

# **Sähköverkon operatiivisen mittausjärjestelmän kehittäminen**

Oskar Lindbom

Opinnäytetyö Insinööri (YH)-tutkinto

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Vaasa 2022

## OPINNÄYTETYÖ

Tekijä: Oskar Lindbom  
Koulutus ja paikkakunta: Sähkö- ja automaatiotekniikka, Vaasa  
Suuntautumisvaihtoehto: Sähkövoimatekniikka  
Ohjaaja: Henrik Järveläinen

Nimike: Sähköverkon operatiivisen mittausjärjestelmän kehittäminen

---

Päivämäärä 17.12.2021

Sivumäärä 36

Liitteet 3

---

### Tiivistelmä

Hyvät ja käyttövarmat mittaus- ja automaatiojärjestelmät ovat välttämättömiä sähköverkon operatiivisen käytön edesauttamiseksi ja tehostamiseksi. Mittausjärjestelmien toteutukset vaihtelevat sähköverkkoyhtiöittäin, ja ovat siten yksilöllisiä.

Opinnäytetyö kertoo jakeluverkon rakenteesta sekä komponenteista. Työ selvittää mitä sähkönsuureita sähköverkossa mitataan, mitä sähkön laatu on ja mitä erilaisia sähkön laatuun liittyviä ilmiöitä sähköverkossa syntyy.

Työn tavoite oli markkinakartoituksen avulla löytää sopiva mittalaite pienjänniteverkon mittauksiin. Se korvasi Turku Energia Sähköverkot Oy:n nykyisen mittalaitteen. Markkinakartoituksessa verrataan eri laitevalmistajien laitteita ja niiden teknisiä ominaisuuksia. Tämä työ on yksi osa mittausjärjestelmän kehittämisessä, jossa on tarkoitus hyödyntää paremmin konsernin omia datavarastoja ja tietokantoja sekä parantaa järjestelmän toimivuutta.

Työssä verrataan laitevalmistajien ABB:n, Schneider Electricin ja Metrumin laitteita.

Työn tulos on pohja laitevalinnalle. Työn markkinakartoituksen avulla löydettiin neljä laitetta, jotka vastaavat Turku Energia Sähköverkot Oy:n mittaustarpeita. Näistä laitteista valitaan tulevaisuudessa yksi laite korvaamaan nykyiset mittalaitteet kaikilla muuntamoilla.

---

Kieli: suomi

Avainsanat: muuntamoautomaatio, sähkön laatu, sähkönjakelu

## EXAMENSARBETE

Författare: Oskar Lindbom  
Utbildningsprogram och ort: El- och automationsteknik  
Inriktningalternativ: Elkraftsteknik  
Handledare: Henrik Järveläinen

Titel: Utveckling av elnätets operativa mätsystem

---

Datum 17.12.2021

Sidantal 36

Bilagor 3

---

### Abstrakt

Tillförlitliga mät- och automationssystem är nödvändiga för att underlätta och effektivisera den operativa driften av elnätet. Mätsystemets uppbyggnad varierar mellan olika elnätsbolag och är därför unika.

Arbetet behandlar distributionsnätets uppbyggnad och komponenter. I arbetet undersöks vilka storheter som man mäter i elnätet samt vad elkvalitet är och olika fenomen som berör detta.

Syftet med detta arbete var att hitta en ersättande mätapparat för att utföra mätningar i Åbo Energi Elnät Ab:s lågspänningsnät med hjälp av en marknadsundersökning. I marknadsundersökningen jämförs olika mätapparater med liknande tekniska egenskaper av olika tillverkare. Detta arbete är en del som ingår i utvecklingen av elnätets operativa mätsystem, där syftet är att utnyttja bättre konsernens egna datalager och databaser samt förbättra systemets funktionalitet.

I arbetet jämförs ABB, Schneider Electric och Metrums apparater.

Resultatet blev en grund för valet av den nya apparaten. Med hjälp av marknadsundersökningen hittades fyra lämpliga apparater som motsvarar Åbo Energi Elnät Ab:s mätkrav. I framtiden väljs en apparat som kommer att ersätta de nuvarande apparaterna i alla transformatorstationer.

---

Språk: finska

Nyckelord: nätstations automation, elkvalitet, eldistribution

## BACHELOR'S THESIS

Author: Oskar Lindbom  
Degree Programme: Electrical and automation engineering  
Specialisation: Electrical power engineering  
Supervisor: Henrik Järveläinen

Title: Development of the power grids operational measuring system

---

Date 17.12.2021

Number of pages 36

Appendices 3

---

### Abstract

Good and reliable measurement and automation systems are essential to facilitate and improve the efficiency for the operational use of the electricity grid. The structure of the measurement system varies between different electricity companies and is therefore, unique.

This work covers the structure and components of the distribution network. Further, the work examines which magnitudes are measured in the electricity grid, as well as what electricity quality is and various phenomena that concern this.

The aim of this work was to find a replacement for a measuring device that performs measurements in Turku Energia Sähköverkot Oy's low-voltage grid. This was realized using a market survey.

In the survey, different manufacturers' appliances are compared with measurement devices with similar technical characteristics. Further, the work is a part of the development for the power grids operational measuring system. The aim is to evolve the use of the group's data warehouses and databases, as well as improve the functionality of the system.

The work compares ABB, Schneider Electric and Metrum's appliances. So, the result functions as a basis for choosing a new measurement device based on the market research. Four suitable appliances were found corresponding to Turku Energia Sähköverkot Oy's measurement requirements. In the future one appliance is chosen to replace the current appliances in all transformer substations.

---

Language: Finnish

Key words: distribution substation automation, power quality, electricity distribution

## Sisällysluettelo

Käytetyt lyhenteet .....	1
1 Johdanto.....	2
1.1 Toimeksiantaja.....	3
1.2 Turku Energia Sähköverkko .....	4
1.3 Tarpeet .....	5
2 Sähkönjakeluverkko.....	6
2.1 Pienjänniteverkko.....	6
2.1.1 Pienjänniteverkon suojaus.....	7
2.2 Jakelumuuntamot.....	8
2.3 Jakelumuuntajat ja virtamuuntajat .....	10
2.3.1 Muuntajan lämpötila .....	10
2.3.2 Virtamuuntajat .....	10
2.4 Sähkönjakeluverkon automaatio .....	11
2.4.1 Yhtiötason automaatio .....	12
2.4.2 Valvomoautomaatio .....	12
2.4.3 Sähköasema-automaatio.....	13
2.4.4 Verkostoautomaatio .....	14
2.5 Pienjänniteverkon mittaukset.....	14
2.5.1 Reaaliaikamittaukset.....	14
2.5.2 True-RMS mittaus .....	16
2.5.3 Muuntajan lämpötilamittaus.....	16
2.5.4 Sähkön laatu .....	17
2.5.5 THD .....	18
2.5.6 Jännite-epäsymmetria .....	18
2.5.7 Kommunikaatio .....	18
2.5.8 Modbus TCP/IP .....	19
3 Markkinakartoitus .....	19
3.1 Mittausjärjestelmän kehitys.....	19
3.2 WIMO 6CP10 .....	21
3.2.1 Sovellus.....	21
3.3 ABB M4M-sarja.....	23
3.3.1 ABB M4M 20 .....	23
3.3.2 ABB M4M 30 .....	24
3.3.3 M4M 2X.....	24
3.3.4 M4M-tuotesarjan vertailu .....	25
3.4 Schneider PM5000-sarja .....	25
3.4.1 PM5340 .....	26

3.4.2	PM5570 .....	27
3.4.3	PM5650 .....	28
3.4.4	PM5000-tuotesarjan vertailu.....	28
3.5	Metrum.....	29
3.5.1	Metrum SC.....	29
3.6	Laitevertailu ja toteutus.....	30
3.6.1	Toteutusratkaisu.....	32
4	Tulos.....	32
5	Loppukeskustelu .....	33
6	Lähteet.....	35

## **Liiteluettelo**

Liite 1 – ABB M4M-tuotesarjan vertailu (ABB, 2021)

