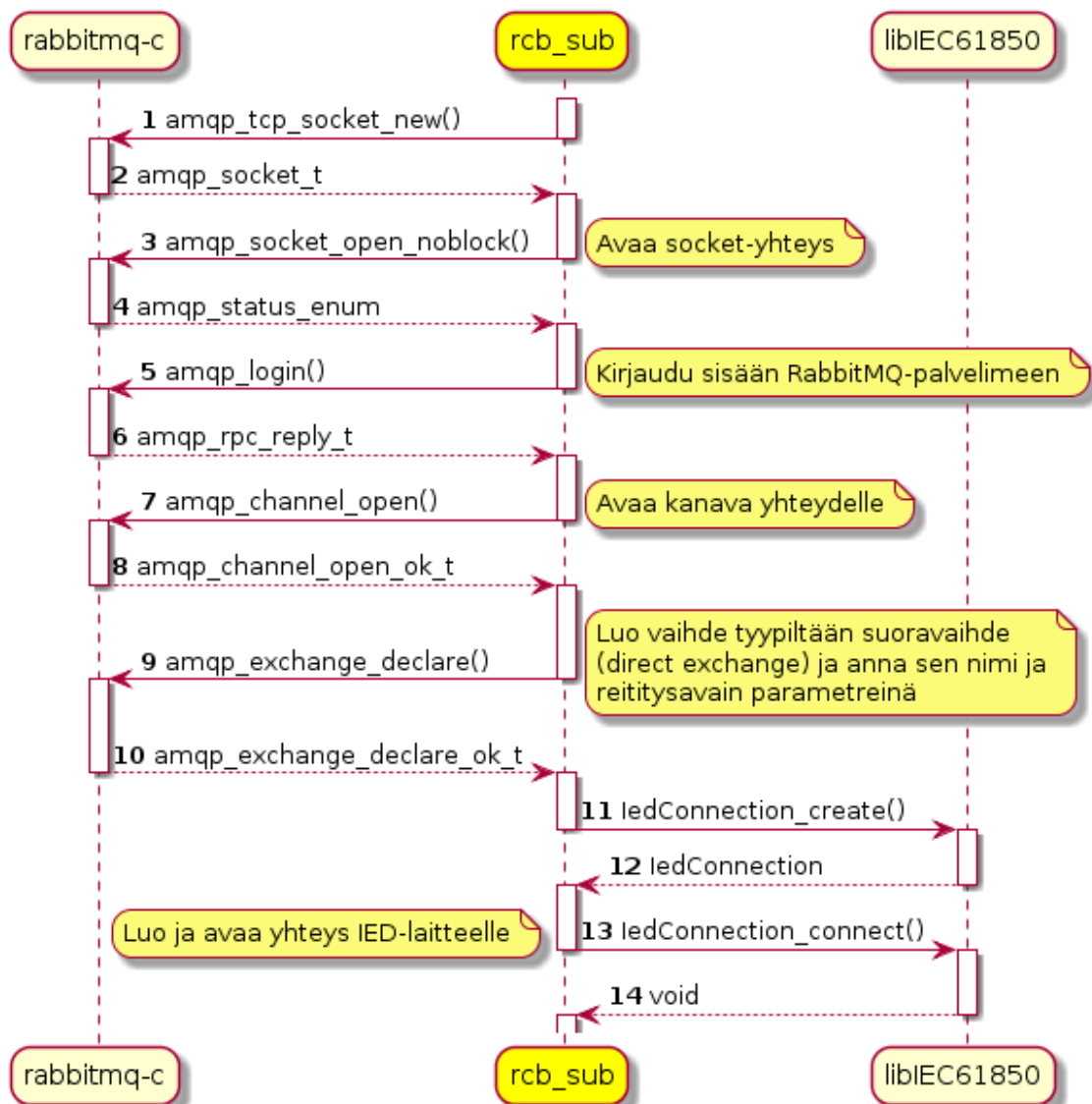
Kuva 23. Sekvenssikaavio *rcb_sub*-ohjelman kokonaistoiminnasta.

määrittää edeltävän instanssin kirjoitettavat arvot ennen tilausta. Sillä voidaan määrittää käytetyt vaihtoehtoiset kentät (`--opt-fields`), käytetyt liipaisimet (`--trigger`) ja pyydetäänkö yleistä kyselyä ennen muita viestejä (`--gi`). Liipaisimien nimet vastaavat aikaisemmin kappaleessa 2.7 esitettyjä arvoja ja numeeriset arvot tulevat libIEC61850-

kirjastosta. Vaihtoehtoisten kenttien nimet vastaavat aikaisemmin taulukossa 8 esitettyjä arvoja ja sen numeeriset arvot tulevat myös libIEC61850-kirjastosta.

7.2.2 Yhteyksien muodostus

Parametrien luvun jälkeen ohjelma muodostaa yhteydet ensin RabbitMQ-palvelimelle ja sen jälkeen IED-laitteelle. Kuvassa 24 on esitetty sekvenssikaavio, joka näyttää mitä kirjaston funktioita ohjelma kutsuu missäkin järjestyksessä. Funktiot ja niiden parametrit voi tarkemmin tarkistaa kirjastojen omista dokumentaatioista [39] [57]. Tämä tarkoittaa yleiskuvasta 23 kohdat 3–6. Kaaviossa ohjelma muodostaa yhteydet vain kerran. Ohjelma on kuitenkin toteutettu niin, että se yrittää muodostaa yhteydet uudestaan vikatilanteissa. Jos muodostus ei onnistu, ohjelma kirjoittaa lokin tapahtuneesta ja odottaa hetken ennen uudelleen yritystä.