Liite 2 – PM5000-tuotesarjan vertailu (Schneider Electric, 2021)

Liite 3 – Metrum SC (Metrum, 2021)

## Käytetyt lyhenteet

THD	Kokonaissärökerroin (eng. Total Harmonic Distortion)
MODBUS TCP/IP	Modbus-protokolla muunnettu TCP/IP-yhteyksille
SCADA	Valvomo-ohjelmisto (eng. Supervisory Control And Data Acquisition)
True-RMS	Todellinen neliöllinen keskiarvo (eng. True-Root Mean Square)
PT100	Vastuslämpötilan mittausmenetelmä
IEC 60870-5-101	Sarjaliikenneprotokolla
IED	Intelligent Electronic Device
PLC	Ohjelmoitava logiikka (eng. Programmable Logic Controller)

# 1 Johdanto

Sähkönjakelu on elintärkeä yhteiskunnallinen prosessi, joka on välttämätön ihmisten päivittäisessä elämässä. Sähköä pidetään yleisesti itsestään selvänä, mutta sen takana on kuitenkin hyvin vaativa prosessi, joka mahdollistaa sähkön jakelun kaikkiin koteihin, tuotantolaitoksiin ja erilaisiin sähköä vaativiin yhteiskunnallisiin tarpeisiin. Sähköistyminen kehittyy myös tulevaisuudessa, kun etsitään uusia ilmastoystävällisiä ratkaisuja, jotka vaativat uusiutuvien energialähteiden käyttöä sähkön tuotannossa.

Sähköverkon automaatio- sekä mittausjärjestelmä on kehittynyt viime vuosien saatossa merkittävästi ja vaatii tulevaisuudessa kehityshankkeita. Aurinkopaneelit ovat yleistyneet myös kuluttaja-asiakkaiden keskuudessa viime vuosina, mikä lisää vaatimuksia sähköverkon haltijalle valvonnan sekä sähkötyöturvallisuuden kannalta. Tulevaisuudessa siirrytään kohti älykkäämpää sähköverkkoa kaikkien uusien laitteiden myötä. Tämän myötä halutaan lisätä jatkuvaa seuranta ja mittauksia myös pienjänniteverkossa.

Työn aiheena oli kehittää Turku Energia Sähköverkot Oy:n (TESV) operatiivista mittausjärjestelmää, joka mittaa sähkön perussuureita sekä sähkön laatua. Työn tavoitteena oli löytää sopiva korvaava mittalaite pienjänniteverkon mittauksiin markkinakartoituksen avulla. Työssä keskitytään siis pienjänniteverkon mittauksiin sekä tietoliikenne-ratkaisuihin. Nykyinen mittalaite WIMO 6CP10 on elinkaarensa loppusuoralla ja sen tilalle tarvitaan uusi korvaava laite kattamaan Wimon ominaisuuksia sekä tukemaan sähkönjakelun operatiivista käyttöä ja suunnittelua. Tulevaisuudessa ja tekniikan kehittyessä tarvitaan myös datan siirtoon parempia tietoliikenne-ratkaisuja, jotka vastaavat tämän päivän vaatimuksia. Sopivan laitteen löytyessä tuodaan mitattava data valvomo-ohjelmisto SCADA:an ja sen historiatietokantaan. Tällä tehostetaan konsernin omia tietokantoja ja niiden käyttöä.



## 1.1 Toimeksiantaja

Tämän työn toimeksiantajana toimii Turku Energia Sähköverkot Oy. Turku Energia Oy:n toimintaan kuuluu sähkön, kaukolämmön ja jäähdytyksen tuottaminen ja jakelu. Konsernilla on kaksi tytäryhtiötä: Turku Energia Sähköverkot Oy sekä Turun Seudun Kaukolämpö Oy. Turun Seudun kaukolämmöstä konserni omistaa 60,75 %, ja sen muut osakkaat ovat Kaarinan, Naantalın ja Raision kaupungit sekä Fortum Power and Heat Oy.

Konsernilla on osakkuuksia ja omistusosuuksia energiatuotannossa: Turun Seudun Energiatuotanto Oy (43,5 %), Svartisen Holding AS (34,74 %), Suomen Hyötytuuli Oy (12,5 %), Voimaosakeyhtiö SF Oy (3,76 %) sekä Kolsin Voima Oy (22,5 %). (Turku Energia, 2021)

Turku Energia on asettanut uudet ilmasto- ja ympäristötavoitteet vuosille 2021–2023. Tavoitteet koostuvat neljästä päätavoitteesta, josta ensimmäinen on tehdä töitä ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi sekä hiilineutraalin Turun puolesta. Keinot tavoitteen saavuttamiseksi ovat vähentää kaukolämmön ominaispäästöjä 85 % CO<sub>2</sub> - päästöjen osalta vuoteen 2023 mennessä. Toinen keino on jatkaa uusiutuvan energian osuutta sähkön ja lämmön hankinnassa. Muita tavoitteita ovat älykkäiden energiaratkaisujen tarjoaminen, kestävästi energiätulevaisuuden rakentaminen sekä vastuullisen sidosryhmätoiminnan tukeminen. (Turku Energia, 2021).

Turku Energia Sähköverkot Oy päätehtävä on vastata sähköenergian toimituksesta Turun kaupungin alueella. Käytän tässä työssä lyhennystä TESV OY, Turku Energia Sähköverkot Oy sijasta.

## 1.2 Turku Energia Sähköverkko

TESV Oy:n sähköverkko koostuu 110 kV suurjänniteverkosta, 10 kV ja 20 kV keskijänniteverkosta sekä 400 V pienjänniteverkosta. Kuvassa 1 on TESV Oy:n verkkoalue.



Kuva 1. TESV Oy:n sähköverkkoalue (Turku Energia, 2021).

Sähköasemia TESV Oy:llä on 16. Sähköasema on solmupiste, jossa voidaan suorittaa kytkentöjä sekä muuntaa jännitettä. Pääkomponenteiltaan sähköasema koostuu suurjännitekojeistosta, keskijännitekojeistosta sekä muuntajista. Kojeistot koostuvat kiskojärjestelmästä, lähtökennoista sekä suojausreleistä. Kojeistojen avulla voidaan kytkeä kuormituksia eri lähdöille tarpeen mukaan.

Keskijänniteverkossa käytetään pääsääntöisesti 10 kV jännitettä, lukuun ottamatta Ilpoisten ja Hirvensalon sähköasemia, jossa käytetään 20 kV jännitettä. Ilpoisten ja Hirvensalon sähköasema syöttää Turun seudun saaristoa sekä haja-asutusalueita, joissa käytetään pääsääntöisesti ilmajohtoverkkoa. Keskijänniteverkko koostuu ilmajohto- tai maakaapeliverkosta sekä muuntamoista. Keskijänniteverkko on rakennettu rengasverkoiksi, mutta sitä käytetään säteittäisesti. Muuntamo koostuu keskijännitekojeistosta, pienjännitekojeistosta sekä muuntajasta, jonka tehtävä on muuntaa keskijänniteverkon jännite, 400 V pääjännitteeksi. Lisäksi muuntamalla voidaan suorittaa kytkentöjä paikallisesti tai etänä. Kaukokäyttömuuntamoihin on asennettu kaukokäyttöjärjestelmä, joka mahdollistaa katkaisijoiden ohjauksen etänä SCADA-järjestelmästä.

TESV Oy:llä on käytössä Siemensin Spectrum Power 7 SCADA-järjestelmä. Järjestelmän avulla voidaan kauko-ohjata sähköverkon katkaisijoita ja erottimia sekä valvoa reaaliaikaisia mittauksia sähköverkolta. Oikean mittalaitteen löytyessä voidaan tuoda uuden laitteen mittausdata SCADA-valvontajärjestelmään sekä sen historiatietokantaan.