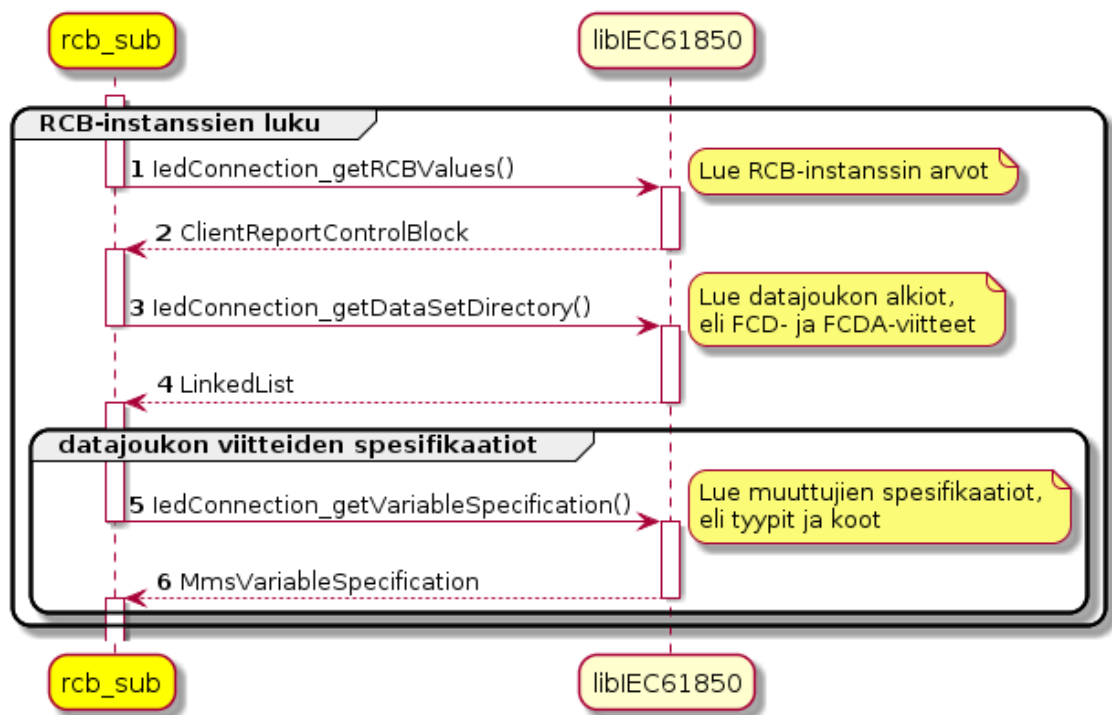


Kuva 24. Sekvenssikaavio kuinka `rcb_sub` avaa yhteydet RabbitMQ-palvelimelle ja IED-laitteelle.

Yhteyden avauksen ja sisäänkirjautumisen jälkeen ohjelma avaa kanavan kohdassa 7–8. Kanava on yhteyden päälle avattu oma erillinen kommunikointiväylä, joka ei sotkeudu muihin kanaviin. Yhteen avattuun yhteyteen voi olla avattuna monta eri kanavaa. Kanavat mahdollistavat monen eri säikeen jakaa sama yhteys, ilman että tieto voi vuotaa toiseen säikeeseen. Kohdassa 9 kutsutaan funktiota `amqp_exchange_declare()`. Funktio määrittää vaihteen tyyppiä suoravaihte RabbitMQ-palvelimelle. Suoravaihte on AMQP-vaihteen tyyppi, joka määrittää kuinka viestejä reititetään reititysavaimen perusteella. Vaihteen ja sen tyyppien toimintaperiaatteet voi lukea AMQP:n dokumentaatiosta [1, s. 26–28].

7.2.3 IED:n attribuuttien tyyppin ja koon luku

Yhteyksien muodostamisen jälkeen ohjelma käy läpi silmukassa jokaisen parametrina annetun RCB:n viitteen. Lukee RCB:n datajoukon viitteet ja selvittää jokaisen viitatus attribuutin spesifikaatiot, eli sen oikean viitteen, tyyppin ja koon. Kuvassa 25 on esitetty sekvenssikaavio toiminnasta. Kuva tarkoittaa yleiskuvassa 23 kohtia 7–12.



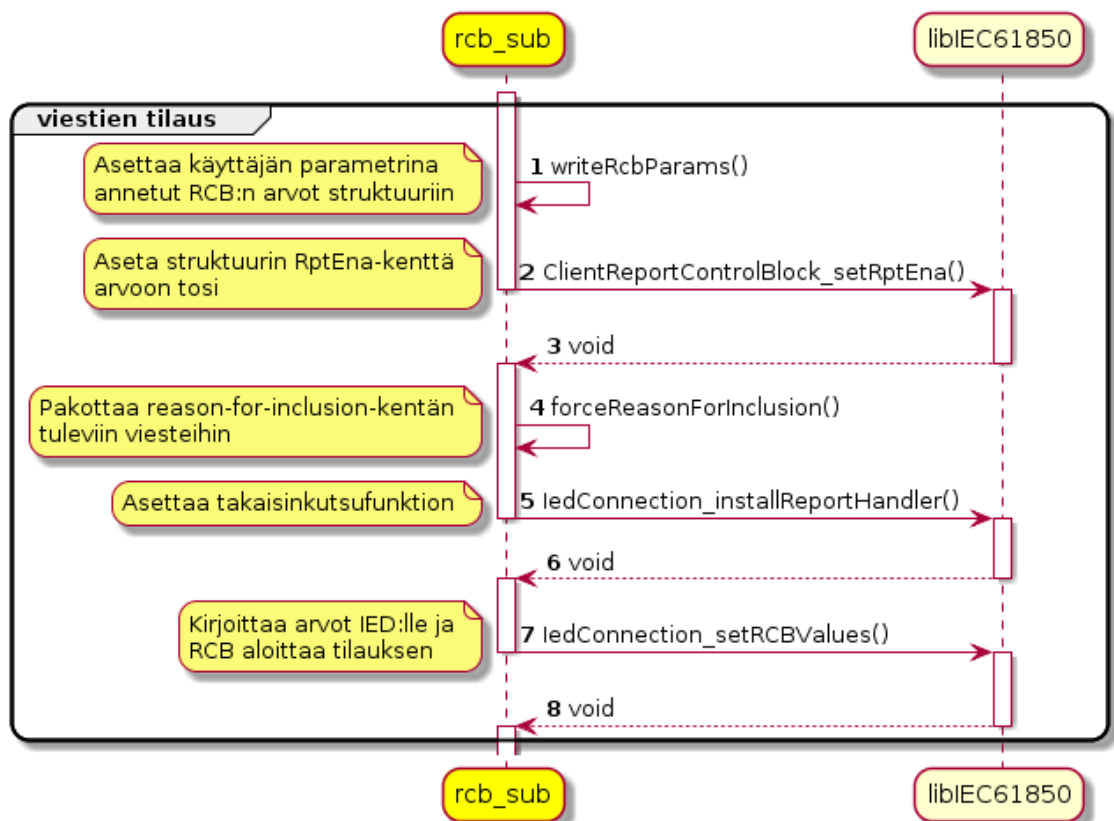
Kuva 25. Sekvenssikaavio kuinka `rcb_sub` lukee RCB-instanssin arvot ja muuttujien spesifikaatiot.

Ensin RCB:sta luetaan sen tiedot IED-laitteelta (kohdat 1–2). RCB:ltä saadaan tieto mihin datajoukkoon se on liitetty. Tätä käsiteltiin kappaleessa 2.7 ja taulukossa 7 kenttä *DataSet*, joka kertoo käytetyn datajoukon viitteen. Tällä tiedolla ohjelma voi lukea datajoukon FCD- ja FCDA-viitteet (kohdat 3–4). Tästä saadaan jokainen viite listassa, joka käydään läpi silmukassa kohdissa 5–6. Jokaiselle viitteelle luetaan sen spesifikaatio. Spesifikaatorakenne sisältää sisäkkäisiä spesifikaatioita, jos viite viittaa moneen muuttujaan IED-

laitteen hierarkiassa. Tämä tapahtuu samalla periaatteella, jolla FCD- ja FCDA-viitteet viittaavat moneen muuttujaan hierarkiassa alaspäin. Jokainen luettu viite tallennetaan ja niitä käytetään myöhemmin viestin kanssa JSON-rakenteessa. Esimerkkinä liitteessä A riveillä 21–22 tyyppi ja koko -tiedot.

7.2.4 Viestien tilaus

Ohjelman luettua kaikki muuttujien spesifikaatiot. Ohjelma tilaa silmukassa parametrina annetut RCB-instanssit. Kuvassa 26 on esitetty sekvenssikaavio toiminnasta. Kuva tarkentaa yleiskuvassa 23 kohtia 13–16.