### 1.3 Tarpeet

Aloitin ensimmäisen kerran työni TESV Oy:lla vuonna 2019, kesätyöntekijänä. Olen pääasiassa työskennellyt verkon käytön suojaus- ja automaatioryhmässä. Olen työkokemukseni myötä päässyt tutustumaan SCADA-järjestelmään ja sähköverkon eri komponentteihin, joihin kuuluu myös monimittauslaite Wimo. Mittauslaitetta on käytetty tukena verkon operatiivisessa käytössä mm. vikatilanteissa ja yleisesti sähkön perussuurteiden seurannassa. Kesäisin muuntajat lämpenevät enemmän kuin talvisin ulkolämpötilan noustessa ja Wimon lämpötilamittauksien johdosta on pystytty reagoimaan tarpeessa jakelumuuntajien korkeisiin lämpötiloihin. Mittauslaitteen avulla on myös hyvä varmistaa kyseisen pienjännitekeskuksen kuormitustilanne paikallisesti sekä käyttökeskuksessa. Kuormien historiatietoa on käytetty muuntajakorvauskytkentöjen yhteydessä. Vikatilanteiden jälkeen on myös tarkistettu lokitiedoista, milloin vika on sattunut sekä erilaisia tietoja vikatilanteen tyyppiin liittyen. Wimo-laitteet kommunikoivat sarjaliikenteellä erilaisiin ala-asemiin, riippuen tietoliikennetähtäimistä. Tämä ratkaisu on todettu olevan tietyissä tapauksissa riittämätön sen toiminnan kannalta, joten uudelta mittalaitteelta vaaditaan parempia tietoliikenne ratkaisuja esimerkiksi Modbus TCP/IP ethernet protokollan käyttöä.

Uuden mittalaitteen tarpeista on keskusteltu TESV Oy:n henkilöstön kanssa. Mittalaite tulee korvata nykyisen laitteen saman tyyppisillä ominaisuuksilla. Mitattavat suurteet, jotka vaaditaan, tulee olla: jännite, virta, taajuus ja lämpötila. Sähkölaadun mittauksien osalta laite tulee mitata jännitteen ja virran THD:ta.

Mittalaite tulee yleisesti vastaamaan ominaisuuksiltaan nykyistä mittalaitetta WIMO 6CP10. Tulevaisuudessa halutaan myös tehostaa konsernin omia tietokantoja ja varoja, uuden mittalaitteen johdolla.

## 2 Sähkönjakeluverkko

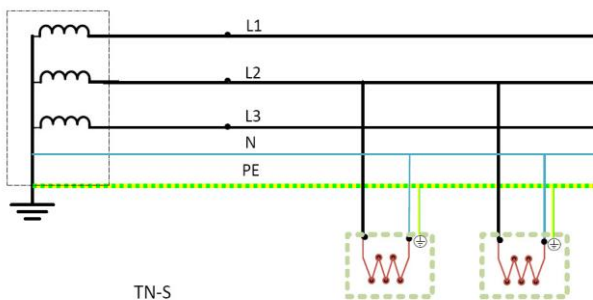
Sähkön siirto- sekä jakeluverkko on suuri kokonaisuus, joka koostuu monesta komponentista ja tekniikasta. Sähkönjakelu on elintärkeä yhteiskunnallinen prosessi, joka on ehdoton ihmisten päivittäisessä elämässä. Tässä työssä kerrotaan sähkönjakelun prosessista yleisesti sekä pienjänniteverkon mittauksista sähköyhtiön valvomon käyttötoiminnan tukemiseen.

### 2.1 Pienjänniteverkko

Pienjänniteverkko on verkko, jonka nimellisjännite on alle 1000 V. Suomessa pienjänniteverkossa käytetään pääjännitettä 400 V, josta muodostuu sähkönkuluttajalle 230 V vaihejännite. Pienjännite- sekä keskijänniteverkko ovat samankaltaisia rakenteeltaan ja suojausperiaatteiltaan. Pienjänniteverkkoa käytetään säteittäisenä niin kuin keskijänniteverkkoakin. Pienjänniteverkolla on yksi syöttöpiste, joka on jakelumuntaja, joka siten toimittaa johtojen ja kaapeleiden avulla sähkön kuluttajille. Haja-asutus alueella käytetään AMKA-riippukierrejohtoja, jotka asennetaan pylväisiin. Maakaapelointi on kuitenkin yleistynyt haja-asutus alueilla, kun sähköverkkoyhtiöt siirtyvät säävarempaan verkkoon. (Lakervi & Partanen, 2008a).

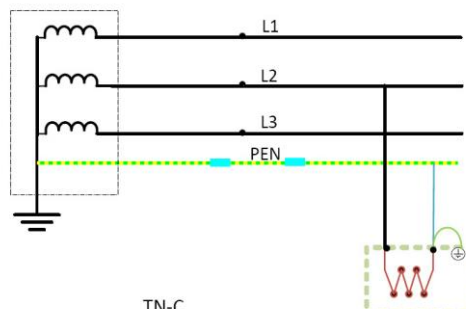
Suomessa pienjänniteverkon jakelujärjestelmänä käytetään käyttömaadoitettua TN-järjestelmää ja sen variaatioita. TN-järjestelmän variaatiot ovat TN-S, TN-C-S sekä TN-C järjestelmä (Nikkinen, 2018). Suomessa pienjännitejakeluverkossa käytetään TN-C järjestelmää (Kuva 3), jossa nolla- ja suojamaadoitusjohtimien toiminnot ovat yhdistetty yhteen PEN-johtimeen koko järjestelmässä. PEN-johdin on maadoitettava syöttöpisteessä tai korkeintaan 200 m:n päässä siitä. Jokainen yli 200 m:n johto tai johtohaara on maadoitettava loppupäässä tai enintään 200 m:n päässä siitä. Olosuhteiden salliessa maadoitusimpedanssi tulee olla alle  $100 \Omega$  jokaisessa maadoituspisteessä. (Lakervi & Partanen, 2008a).

Talojen sekä rakennusten uusissa sähköasennuksissa käytetään TN-S järjestelmää, jossa on erillinen nolla- ja suojausmaadoitusjohdin (Kuva 2). Historiallisista syistä on vielä olemassa rakennuksia, jossa käytetään TN-C järjestelmää tai sen variaatiota TN-C-S järjestelmää. Standardissa SFS 6000-1 (pienjännitesähköasennukset) on määritetty näiden järjestelmien variaatiot. (TAMK, 2013).



TN-S

Kuva 2. TN-S järjestelmä (TAMK, 2013).

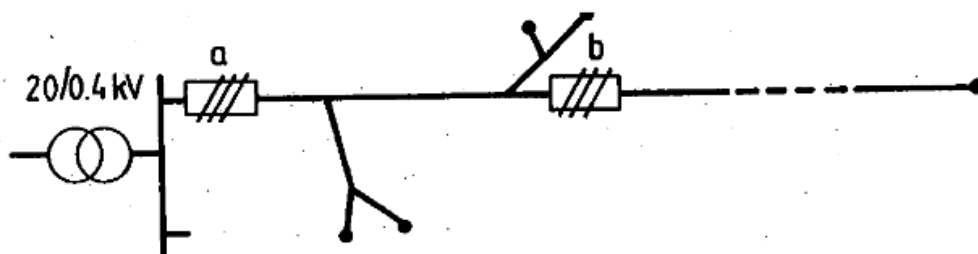


TN-C

Kuva 3. TN-C järjestelmä (TAMK, 2013).

### 2.1.1 Pienjänniteverkon suojaus

Kun pienjänniteverkon vaihejännite on 230 V, joka on kosketusjännitteenä vaarallinen ihmisille ja eläimille on syytä toteuttaa verkon- ja laitteiden suojaus hyvin. Pienjänniteverkon suojaus tapahtuu varokkeilla. Varokkeet sijoitetaan jakelumuuntamossa jokaiselle lähdölle, sekä kaikille vaihejohtimille. Varokkeen sulake mitoitetaan siten että se kestää kuormitusvirran sekä toimii riittävän nopeasti verkon loppupäässä tapahtuvasta oikosulusta. Jos tätä ei pystytä toteuttamaan joudutaan käyttämään suurempaa johdinpoikkipintaa tai asentamaan johdolle välivarokkeita. (Lakervi & Partanen, 2008a).



Kuva 4. Pienjännitejohdon suojausjärjestelmä (Lakervi &amp; Partanen, 2008a).

Kuva 4 mukaan sulake b:n nimellisvirta valitaan pienemmäksi kuin sulakkeen a.

## 2.2 Jakelumuuntamot

Pienjänniteverkkoa syöttää jakelumuuntamot. Jakelumuuntamalla muunnetaan suurempi keskijänniteverkon jännite 10 kV tai 20 kV, 400 V jännitetasolle. Kaupunkisähköverkossa on erilaisia jakelumuuntamotyyppejä kuten: puistomuuntamo (Kuva 5) tai pylväsmuuntamo (Kuva 6). Näiden kahden lisäksi suurin osa on kiinteistömuuntamoita, jotka sijoitetaan keskusta-alueella esim. kerrostalon kellariin. Tällä tavalla säästetään tilaa keskusta-alueilla.



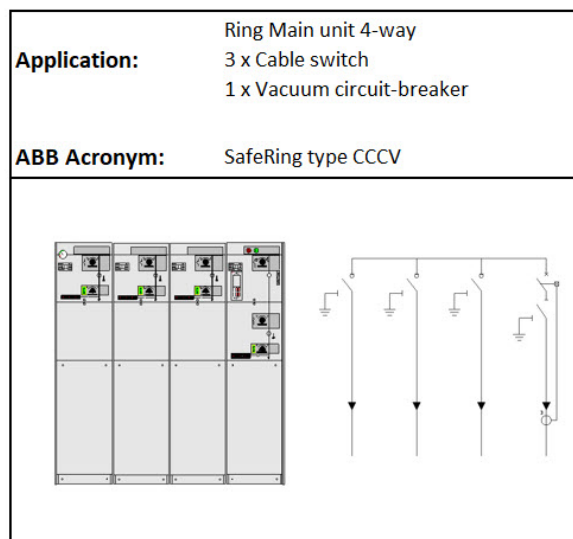
*Kuva 5. Puistomuuntamo (Alfen Elkamo, 2021).*



*Kuva 6. Pylväsmuuntamo (Elenia, 2021).*

Jakelumuuntamo koostuu keskijännitekiskostosta, yhdestä tai useammasta jakelumuuntajasta, pienjännitelähdöistä sekä apujännitejärjestelmästä. Maaseudulla käytetään pylväsmuuntamoita. Pylväsmuuntamoissa keskijännitejohto kytkeytyy erottimen kautta suoraan muuntajan ensiöliittimiin, jolloin tätä ei voi kutsua keskijännitekiskostona. Pylväsmuuntamot varustetaan yleensä ylijännitesuojalla, joka on perinteisesti suojakipinäväli. Tänä päivänä käytetään kuitenkin enimmäkseen venttiilisuoja sekä erilaisia virtaa rajoittavia suoja, ylijännitesuojan toteutukseen. Pylväsmuuntamot soveltuvat pienille enintään 315 kVA: muuntajille. Yleisiä nimellistehoja ovat 50 kVA ja 100 kVA. Pylväsmuuntamot sijoitetaan yleensä haaraan ja tällöin niiden avulla ei yleensä suoriteta keskijänniteverkon kytkentöjä. (Lakervi & Partanen, 2008a).

Taajama- ja kaupunkiverkoissa jakelumuuntamo toimii usein keskijännitekaapelirenkaan osana. Tällöin taajama- ja kaupunkiverkoissa jakelumuuntamo on tärkeä komponentti verkon tilan muuttamisessa. Keskijänniteverkon kytkennät suoritetaan keskijännitekojeiston avulla. Keskijännitekojeistoista löytyy eri kokoja ja rakenteita. Esimerkkinä ABB:n SafeRing 3+1 kojeisto (Kuva 7).



*Kuva 7. ABB SafeRing 3+1 (ABB).*

3+1 yksi tarkoittaa, että kojeisto koostuu kolmesta kaapelierottimesta, sekä yhdestä muuntaja-erottimesta. Yleensä nämä kojeistot ovat SF<sub>6</sub>-eristeisiä. Erottimet voidaan varustaa moottoreilla, jotka ovat yhdistetty kaukokäyttöjärjestelmään. Tämä mahdollistaa erottimien etäohjauksen. Muuntajien nimellisteho taajama- ja kaupunkiverkoissa ovat yleensä enintään 1000 kVA:n luokkaa. (Lakervi & Partanen, 2008a).

## 2.3 Jakelumuuntajat ja virtamuuntajat

Muuntaja on sähkölaite vaihtosähköjärjestelmässä, joka hyödyntää sähkömagneettista induktiota. Muuntaja muuntaa jännitettä ja virtaa kahden tai useamman käämityksen välillä. Muuntaja voi olla kuivaeristeinen tai öljyeristeinen. Suurin osa jakelumuuntajista ovat öljyeristeisiä. Muuntaja-öljy toimii eristeenä sekä jäähdytysväliaineena. Käämissä ja rautasydämessä kehittyy käytössä lämpöä, joka johdatetaan muuntaja-astian pintaan. Lisäksi muuntaja öljy toimii valokaaren sammuttajana. (Elovaara & Haarla, 2011a).

### 2.3.1 Muuntajan lämpötila

Muuntajan lämpötilasta voi arvioida sen kuormitettavuuden. Muuntaja valmistajat mitoittavat muuntajat IEC-standardin mukaan. Mitoituskuormalla ajo 20 °C:n ympäristölämpötilassa on normaalia käyttöä. Huippukuormitus kohdistuu Suomessa tyypillisesti kylmään vuodenaikaan, jolloin kuormitettavuus paranee.

Muuntajiin on perinteisesti asennettu lämpötilamittareita, jotka mittaavat muuntajan yläöljyn lämpötilaa. (Elovaara & Haarla, 2011a).

Osa TESV Oy:n jakelumuuntamoista ovat varustettu PT100-lämpötilaantureilla. Antureiden avulla saadaan reaaliaikatietao muuntajan lämpötilasta, josta voidaan tehdä johtopäätöksiä muuntajan kuormitustilanteesta.

### 2.3.2 Virtamuuntajat

Virtamuuntajat ovat erikoisrakenteisia muuntajia, joiden pääasiallisena tehtävänä on:

- erottaa mittauspiiri galvaanisesti päävirtapiiristä
- suojella mittauslaitteita ylikuormitukselta
- tuoda mahdollisuus asentaa mittalaite etäälle varsinaisesta mittauspaikasta
- muuttaa mitta-alaa ja samalla mahdollistaa mitta- ja suojalaitteiden standardointi tiettyihin mitoitusarvoihin

Virtamuuntajia on kahta eri tyyppiä: mittaustarkoituksiin- sekä suojaustarkoituksiin valmistettuja. (Elovaara & Haarla, 2011a).