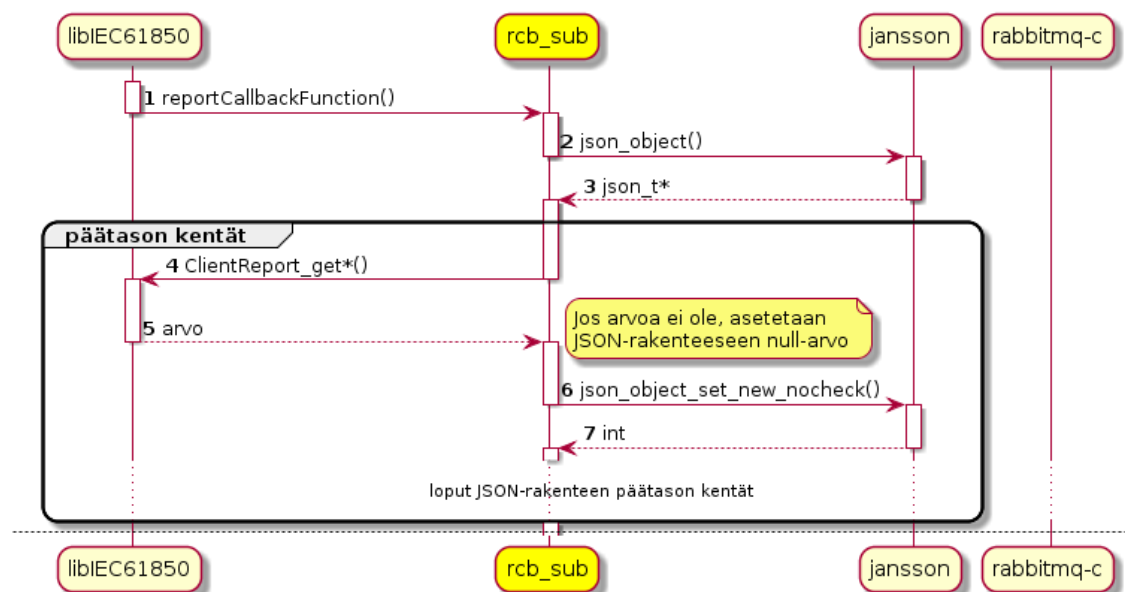
Kuva 26. Sekvenssikaavio kuinka *rcb_sub* tilaa RCB-instanssit.

Ohjelma käsittelee libIEC61850-kirjaston tarjoamaa *ClientReportControlBlock*-struktuurin instanssia. Kirjasto palauttaa struktuurin instanssin, kun RCB:n arvot luetaan IED-laitteelta. Kaikki RCB:lle kirjoitettavat arvot asetetaan instanssiin ennen IED-laitteelle kirjoitusta. Näitä arvoja ovat ohjelmalle parametreinä annetut arvot, kuten liipaisimet ja vaihtoehtoiset kentät. Tämän ohjelma tekee kutsumalla omaa funktiota *writeRcbParams()* (kohta 1). Tämän jälkeen ohjelma asettaa RCB:n *RptEna*-kentän arvoksi tosi (kohdat 2–3). Tämä kenttä kontrolloi RCB-instanssin varausta ja onko tilaus päällä. Seuraavaksi ohjelma pakottaa viestiin vaihtoehtoisen kentän *reason-for-inclusion* (kohta 4). Tätä kenttää tarvitaan, jotta aikaisemmin luetut spesifikaatitiedot saadaan yhdistettyä saapuneeseen viestiin. Tämän jälkeen asetetaan takaisinkutsufunktio, jota kirjasto kutsuu

kun viesti saapuu (kohdat 5–6). Viimeisenä struktuurin arvot kirjoitetaan IED:llä olevalle RCB:lle (kohdat 7–8). Tämä varaa RCB-instanssin kirjoittavalle asiakkaalle, ja aloittaa tilauksen, jos RptEna-kentän arvo oli tosi. RCB tulee lähettämään viestejä ohjelmalle samalla kun silmukan muilla kierroksilla käsitellään tilaamattomia RCB-instansseja.

7.2.5 JSON:in muodostaminen ja julkaisu

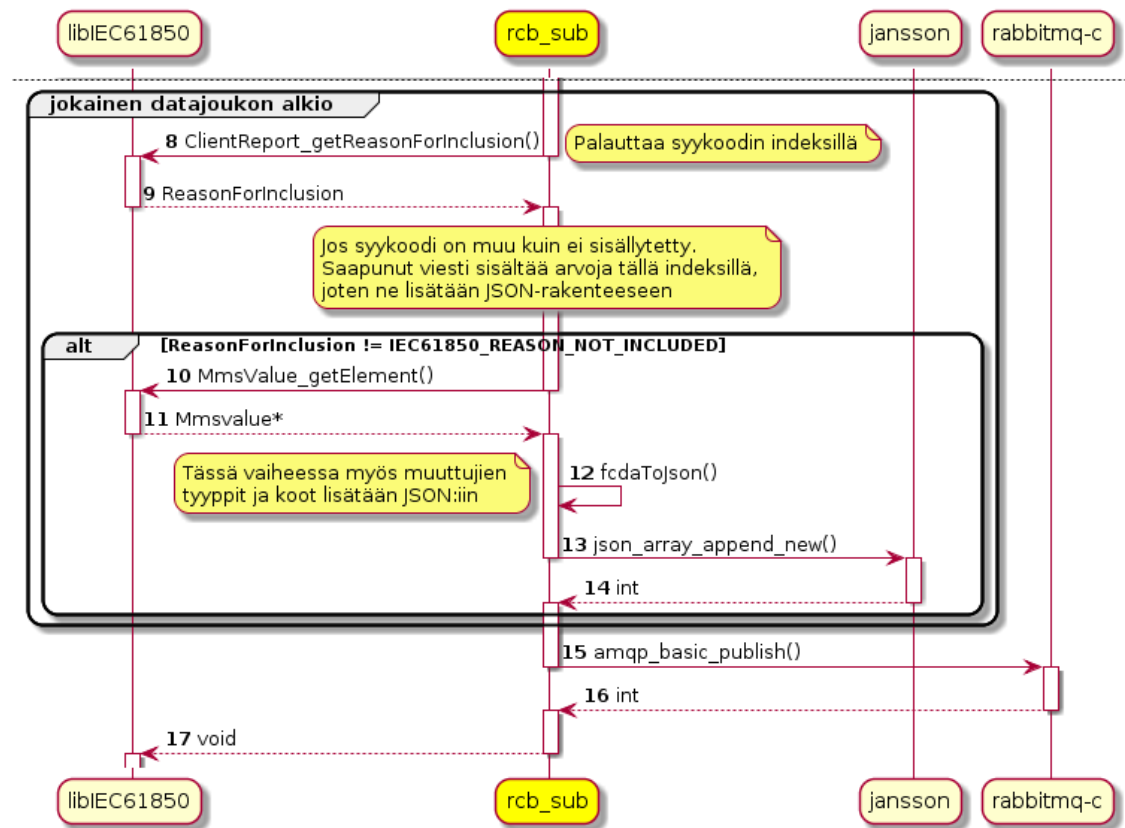
Viestin saapuessa libIEC61850-kirjasto kutsuu asetettua takaisinkutsufunktiota. Takaisinkutsufunktio muuttaa viestin JSON-muotoon ja lisäsi siihen aikaisemmin luetut muuttujien oikeat viitteet, tyypit ja koot. Tämän jälkeen JSON-julkaistiin RabbitMQ-palvelimelle. Kuvissa 27 ja 28 on esitetty sekvenssikaaviolla, kuinka ohjelma muuttaa viestin JSON:iksi ja julkaisee RabbitMQ:lle. Kuva 27 jatkuu kuvassa 28. Kuva 27 tarkoittaa yleiskuvan 23 kohtia 17–19 ja kuva 28 kohtia 20–22. Aikaisemmin mainittiin, että libIEC61850-kirjasto toteuttaa sisäisen puskurin viestien vastaanottoon ja käsittelee siitä yhden viestin kerrallaan. Kirjasto varaa yhden puskurin yhteyttä kohti. Puskurista käsitellään seuraava viesti, kun edellinen takaisinkutsufunktion suoritus on palannut. Rcb_sub avaa vain yhden yhteyden IED-laitteeseen. Seurauksena on, että viestejä ei prosessoida rinnakkain missään vaiheessa suoritusta.