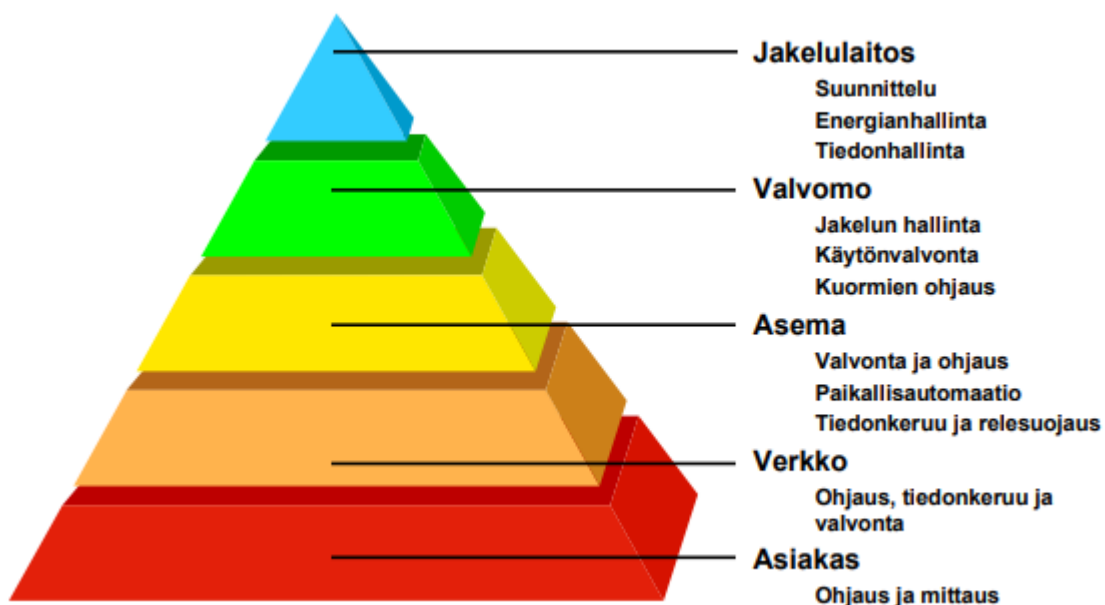
Virtamuuntajan toisiovirta on suhteutettu ensiövirtaan. Virtamuuntajia käytetään virta-, teho-, sekä energiamittauksiin. Virtamuuntajan toisiovirta on yleensä 5 A tai 1 A. Virtamuuntajan ensiökäämi on johdin, joka on kiedottu ympyrämuotoisen rautasydämen ympäri. Ensiövirta tuottaa rautasydämeen magneettivuon, joka sen sijaan tuottaa suhteellisen toisiovirran toisiopiiriin. (Ahoranta, 2009).

Virtamuuntajan toisiopiiriä on oikosulussa ja sitä ei saa katkaista, koska tästä seuraa virtamuuntajan kuumentuminen sekä toisiopuolen jännite nousee hengenvaarallisen suureksi. Yleensä tämän lopputulos on eristeiden sulaminen sekä virtamuuntajan vaurioituminen. (Ahoranta, 2009).

## 2.4 Sähkönjakeluverkon automaatio

Sähkönjakeluverkon automaatiolla tarkoitetaan jakeluverkoston hallintaa, käyttöä ja valvontaa. Automaatiolla toteutetaan erilaisia ohjauksia ja mittauksia ja välitetään tilatietoja ja hälytyksiä. Täten automatisointi säästää kustannuksissa sekä parantaa sähköverkon käyttöastetta ja luotettavuutta. (ABB, 2021).

Jakeluverkon automatisointia kutsutaan DA-järjestelmäksi (Distribution Automation). DA-järjestelmä sisältää automaatiojärjestelmän, johon on integroitu tuotteita sekä järjestelmiä (Kuva 8). Näillä voidaan ohjata, hallita sekä toimittaa sähköä sen kulutustarpeen mukaan.



Kuva 8. DA-järjestelmä (ABB, 2021).

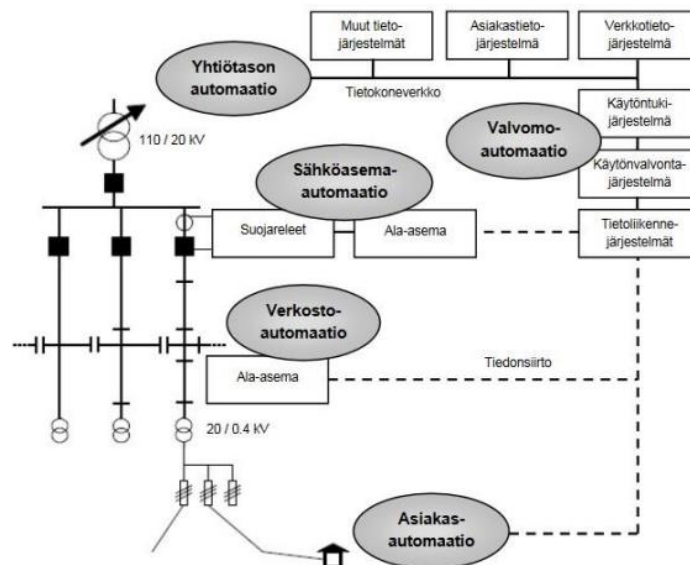
Sähkönjakeluautomaatio on jaoteltu kuvan 9 mukaan yhtiö-, valvomo-, sähköasema-, verkosto- sekä asiakasautomaatioon. Näiden toimintojen toteuttaminen vaatii laajat tiedonsiirtoyhteydet ja järjestelmät. (Lakervi & Partanen, 2008b).

### 2.4.1 Yhtiötason automaatio

Yhtiötason automaation perustana on verkkoyhtiön eri tietojärjestelmien ja sovellusten hyödyntäminen. Nämä järjestelmät ovat verkkotietojärjestelmä, asiakastietojärjestelmä, käytönvalvontajärjestelmä sekä käytöntukijärjestelmä. Tavoitteena on, että tiedot olisivat joustavasti verkkoyhtiön eri toimintojen sekä ulkoisten toimijoiden käytettävissä. Näistä eri järjestelmistä kerrotaan seuraavissa kappaleissa. (Lakervi & Partanen, 2008b).

### 2.4.2 Valvomoautomaatio

Suurimmalla osalla sähköverkkoyhtiöllä on valvomo, joka on miehitetty vuoden jokaisena tuntina. Valvomossa toteutetaan verkon tilan seuranta ja ohjausta sekä häiriötilanteiden hallintaa. Valvomolla on käytössä kaksi järjestelmää: käytönvalvonta- sekä käytöntukijärjestelmä.



Kuva 9. Sähköverkon automaatio (Lakervi & Partanen, 2008b).

Käytönvalvontajärjestelmä kutsutaan myös nimellä SCADA-järjestelmä (SCADA, Supervisory Control and Data Acquisition). Järjestelmä valvoo reaaliaikaisesti

sähköjako- ja verkon tilaa. SCADA-järjestelmän päätoiminnot ovat Lakervi & Partasen kirjan Sähköjako- ja verkon tekniikka mukaan seuraavat:

- Tapahtumatietojen hallinta
- Verkon-kytkentätilanteen hallinta
- Kauko-ohjaukset
- Kaukomittaukset
- Kaukoasettelut
- Raportointi

SCADA-järjestelmä on sähköverkkoyhtiöille kriittinen järjestelmä, jonka tulee toimia, kun muut järjestelmät eivät toimi. Tämä asettaa järjestelmälle myös suuret tietoturva-vaatimukset.

Käytöntukijärjestelmä (KTJ) on ohjelmistokokonaisuus, joka sisältää monipuolisia sovelluksia päätöksenteon tueksi. Käytöntukijärjestelmä hyödyntää yhtiön eri tietojärjestelmien tietoja esim. SCADA-järjestelmää, asiakastietojärjestelmää sekä paikkatietojärjestelmää (Kuva 9). SCADA:n ja käytöntukijärjestelmän ero ovat niiden ”älykkyytaso”. SCADA-järjestelmä kerää tietoja verkolta ja välittää nämä käytöntukijärjestelmään, jonka perusteella voidaan tehdä paremmin johtopäätöksiä. Esimerkiksi käytöntukijärjestelmä laskee mahdollisen vikapaikan vian sattuessa, oikosulkuvirtatietojen perusteella. Tämä edellyttää toimivan SCADA-järjestelmän oikosulkuvirtatietojen saamiseksi. (Lakervi & Partanen, 2008b).

### **2.4.3 Sähköasema-automaatio**

Sähköasema-automaatio koostuu virta- ja jännitemittauksista, kytkinlaitteiden ohjauksista sekä suojarleiden toiminnasta (Lakervi & Partanen, 2008b). Sähköasema-automaatiojärjestelmä hyödyntää myös SCADA-järjestelmää ohjauksien sekä tiedonsiirtojen toteuttamiseen. Suojareleet sähköasemilla on hyvin olennainen laite, koska kaikki lähtöjen tiedot sekä ohjaukset menevät suojarleiden kautta ala-asemalle. Suojarele

laskee myös vikatilanteessa oikosulkuvirran vian paikantamista varten käytöntukijärjestelmälle.

#### **2.4.4 Verkostoautomaatio**

Verkostoautomaatio sijaitsee hierarkiassa sähköasema-automaation sekä asiakasautomaation välissä. Verkostoautomaatio keskittyy pääsääntöisesti jakelumuuntamoihin ja niiden kojeistoihin. Se sisältää KJ-verkon erottimien kauko-ohjausta, verkossa olevien virta- ja jännitemittauksen toteutuksen sekä vianilmaisimien tiedonsiirron. Kattavalla verkostoautomaatiolla voidaan parantaa sähkönjakelun toimitusvarmuutta sekä vähentää keskeytysaikoja asiakkaille. (Lakervi & Partanen, 2008b)

Tämän työn paino on verkostoautomaation kehittämisessä sekä sen tiedon siirtämisessä ja tallentamisessa. TESV Oy:llä verkostoautomaatio tukee käyttötoimintaa mittaustiedolla, kauko-ohjauksilla sekä vianpaikannuslaitteilla.

### **2.5 Pienjänniteverkon mittaukset**

Tässä kappaleessa kerrotaan mittalaitteiden yleisistä mittauksista sekä mihin mittaukset perustuvat. Mittaukset pienjänniteverkossa toteutetaan jakelumuuntamoissa sekä asiakkaiden sähkömittareilla. TESV Oy:llä toteutetaan jakelumuuntamoiden pienjännitemittaukset mittauslaitteella. Jännitemittaus toteutetaan suoralla liitännällä pienjänniteverkon kiskoon ja virtamittaus epäsuorana mittauksena jännitemuuntajia hyödyntäen.

Mitattavat suurteet jakelumuuntamoissa ovat jännite, virta sekä taajuus. Näiden suureiden avulla voidaan laskea pätötehoa, loistehoa sekä näennäistehoa seuraavan kappaleen kaavojen mukaan.

#### **2.5.1 Reaaliaikamittaukset**

Pätöteho on se teho, jolla tehdään itse työ. Pätöteho syntyy virtapiirin jännitteestä sekä virrasta. Pätötehon yksikkö on watti (W).

$$P_{L1} = U_{L1} \times I_{L1} \times \cos \varphi \quad (1)$$

$$P = P_{L1} + P_{L2} + P_{L3} \quad (2)$$

jossa  $U_{L1}$  = mitattu vaihejännite

$I_{L1}$  = mitattu vaihevirta

$\phi$  =  $U_{L1}$  ja  $I_{L1}$  välinen kulma

P = pätöteho

Kaavan 1 ja 2 mukaan lasketaan vaiheittainen sekä yhteenlaskettu pätöteho. (Schneider Electric, 2015).

Monet laitteet tarvitsevat pätötehon lisäksi loistehoa. Loistehoa tarvitaan magneettikentän ylläpitämiseksi esim. moottoreissa, tehoelektroniikassa, muuntajissa sekä valaistuksessa. Loistehossa virran ja jännitteen välille on aina muodostunut vaihesiirtoa. Loisteho voi olla induktiivista tai kapasitiivista. Induktiivisessa loistehossa virta on  $90^\circ$  jännitteen jäljessä. Induktiivista loistehoa verkkoon tuottaa mm. kelat ja loisteputkivalaisimet. Kapasitiivisessa loistehossa virta on  $90^\circ$  jännitteen edellä. Kapasitiivista loistehoa verkkoon tuottaa mm. kondensaattorit ja kaapelit. Loistehon yksikkö on vari (VAR). (Kymenlaakson Sähköverkko, 2018).

$$Q_{L1} = U_{L1} \times I_{L1} \times \sin \varphi \quad (3)$$

$$Q = Q_{L1} + Q_{L2} + Q_{L3} \quad (4)$$

jossa Q = loisteho

Kaavan 3 ja 4 mukaan lasketaan vaiheittainen sekä yhteenlaskettu loisteho.

Näennäisteho on pätötehon sekä loistehon yhteenlaskettu komponentti. Näennäisteho on se todellinen teho, josta sähkölaitokset veloittavat asiakkailta. Näennäistehon yksikkö on voltiampeeri (VA).

Näennäisteho lasketaan kaavan 5 mukaan. (Schneider Electric, 2015).

$$S^2 = P^2 + Q^2 \rightarrow S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (5)$$

### 2.5.2 True-RMS mittaus

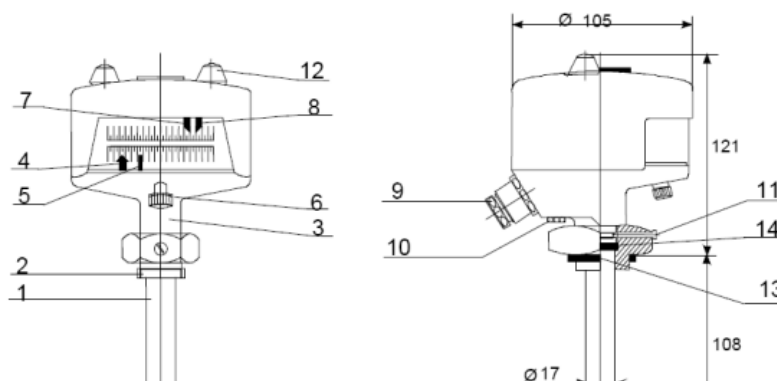
True-RMS mittaus (RMS: root mean square) tarkoittaa todellinen neliöllinen keskiarvo mittaus. Mittausmenetelmä on yksi kolmesta AC-virran sekä AC-jännitteen mittaus tavoista. True-RMS mittausta hyödyntävät laitteet ovat suositumpia kuin tavalliset digitaaliset yleismittarit. Nämä mittarit pystyvät mittaamaan sinimuotoisia sekä muita AC-aaltomuotoja hyvällä tarkkuudella. Mittari laskee AC-aaltomuotoa vastaavan DC-lämmitystehoarvon.

Vuosien saatossa muiden kuin siniaaltojen todennäköisyys virtapiireissä on kasvanut. Epälineaariset kuormat, kuin taajuusmuuttajat, tietokoneet ja sähköiset kuristimet voivat vääristää aaltomuotoja sähköverkossa ja tällöin vaaditaan parempia mittareita. (Fluke, 2021).

### 2.5.3 Muuntajan lämpötilamittaus

Muuntajan lämpötilaa mitataan muuntajan öljystä. Päämuuntajissa on kattavammat suojaukset kuin jakelumuuntajissa. Päämuuntajissa mitataan öljyn lämpötilaa koskettimilla varustetuilla mittareilla, jotka mittaavat kapilaariputken avulla öljyn lämpötilaa. Mittariin on asetettu hälytys- ja laukaisurajat, jotka lähettävät hälytys- tai laukaisukäskyn katkaisijalle tarvittaessa. Hälytysraja on yleisesti asetettu 85 °C ja laukaisuraja 95 °C.

Jakelumuuntajissa lämpötilamittari ei ole vakiovaruste, mutta suuremmat jakelumuuntajat suositellaan varustettaviksi myös lämpötila-anturilla. Lämpötila anturi on yleisesti tyypiltään kosketinlämpömittari. Anturi on sijoitettu jakelumuuntajan kannessa olevaan lämpömittaritaskuun, joka on täytetty öljyllä. (Elovaara & Haarla, 2011a).