Kuva 27. Sekvenssikaavio kuinka rcb_sub muodostaa JSON:nin päätason kentät.

Kuvassa 27 suoritus alkaa, kun libIEC61850-kirjasto kutsuu takaisinkutsufunktiota. Funktiolle annetaan parametrina saapunut viesti *ClientReport*-struktuurin instanssina (kohta 1). Tämän jälkeen ohjelma käy läpi viestin jokaisen päätason kentän ja lisää ne JSON-rakenteeseen. Osa viestin kentistä on vaihtoehtoisia riippuen siitä, mitä käyttäjä asetti `--opt-fields` vivun parametrilla. Jos arvoa viestissä ei ole, korvataan se null-arvolla JSON:iin. Tämän jälkeen suoritus jatkuu kuvasta 27 kuvaan 28.

Päätason viestin kenttien jälkeen ohjelma käy läpi silmukassa viestin datajoukon indek-



Kuva 28. Sekvenssikaavio kuinka `rcb_sub` lisää JSON:iin muuttujat viestistä.

sit (kuvassa 28 kohdat 8–14). Viesti oikeasti sisältää vain ne datajoukon alkio, jotka sisältyivät viestiin. Ongelmana tässä on se, että viesti ei sisällä indeksää tai tietoa siitä mikä datajoukon alkio on kyseessä. Jotta tästä saadaan tieto, ohjelma pakottaa syykoodin päälle viestiin. Tämän avulla, kun silmukassa käydään kaikki datajoukon indeksit läpi, voidaan jokaiselle indeksille ensin kysyä syykoodi viestistä (kohdat 8–9). Jos datajoukon alkio ei ole viestissä, palauttaa kirjaston funktio `ClientReport_getReasonForInclusion()` arvon `IEC61850_REASON_NOT_INCLUDED`. Tätä tietoa voidaan käyttää löytämään oikea datajoukon indeksi. Jos datajoukon indeksi on viestissä, suoritetaan kohdat 10–14, muuten mennään seuraavaan indeksin ja toistetaan kohdat 8–9. Datajoukon indeksi tarvitaan, jotta aiemmin luetut spesifikaatiot saadaan yhdistettyä attribuutteihin arvojen kanssa. Datajoukon indeksillä, viestin arvoilla ja muuttujien tyypeillä ja koolla saadaan rakennettua loppuosa JSON-rakenteesta. Kuvassa 28 oleva silmukka rakentaa liitteessä A olevan values-aulun alkaen riviltä 7. JSON:in sisempi values-taulu (rivi 13) on lista FCD- tai FCDA-viitteen muuttujia, mitä se viittaa arvoineen. Tämä taulukko muodostetaan kuvan 28 kohdassa 12 funktiolla `fcdaToJson()` ja lisätään JSON:iin kohdassa 13. Lopuksi viesti lähetetään RabbitMQ-palvelimelle funktiolla `amqp_basic_publish()` ja takaisinkutsufunktio palaa (kohdat 15–17).

8. TULOSTEN ARVIOINTI JA POHDINTA

Diplomityössä toteutettu ohjelma ei ole ollut tuotannossa osana muuta järjestelmää vielä kovin kauan. Kuitenkin tähän mennessä se on toiminut ongelmitta. Varmasti ei voida arvioida, että ohjelmassa ei tulisi ongelmia tulevaisuudessa, mutta ainakin alun perusteella tulokset näyttävät toimivilta. Tältä osin voidaan arvioida, että diplomityö pääsi asetettuihin tavoitteisiin onnistuneesti ja halutut vaatimukset saatiin täytettyä. Kuitenkin toimivuudesta huolimatta toteutuksessa on kohtia mitä voitaisiin parantaa, tehdä toisin ja jatkokehittää. Nämä ovat kuitenkin tulevaisuudessa yrityksen sisällä tehtäviä työtehtäviä tai mahdollisesti toisen diplomityön aiheita.

Työn aikana järjestelmän hajautukseen pohdittiin eri paradigmojen sopivuutta ja huomattiin, että siihen sopisivat julkaisija-tilaaja-, joukkokommunikointi- ja viestijono-paradigmat. Toteutukseen valittiin AMQP-standardi, joka mahdollisti julkaisija-tilaaja- ja viestijono-paradigmat, mutta ei suoraan ollut tarkoitettu joukkokommunikointiin. Tämän takia joukkokommunikointi jätettiin pois ja korvattiin julkaisija-tilaaja-paradigmalla. Kuinka hyvin joukkokommunikointi olisi sopinut toteutukseen ei ole tarkkaa tietoa. Kuitenkin julkaisija-tilaajan-paradigma jatkaa IEC 61850 -standardin määrittämää julkaisija-tilaajakommunikointia IED-laitteen kanssa ja näin ollen sopii toteutukseen hyvin. Toteutukseen myös harkittiin MQTT-standardia AMQP:n sijaan, joka on pelkästään julkaisija-tilaajakommunikointiin tarkoitettu protokolla. Tämä valinta tehtiin tekijän aikaisemman kokemuksen ja muiden yrityksessä olevien henkilöiden keskustelun pohjalta. Koska joukkokommunikointi jätettiin pois toteutuksesta, olisi MQTT voinut sopia toteutukseen paremmin kuin AMQP sen keveyden takia.

IED-laitteelta tuleva viesti päätettiin muuntaa JSON-muotoon XML:än sijaan. Vertailua kahden välillä tehtiin ja päätös oli aikaisemmin tutkimuksen perusteella selvä. JSON-muoto on kevyempi kuin XML ja sopii nykypäivänä viesti muotona hajautettuun järjestelmään hyvin. Suunniteltu JSON-rakenne on toiminut käytössä olemisen ajan tarpeiden mukaan. Kuitenkin siinä olisi kohtia mitä pystyisi toteuttamaan toisin. Esimerkiksi *bit-string* tyyppin bittijärjestys (engl. endian) voi vaihdella attribuuttien välillä ja tämän takia siitä JSON-viestiin julkaistiin kaksi eri arvoa *valueLittleEndian* ja *valueBigEndian* (liite A rivit 23–24). Käytännössä vastuu muuttujan oikein lukemisesta siirretään tilaajalle. Standardissa kuitenkin on määritetty, kuinka päin attribuutti esitetään, jos se on tyyppiä bit-string. Tämän vastuun voisi mahdollisesti siirtää rcb_sub-ohjelman puolelle ja tarjota JSON-viestissä pelkkä *value*-kenttä, niin kuin kaikille muillekin attribuuteille. Tämän lisäksi aikatyypit *utc-time* JSON-viestissä päätettiin antaa siinä muodossa missä ne tulevat IED-laitteelta, eli millisekunteja UNIX-ajanlaskusta. JSON ei määritä käytettävää aikaformaattia, mutta JSON-rajapintoihin suositellaan käytettäväksi ISO 8601 -standardin aikaformaattia [34].

Ennen varsinaista toteutusta demoan liittyviä ongelmien analyysistä saatiin tuloksia suorituskyykyyn liittyen. Näiden tietojen pohjalta ohjelman kieleksi valittiin C-kieli suorituskyykyyn takia. Ongelmana demon suorituskyykyssä ei pelkästään ollut IED-laitteelta tulevien viestien määrä ja libIEC61850-kirjaston lukitus funktiokutsuissa. Todennäköisesti suurin syy oli Ruby-oletustulkin GIL, joka rajoittaa vain yhden säikeen suorituksen kerrallaan ja estää rinnakkaisuuden. C-kielen valinta oli hyvä ratkaisu. Ohjelman aika kaikkien RCB-instanssien tilaamiseen saatiin alas noin 30 sekunnista alle 15 sekuntiin. Suurin osa ajasta tulee IED-laitteille tehtävien kutsujen määrästä. Demon muistinkäyttö Ruby on Rails-ympäristössä oli noin 150 Mt. Rcb_sub:in muistin käyttö saatiin noin 4 kt, joka on todella iso muutos aikaisempaan nähden. Tekniikan valinnan suhteen päätökset onnistuivat hyvin.

Ohjelman kehityksen aikana pidettiin tietoturva mielessä C-ohjelmoinnissa, jolla vältetään sen yleiset virheet. Näitä olivat esimerkiksi tekstin formatointihyökkäys [19] ja muistin ylivuoto [10]. Tähän käytettiin apuna GCC-kääntäjän vipuja esimerkiksi `-Wall` ja `-Wextra` [20]. Huolellisesta ohjelmoinnista huolimatta järjestelmään tulee tietoa ulkopuoliselta IED-laitteelta, joka voi sisältää vahingollista tietoa. Tämä osuus jätettiin pois, koska se ei kuulunut tämän diplomityön aiheen piiriin. Tietoturva kuitenkin täytyy tarkistaa läpi tulevaisuudessa.

Järjestelmä aloittaa tilauksen käynnistämällä yhden rcb_sub-prosessin per IED-laite. Tieto prosessille annetaan komentoriviparametreilla. Tilauksen muuttuessa, prosessi täytyy käynnistää uudelleen. Työn tekohetkellä ratkaisu sopi tarkoituksiin hyvin. Ratkaisuna olisi myös voinut toteuttaa yhden rcb_sub-prosessin, joka pystyisi tilaamaan monta eri IED-laitetta rinnakkain, tai yhden IED-laitteen tilausta voisi muuttaa ilman, että prosessia täytyy käynnistää uudelleen. Tähän toteutustapaan tiedonsiirto komentoriviparametreilla ei enää onnistuisi vaan tarvittaisiin joku muu kommunikointitapa. Tähän sopisi aikaisemmin käsitellyt prosessien väliset kommunikointiparadigmat, esimerkiksi soketit. Toteutuksessa monen eri rcb_sub-prosessin tilaamat viestit ohjataan saman RabbitMQ-palvelin kautta eri reititysavaimilla. Järjestelmän skaalautuessa isommaksi joutuu RabbitMQ isomman kuorman alle, joka todennäköisesti muodostuu pullonkaulaksi. Tarkkoja rajoja tähän ei vielä tiedetä ja nykyinen keskitetty RabbitMQ-palvelin todettiin riittäväksi tarkoituksiin tällä hetkellä. Kuitenkin tulevaisuudessa tämä on asia mikä täytyy ottaa huomioon.

Ohjelma jätettiin työssä pisteeseen, missä se saavutti kaikki sille asetetut vaatimukset. Kuitenkin tulevaisuudessa ohjelmaa voidaan lisätä ominaisuuksia tarpeen vaatiessa. Isoin puute ohjelmassa oli testiympäristö ja sen yksikkötestit. C:ssä ei ole suoraan tukea yksikkötestien kirjoittamiseen. Ympäristön pystytys vaatii erillisen kirjaston projektin yhteyteen millä yksikkötestit kirjoitetaan. Yksikkötestit ovat tärkeä osa ohjelman ylläpitoa ja toiminnan varmistamista muutosten jälkeen. Testiympäristön ja testien toteuttaminen jäi tulevaisuuden kehitystyöksi.

Tässä diplomityössä suunniteltu arkkitehtuuri ja ohjelmistoratkaisut toimisivat muissakin saman tyyllisissä järjestelmissä, missä kommunikoidaan IEC 61850 -standardin mukaisesti.

ti ja tietoa julkaistaan eteenpäin. Periaatteessa suunnitelmasta olisi mahdollista toteuttaa oma kokonaisuutensa, jota olisi mahdollistaa käyttää muunkin järjestelmän kanssa. Tämä vaatisi kuitenkin tarkempaa suunnittelua ja edellä pohdittujen vaihtoehtojen käsittelyä.

9. YHTEENVETO

Diplomityön tuloksena saatiin ohjelmistokomponentti osaksi isompaa sähköasemien liit-tyvää järjestelmää. Komponentti kykeni tilaamaan tietoa IED-laitteelta IEC 61850 -stan-dardin mukaisesti, muuntamaan tiedon JSON-muotoon ja jakamaan sen muun järjestel-män kanssa. Tiedon jako järjestelmässä toteutettiin AMQP-standardiin pohjautuvalla vä-littäjäpalvelimella, joka käyttää julkaisija-tilaaja- ja viestijono-kommunikointiparadigmoja. Toteutetun systeemin arkkitehtuuri esitettiin kuvassa 20. Arkkitehtuurissa muu järjestel-mä on vastuussa tilauksien orkestroinnissa ja rcb_sub-prosessien suorituksesta.

Työssä tutkittiin eri kommunikointiparadigmojen sopivuutta IEC 61850 -standardiin ja vaatimuksiin nähden. Suunniteltuun arkkitehtuuriin paradigmoiksi olisi sopinut joukko-kommunikointi tai julkaisija-tilaaja. Viestijonoparadigma tarvittiin viestin puskurointia varten. Toteutukseen valittiin AMQP-standardi, jonka myötä julkaisija-tilaaja-paradigma päätyi toteutukseen. AMQP ei suoraan ollut tarkoitettu joukkokommunikoinnin toteutta-miseen. IEC 61850 -standardi määrittä, että viestit IED-laitteelta tilataan julkaisija-tilaaja-paradigman mukaan. Toteutetun ohjelmiston ja valittujen paradigmojen voidaan sanoa jatkavan IED-laitteen tilausmekanismia ja näin ollen sopivat hyvin toteutukseen. Toteu-tus sallii monen tilaajan tilata sama tieto, mitä IEC 61850 -standardi ei ilman erillistä RCB-instanssia mahdollistanut. Lisäksi viestin muoto on helpommin luettava JSON, ver-rattuna MMS-protokollan binääriseen esitysmuotoon. Ohjelman tekemä JSON-muoto on nähtävissä liitteessä A.