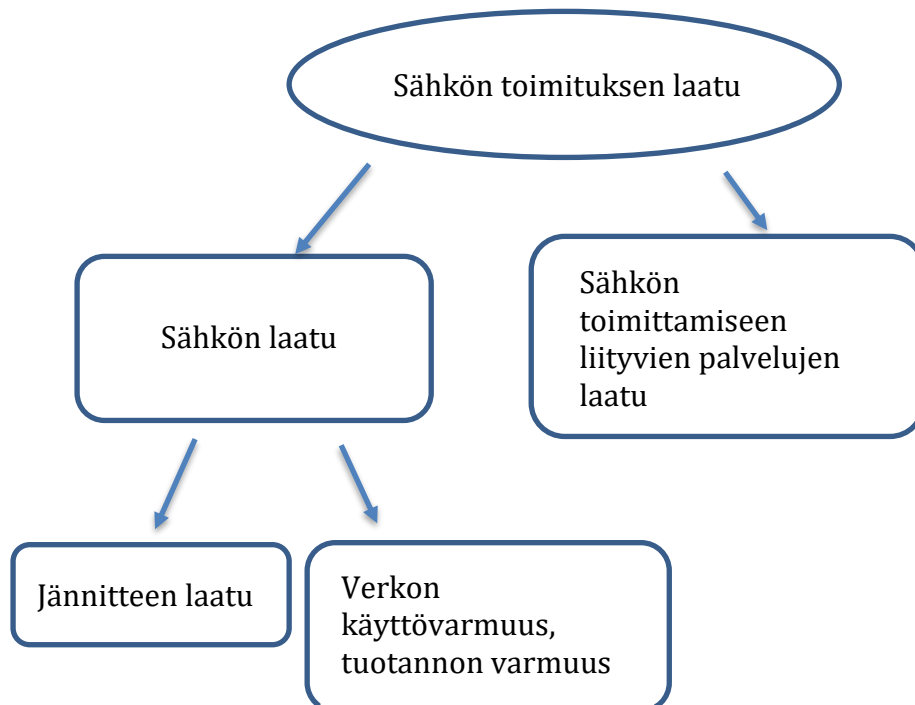
Kuva 10. Kosketinlämpömittari (ABB).

TESV Oy:n jakelumuuntajiin on asennettu PT100-lämpötila-antureita. Vastuksen materiaali on platina (Pt), joka hyödyntää vastusmittausmenetelmää. Vastuksen arvo on  $100 \Omega$  lämpötilan ollessa  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Platinan resistanssin lämpötilakerroin on positiivinen, jolloin vastus kasvaa lämpötilan noustessa. (Lapp Automaatio Oy, 2021).

PT100-anturi kytketään suoraan mittalaitteen riviliittimelle ja johtoresistanssi syötetään laitteen asetuksissa, jolloin laite suorittaa kalibroinnin saadakseen mahdollisimman tarkan mittatuloksen Tämä mittaustapa vaatii toki mittalaitteelta PT100-mittausominaisuuden. (Schneider Electric, 2015).

#### 2.5.4 Sähkön laatu

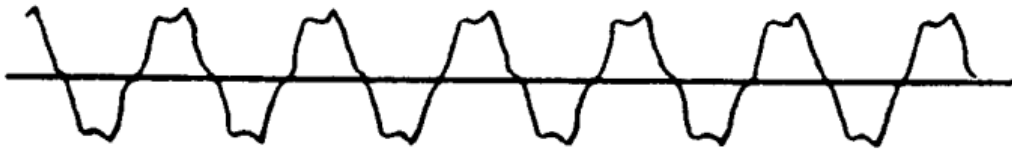
Sähkön toimituksen laatu perustuu sähkön laatuun sekä sähkön toimittamiseen liittyvien palvelujen laadusta sekä asiakkaiden informoimisesta.



Sähkön laatu, perustuu jännitteen laatuun sekä verkon käyttö- sekä tuotantovarmuuteen. Tässä kappaleessa keskitytään sähkön laadun mittauksiin. (Lakervi & Partanen, 2008b).

### 2.5.5 THD

THD, eli "total harmonic distortion" on jakelujännitteen tai virran kokonaissärökerroin. THD:llä siis mitataan harmonisten yliaaltojen määrää suhteessa perustaajuiseen komponenttiin. Yliaaltojen määrä on kasvanut viime vuosina taajuusmuuttajien ja vastaavien säätölaitteiden käytössä, jonka myötä mittaustarpeet yliaalloista on lisääntyneet. Harmoniset yliaallot muodostuvat epälineaarista kuormista mm. tasasuuntaajista, teholähteistä tai purkausvalaisimista. Jakelujännitteen kokonaissärökerroin arvon tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin 8 %. (Lakervi & Partanen, 2008c). (Kuva 11)



Kuva 11. Jännite, joka on säröytynyt harmonisen yliaallon vuoksi (ABB, 2021).

### 2.5.6 Jännite-epäsymmetria

Jännite epäsymmetria tarkoittaa kuormien epätasaisen jaon eri vaiheille. Epäsymmetriaa syntyy, jos kolmivaihejärjestelmän yksi- ja kaksivaiheiset kuormat on jaettu epätasaisesti eri vaiheille. Epäsymmetria aiheuttaa siis vinokuormitusta, joka vaikuttaa jännitteen laatuun sekä sähköverkoissa epätaloudellisen käytön. Jännite-epäsymmetriaa voidaan laskea matemaattisesti symmetristen komponenttien avulla. Yleensä sopivaksi rajaksi on tulkittu n. 2 % jännitteen vastakomponentin suhteelliselle arvolle. (Elovaara & Haarla, 2011b).

### 2.5.7 Kommunikaatio

Tehokas verkon käyttö sekä valvonta perustuu suuremmaksi osaksi kaukomittauksiin ja kauko-ohjauksiin. Tämän saavuttamiseksi tarvitaan hyvät ja varmat tiedonsiirtoyhteydet sähköverkon komponenttien sekä valvomon välillä, tämän toteuttamiseen käytetään kaukokäyttöjärjestelmää sekä SCADA-järjestelmää. Eri komponentit käyttävät eri tiedonsiirtoprotokollia, tiedonsiirron toteutukseen. (Elovaara & Haarla, 2011c).



### 2.5.8 Modbus TCP/IP

Modicon toi ensimmäiset PLC:t markkinoille, jonka myötä he myös kehittivät Modbus-tietoliikenne protokollan. Modbus-protokolla otettiin käyttöön ensimmäistä kertaa vuonna 1979. Modicon on nykyisin Schneider Electric:in omistuksessa. Protokolla oli alun perin suunniteltu sarjaliikenne-ratkaisuille, mutta myöhemmin otettiin myös käyttöön ethernet-pohjainen TCP/IP versio.

Modbus TCP/IP on yleinen siirtoprotokolla internet yhteyksissä, ja siitä on tullut hyvin yleinen sen helppouden, yksinkertaisuuden sekä halvan käytön johdosta. Modbus TCP/IP-liikennöintiin on varattu portti 502. Modbus TCP/IP on Modbus-protokolla, joka on paketoitu TCP/IP pakettiin. (Modbus, 2021).