Ennen diplomityön aloitusta tekijä oli yrityksessä toteuttanut demon ohjelmiston toimi-vuudesta. Demo oli tie oppia IEC 61850 -standardin toimintaa ja perehtyä aiheeseen tar-kemmin ennen oikeaa toteutusta. Demosta oli tarkoitus analysoida sen ongelmia, joita olivat huono suorituskyky, muistivuoto ja toiminnan epävarmuus. Suorituskykyä saatiin toteutuksessa paremmaksi valitsemalla suorituskykyisempi C-kieli. C on käännettävä kie-li verrattuna Rubyn tulkattavaan kieleen. Lisäksi C voi hyödyntää käyttäjärjestelmän säi-keitä ilman rajoituksia verrattuna Ruby-tulkin globaaliin lukitukseen (GIL). Muistivuoto saatiin korjattua huolellisella ohjelmoinnilla ja varmistamalla, että muisti varmasti vapau-tettiin, kun sitä ei enää tarvittu. Kielen valinnalla ohjelman muistinkäyttö saatiin enti-seen nähden paljon pienemmäksi. Ruby:llä toteutettu demo käytti muistia noin 150 Mt ja rcb_sub käytti noin 4 kt. Toteutetussa ohjelmassa ei ollut demossa havaittavia ongelmia ja on osoittanut tuotannossa toimivaksi muun järjestelmän kanssa.

Toteutettu ohjelmisto on tuotannossa osana muuta järjestelmä ja diplomityön kirjoittami-sen valmiiksi saamiseen asti on toiminut ongelmitta. Kappaleessa 8 arvioitiin ja pohdittiin saatuja tuloksia. Näiden pohjalta voidaan sanoa, että diplomityössä suunniteltu toteutus pääsi asetettuihin tavoitteisiin ja tutkimuskysymyksiin löydettiin vastaus. Toteutus ei ole

kuitenkaan täydellinen ja siinä on jatkokehitettävää. Näihin kohtiin tullaan yrityksessä palaamaan tulevaisuudessa ja muuttamaan niitä, mikäli tarve vaatii. Diplomityön tulokset tarjoavat myös apua samankaltaisten järjestelmien suunnitteluun ja toteutukseen.

LÄHTEET

- [1] AMQP Advanced Message Queuing Protocol v0-9-1, Protocol Specification, mar. 2008, 39 s. Saatavissa (viitattu 10.7.2018): <http://www.amqp.org/specification/0-9-1/amqp-org-download>
- [2] AMQP kotisivu, AMQP verkkosivu. Saatavissa (viitattu 23.9.2018): <http://www.amqp.org/>
- [3] G. R. Andrews, Foundations of multithreaded, parallel, and distributed programming, nide 11, Addison-Wesley Reading, 2000.
- [4] B. Asselstine, Step-by-Step into Argp, Askapache verkkosivu, 2010, 75 s. Saatavissa (viitattu 1.9.2018): <http://nongnu.askapache.com/argpbook/step-by-step-into-argp.pdf>
- [5] R. Baldoni, A. Virgillito, Distributed Event Routing in Publish/Subscribe Communication Systems: a Survey, DIS, Universita di Roma La Sapienza, Tech. Rep, vsk. 5, 2005.
- [6] K. P. Birman, ISIS: A system for fault tolerant distributed computing, Cornell University, Department of Computer Science, tekn. rap., huh. 1986.
- [7] K. P. Birman, The Process Group Approach to Reliable Distributed Computing, Commun. ACM, vsk. 36, nro 12, jou. 1993, s. 37–53.
- [8] A. D. Birrell, B. J. Nelson, Implementing remote procedure calls, ACM Transactions on Computer Systems (TOCS), vsk. 2, nro 1, 1984, s. 39–59.
- [9] C. Brunner, IEC 61850 for power system communication, teoksessa: 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, April, 2008, s. 1–6.
- [10] Buffer overflow attack, OWASP verkkosivu. Saatavissa (viitattu 7.11.2018): https://www.owasp.org/index.php/Buffer_overflow_attack
- [11] C library for encoding, decoding and manipulating JSON data, GitHub verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.9.2018): <https://github.com/akheron/jansson>
- [12] G. Cabri, L. Leonardi, F. Zambonelli, Mobile-agent coordination models for internet applications, Computer, vsk. 33, nro 2, 2000, s. 82–89.

- [13] B. E. M. Camachi, O. Chenaru, L. Ichim, D. Popescu, A practical approach to IEC 61850 standard for automation, protection and control of substations, teoksessa: 2017 9th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), June, 2017, s. 1–6.
- [14] G. V. Chockler, I. Keidar, R. Vitenberg, Group Communication Specifications: A Comprehensive Study, *ACM Comput. Surv.*, vsk. 33, nro 4, jou. 2001, s. 427–469.
- [15] Clients and Developer Tools, RabbitMQ verkkosivu. Saatavissa (viitattu 5.11.2018): <https://www.rabbitmq.com/devtools.html>
- [16] P. T. Eugster, P. A. Felber, R. Guerraoui, A. M. Kermarrec, The many faces of publish/subscribe, *ACM computing surveys (CSUR)*, vsk. 35, nro 2, 2003, s. 114–131.
- [17] Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Fifth Edition), W3C verkkosivu, mar. 2008. Saatavissa (viitattu 4.11.2018): <https://www.w3.org/TR/xml/>
- [18] I. Fette, A. Melnikov, The websocket protocol, tekn. rap., 2011.
- [19] Format string attack, OWASP verkkosivu. Saatavissa (viitattu 7.11.2018): https://www.owasp.org/index.php/Format_string_attack
- [20] GCC Manual: Options to Request or Suppress Warnings, GNU verkkosivu. Saatavissa (viitattu 8.11.2018): <https://gcc.gnu.org/onlinedocs/gcc/Warning-Options.html>
- [21] C. George, J. Dollimore, T. Kindberg, G. Blair, *Distributed Systems: Concepts and Design*, Addison-Wesley, 2012, 1047 s.
- [22] Google Trends: XML ja JSON. Saatavissa (viitattu 15.10.2018): <https://trends.google.com/trends/explore?date=today%205-y&geo=US&q=json,xml>
- [23] G. C. Hillar, *MQTT Essentials-A Lightweight IoT Protocol*, Packt Publishing Ltd, 2017.
- [24] IEC 61850-1 Communication networks and systems for power utility automation – Part 1: Introduction and overview, International Electrotechnical Commission, International Standard, maa. 2013, 73 s. Saatavissa (viitattu 15.6.2018): <https://webstore.iec.ch/publication/6007>
- [25] IEC 61850-6 Communication networks and systems for power utility automation – Part 6: Configuration description language for communication in electrical substations related to IEDs, International Electrotechnical Commission, International Standard, jou. 2009, 215 s. Saatavissa (viitattu 15.6.2018): <https://webstore.iec.ch/publication/6013>

- [26] IEC 61850-7-1 Communication networks and systems in substations - Part 7-1: Basic communication structure for substation and feeder equipment - Principles and models, International Electrotechnical Commission, International Standard, hei. 2003, 110 s. Saatavissa (viitattu 16.5.2018): <https://webstore.iec.ch/publication/20077>
- [27] IEC 61850-7-2 Communication networks and systems for power utility automation - Part 7-2: Basic information and communication structure - Abstract communication service interface (ACSI), International Electrotechnical Commission, International Standard, elo. 2010, 213 s. Saatavissa (viitattu 16.5.2018): <https://webstore.iec.ch/publication/6015>
- [28] IEC 61850-7-3 Communication networks and systems for power utility automation - Part 7-3: Basic communication structure - Common data classes, International Standard, jou. 2010, 182 s. Saatavissa (viitattu 16.5.2018): <https://webstore.iec.ch/publication/6016>
- [29] IEC 61850-7-4 Communication networks and systems for power utility automation - Part 7-4: Basic communication structure - Compatible logical node classes and data object classes, International Standard, maa. 2010, 179 s. Saatavissa (viitattu 16.5.2018): <https://webstore.iec.ch/publication/6017>
- [30] IEC 61850-8-1 Communication networks and systems for power utility automation - Part 8-1: Specific communication service mapping (SCSM) - Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3, International Standard, kes. 2011, 386 s. Saatavissa (viitattu 16.5.2018): <https://webstore.iec.ch/publication/6021>
- [31] IEC 61850:2018 SER Series, International Electrotechnical Commission, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 9.6.2018): <https://webstore.iec.ch/publication/6028>
- [32] E. International, The JSON Data Interchange Syntax, tekn. rap., jou. 2017. Saatavissa (viitattu 4.11.2018): <http://www.ecma-international.org/publications/files/ECMA-ST/ECMA-404.pdf>
- [33] JRuby kotisivu, JRuby verkkosivu. Saatavissa (viitattu 29.9.2018): <http://jruby.org/>
- [34] JSON API Specification: Recommendations, JSON:API verkkosivu. Saatavissa (viitattu 7.11.2018): <https://jsonapi.org/recommendations/>
- [35] K. Kaneda, S. Tamura, N. Fujiyama, Y. Arata, H. Ito, IEC61850 based Substation Automation System, teoksessa: 2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference, Oct, 2008, s. 1–8.

- [36] M. Kerrisk, The Linux programming interface : a Linux and UNIX system programming handbook, No Starch Press, San Francisco, 2010. Saatavissa: <https://tut.finna.fi/Record/tutcat.196912>
- [37] S. Kozlovski, Ruby's GIL in a nutshell, syysk. 2017. Saatavissa (viitattu 13.8.2018): <https://dev.to/enether/rubys-gil-in-a-nutshell>
- [38] libIEC61850 API overview, libIEC61850 verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.8.2018): <http://libiec61850.com/libiec61850/documentation/>
- [39] libIEC61850 documentation, libiec61850 verkkosivu. Saatavissa (viitattu 18.8.2018): <https://support.mz-automation.de/doc/libiec61850/c/latest/index.html>
- [40] libIEC61850 kotisivu, libIEC61850 verkkosivu. Saatavissa (viitattu 24.9.2018): <http://libiec61850.com>
- [41] R. E. Mackiewicz, Overview of IEC 61850 and Benefits, teoksessa: 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Oct, 2006, s. 623–630.
- [42] Message-Oriented Middleware (MOM), Oracle verkkosivu. Saatavissa (viitattu 2.11.2018): <https://docs.oracle.com/cd/E19340-01/820-6424/aeraq/index.html>
- [43] MMS Protocol Stack and API, Xelas Energy verkkosivu. Saatavissa (viitattu 9.7.2018): http://www.xelasenergy.com/products/en_mms.php
- [44] MQTT kotisivu, MQTT verkkosivu. Saatavissa (viitattu 2.11.2018): <http://mqtt.org/>
- [45] S. Mullender *et al.*, Distributed systems, nide 12, acm press United States of America, 1993.
- [46] G. Mühl, L. Fiege, P. Pietzuch, Distributed Event-Based Systems, Springer, 2006, 384 s.
- [47] New documents by IEC TC 57. Saatavissa (viitattu 9.6.2018): <http://digitalsubstation.com/en/2016/12/24/new-documents-by-iec-tc-57/>
- [48] N. Nurseitov, M. Paulson, R. Reynolds, C. Izurieta, Comparison of JSON and XML data interchange formats: a case study, Caine, vsk. 9, 2009, s. 157–162.
- [49] OASIS, MQTT version 3.1.1, Protocol Specification, lok. 2014. Saatavissa (viitattu 2.11.2018): <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.pdf>
- [50] R. Odaira, J. G. Castanos, H. Tomari, Eliminating Global Interpreter Locks in Ruby Through Hardware Transactional Memory, SIGPLAN Not., vsk. 49, nro 8, hel.

- 2014, s. 131–142. Saatavissa (viitattu 16.5.2018): <http://doi.acm.org/10.1145/2692916.2555247>
- [51] Official repository for libIEC61850, the open-source library for the IEC 61850 protocols <http://libiec61850.com/libiec61850>, GitHub verkkosivu. Saatavissa (viitattu 17.5.2018): <https://github.com/mz-automation/libiec61850>
- [52] Parsing Program Options with Argp, The GNU C Library. Saatavissa (viitattu 1.9.2018): https://www.gnu.org/software/libc/manual/html_node/Argp.html
- [53] A. Patrizio, XML is toast, long live JSON, kes. 2016. Saatavissa (viitattu 18.8.2018): <https://www.cio.com/article/3082084/web-development/xml-is-toast-long-live-json.html>
- [54] J. Postel, User Datagram Protocol, tekn. rap., 1980.
- [55] J. Postel, Transmission Control Protocol, tekn. rap., 1981.
- [56] The Power-User's Guide to htop, maketecheasier verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.11.2018): <https://www.maketecheasier.com/power-user-guide-htop/>
- [57] RabbitMQ C client, Github verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.9.2018): <https://github.com/alanxz/rabbitmq-c>
- [58] RabbitMQ Compatibility and Conformance, RabbitMQ verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.7.2018): <https://www.rabbitmq.com/specification.html>
- [59] RabbitMQ kotisivu, RabbitMQ verkkosivu. Saatavissa (viitattu 23.9.2018): <https://www.rabbitmq.com/>
- [60] The Rails Command Line, Ruby on Rails verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.11.2018): https://guides.rubyonrails.org/command_line.html#rails-runner
- [61] Ruby FFI, GitHub verkkosivu. Saatavissa (viitattu 24.9.2018): <https://github.com/ffi/ffi>
- [62] K. Schwarz, Introduction to the Manufacturing Message Specification (MMS, ISO/IEC 9506), NettedAutomation verkkosivu, 2000. Saatavissa (viitattu 9.7.2018): https://www.nettedautomation.com/standardization/ISO/TC184/SC5/WG2/mms_intro/index.html
- [63] J. Storimer, Nobody understands the GIL, kes. 2013. Saatavissa (viitattu 16.5.2018): <https://www.jstorimer.com/blogs/workingwithcode/8085491-nobody-understands-the-gil>
- [64] TwoBitHistory, The Rise and Rise of JSON, syysk. 2017. Saatavissa (viitattu 29.9.2018): <https://twobithistory.org/2017/09/21/the-rise-and-rise-of-json.html>

- [65] G. Wilson, A. Oram, Beautiful Code: Leading Programmers Explain How They Think, O'Reilly Media, Inc., 2007, 593 s.
- [66] J. Wyse, Why JSON is better than XML, elo. 2014. Saatavissa (viitattu 29.9.2018): <https://blog.cloud-elements.com/json-better-xml>
- [67] P. Youssef, Multi-threading in JRuby, hel. 2013. Saatavissa (viitattu 18.8.2018): <http://www.restlessprogrammer.com/2013/02/multi-threading-in-jruby.html>

LIITE A: VIESTISTÄ PROSESSOITU JSON-RAKENNE

```

1  {
2    "dataSetName": "LD0_CTRL/LLN0$StatUrg",
3    "sequenceNumber": 0,
4    "confRevision": null,
5    "timestamp": 1534993167923,
6    "bufferOverflow": false,
7    "values": [
8      {
9        "reasonForInclusion": "GI",
10       "mmsReference": "LD0_CTRL/CBCILO1$ST$EnaCls",
11       "reference": "LD0_CTRL/CBCILO1.EnaCls",
12       "functionalConstraint": "ST",
13       "values": [
14         {
15           "reference": "LD0_CTRL/CBCILO1.EnaCls.stVal",
16           "type": "boolean",
17           "value": false
18         },
19         {
20           "reference": "LD0_CTRL/CBCILO1.EnaCls.q",
21           "type": "bit-string",
22           "size": 13,
23           "valueLittleEndian": 0,
24           "valueBigEndian": 0
25         },
26         {
27           "reference": "LD0_CTRL/CBCILO1.EnaCls.t",
28           "type": "utc-time",
29           "value": 1534845456
30         }
31       ]
32     },
33     {
34       "reasonForInclusion": "GI",
35       "mmsReference": "LD0_CTRL/CBCSWI1$ST$Loc",
36       "reference": "LD0_CTRL/CBCSWI1.Loc",
37       "functionalConstraint": "ST",

```

```
38     "values": [  
39         {  
40             "reference": "LD0_CTRL/CBCSWI1.Loc.stVal",  
41             "type": "boolean",  
42             "value": true  
43         },  
44         {  
45             "reference": "LD0_CTRL/CBCSWI1.Loc.q",  
46             "type": "bit-string",  
47             "size": 13,  
48             "valueLittleEndian": 0,  
49             "valueBigEndian": 0  
50         },  
51         {  
52             "reference": "LD0_CTRL/CBCSWI1.Loc.t",  
53             "type": "utc-time",  
54             "value": 1534845456  
55         }  
56     ]  
57 },  
58 {  
59     "reasonForInclusion": "GI",  
60     "mmsReference": "LD0_CTRL/CBCSWI1$ST$Pos",  
61     "reference": "LD0_CTRL/CBCSWI1.Pos",  
62     "functionalConstraint": "ST",  
63     "values": [  
64         {  
65             "reference": "LD0_CTRL/CBCSWI1.Pos.stVal",  
66             "type": "bit-string",  
67             "size": 2,  
68             "valueLittleEndian": 0,  
69             "valueBigEndian": 0  
70         },  
71         {  
72             "reference": "LD0_CTRL/CBCSWI1.Pos.q",  
73             "type": "bit-string",  
74             "size": 13,  
75             "valueLittleEndian": 2,  
76             "valueBigEndian": 2048  
77         },  
78         {  
79             "reference": "LD0_CTRL/CBCSWI1.Pos.t",
```

```
80         "type": "utc-time",
81         "value": 1534845480
82     },
83     {
84         "reference": "LD0_CTRL/CBCSWI1.Pos.stSeld",
85         "type": "boolean",
86         "value": false
87     }
88 ]
89 }
90 ]
91 }
```

Ohjelma 1. Viestin prosessoitu JSON-rakenne.

LIITE B: C-OHJELMAN TULOSTAMA APU TEKSTI

```

1 Usage: rcb_sub [OPTION...]
2         EXCHANGE ROUTING_KEY
3         RCB_REF [RCB_OPTIONS...]
4         [RCB_REF [RCB_OPTIONS...]...]
5 Configure and subscribe IED report control blocks.
6 Received reports are combined with variable specification
7 data and formatted to JSON. Formatted messages are
8 forwarded to AMQP broker using direct exchange.
9
10 OPTION options:
11  -a, --amqp-host=HOST      Host address of the AMQP
12                             broker, defaults to localhost
13  -e, --ied-port=PORT       Port for MMS communication,
14                             defaults to 102
15  -h, --ampq-vh=VH          Virtual host for the AMQP
16                             broker, defaults to '/'
17  -i, --ied-host=HOST       Host address of the IED,
18                             defaults to localhost
19  -m, --ampq-port=PORT      Port for AMQP communication,
20                             defaults to 5672
21  -p, --ampq-pwd=PWD        User password for the AMQP
22                             broker, defaults to 'quest'
23  -u, --ampq-user=USER      User for AMQP broker,
24                             defaults to 'quest'
25  -v, --verbose             Explain what is being done
26
27 RCB_OPTIONS options:
28  -g, --gi=VALUE            Set general interrogation
29                             bit (1/0)
30  -o, --opt-fields=MASK     Report optional fields int
31                             bit mask (0 <= MASK <= 255)
32  -t, --trigger=MASK        Report triggering int bit
33                             mask (0 <= MASK <= 31)
34
35  -?, --help                Give this help list
36  --usage                   Give a short usage message
37  -V, --version              Print program version

```

38
39 Mandatory or optional arguments to long options are also
40 mandatory or optional for any corresponding short options.
41
42 EXCHANGE is name of the exchange used with the AMQP
43 broker. ROUTING_KEY is routing key used for the
44 published AMPQ broker messages. RCB_REF is reference
45 to report control block as specified in IEC 61850 standard.
46 For example MY_LD0/LLN0.BR.rcbMeas01
47
48 Reason for inclusion optional field is set automatically
49 in order for the program to combine read specification
50 data and only to include needed data set values which
51 actually triggered the report.
52
53 Trigger MASK values:
54 1 : data changed
55 2 : quality changed
56 4 : data update
57 8 : integrity
58 16 : general interrogation
59
60 Optional field MASK values:
61 1 : sequence number
62 2 : timestamp
63 4 : reason for inclusion (automatically set, see above)
64 8 : data set
65 16 : data reference
66 32 : buffer overflow
67 64 : entry id
68 128 : configure revision
69
70 Example usage:
71 \$ rcb_sub -v -i192.168.2.220 testexchange testkey \
72 MY_LD0/LLN0.BR.rcbMeas01 -g1 -t27 -o16
73
74 Report bugs to mauri.mustonen@alsus.fi.

Ohjelma 2. rcb_sub-ohjelman aputeksti.