## 3 Markkinakartoitus

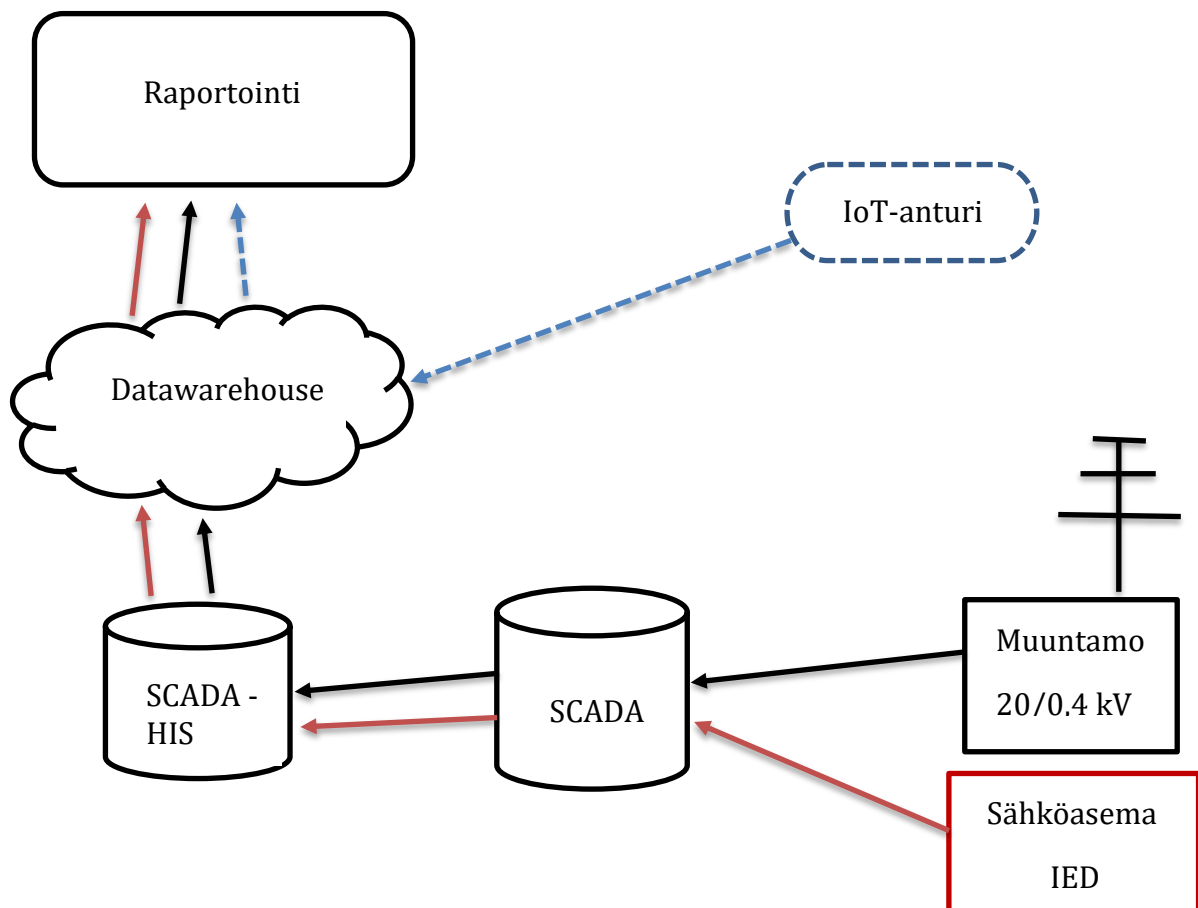
Erilaiset mittaukset sähköverkon operatiivisessa käytössä ovat tärkeitä kokonaistilanteen hahmottamisessa. Tässä luvussa perehdytään eri laitevalmistajien tuotteisiin ja verrataan niiden ominaisuuksia. Markkinakartoituksen tarkoitus on edesauttaa uuden mittalaitteen valintaa, jakelumuuntamoiden pienjännitemittauksien toteutukseen. Työssä vertaillaan kolmen eri valmistajan laitteita: ABB:n M4M-sarja, Schneider Electricin PM5000-sarja sekä Metrumin laitteita. Vertailussa otetaan huomioon TESV Oy:n tarpeet sekä verrataan niitä laitteiden ominaisuuksiin.

Markkinakartoitus suoritetaan taulukkovertailun avulla. Taulukkoon on otettu mukaan ainakin ne ominaisuudet, joita laitteelta vaaditaan sekä muita, joista voisi olla hyötyä. Reaaliaika mittaukset jännite, virta, teho sekä taajuus ovat olennaisia tarvittavia ominaisuuksia. Sähkön laatuun tulevista ominaisuuksista voidaan tinkiä jonkin verran riippuen paljon muista laitteen ominaisuuksista. Markkinakartoituksessa verrataan ainoastaan niitä laitteita, jotka tukevat Modbus TCP/IP tietoliikenne protokollaa.

### 3.1 Mittausjärjestelmän kehitys

TESV Oy:n muuntamoautomaatio koostuu kaukokäyttöjärjestelmästä, vianpaikannuslaitteista sekä sähkön laadun mittauksista. Sähkön laadun mittalaitteena toimii Wimo 6CP10. Laitteen mittaama data viedään ulkoisen toimijan tietokantoihin, josta pystytään tarkastamaan tietoa käyttäjärajapinnan kautta. Tulevaisuudessa halutaan

tehostaa SCADA:n historiatietokantaa. Tietokanta on olemassa ja käytössä, mutta tällä hetkellä tietoja ei käsitellä mitenkään. Konsernin omien tietokantojen tehokas hyödyntäminen edesauttaa datan analysointia tulevaisuudessa. Sähköverkoilla ympäri Suomea on ryhdytty hyödyntämään Internet of Things (IoT) ratkaisuja erilaisiin mittaustarpeisiin. IoT-anturin data yksinään voi olla tarpeetonta, mutta jos dataa verrataan ja hyödynnetään keskenään, voidaan saada hyödyllisiä havaintoja, joita ei välttämättä olisi huomattu aikaisemmin. Tulevaisuudessa voidaan siis datan rikastamisella hyödyntää sitä paremmin, mutta tämä vaatii sen, että saadaan kaikki sähköverkolla mitattu data samaan datavarastoon. Uuden tarpeita vastaavan mittalaitteen valinta on ensimmäinen askel tämän saavuttamiseksi. (Kuva 12)



Kuva 12. Mittausjärjestelmän kehitys (punainen: sähköaseman data, musta: jakeluverkon data, sininen: IoT data)

## 3.2 WIMO 6CP10

TESV Oy:llä on käytössä Schneider Electric'in WIMO 6CP10-mittauslaite. Tämä malli on markkinoilta poistumassa. WIMO 6CP10 on nykyinen mittauslaite, joka on käytössä TESV Oy:n verkkoalueen jakelumuuntamoissa. Laite on asennettuna muuntamon PJ-keskukseen (Kuva 13).



*Kuva 13. Wimo asennettuna PJ-keskukseen (TESV Oy).*

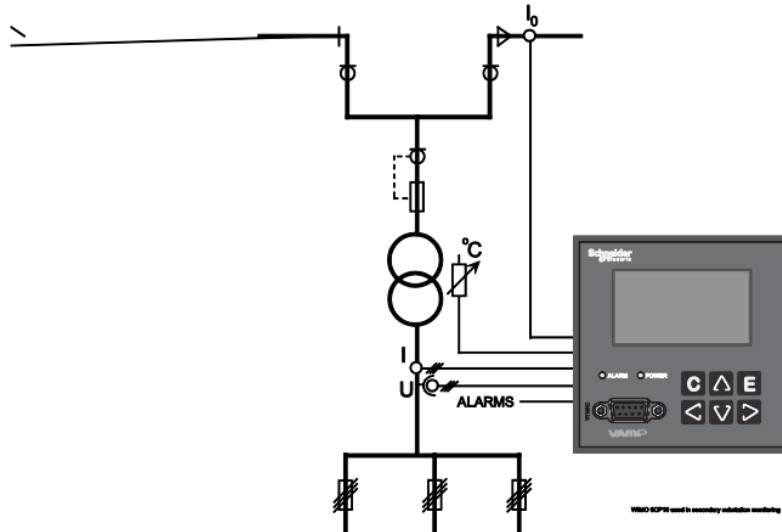
Laite käyttää IEC 60870-5-104/-101 sarjaliikenne protokollaa tai Modbus TCP/IP ethernetpohjaista protokollaa. Laitteita on asennettu uusiin verkolle asennettuihin jakelumuuntamoihin jo monen vuoden ajan, ja täten tietoliikenteen toteutus vaihtelee kohteittain. Tietoliikenne-ratkaisun valintaan vaikuttavat mm. asennetaanko muuntamoon kaukokäyttökojeisto ala-aseamalla.

### 3.2.1 Sovellus

Wimo mittauslaite on asennettu jakelumuuntamoiden pienjännitekeskukseen. Laite mittaa jännitettä, virtaa, taajuutta sekä muuntajan lämpötilaa. Laitteen mittaama sekä laskema data tuodaan tietoliikenteen avulla SCADA-järjestelmään, jossa sähköverkkoa valvotaan reaaliaikaisesti. Kaikkea dataa ei kuitenkaan tuoda SCADA-järjestelmään koska sitä voidaan

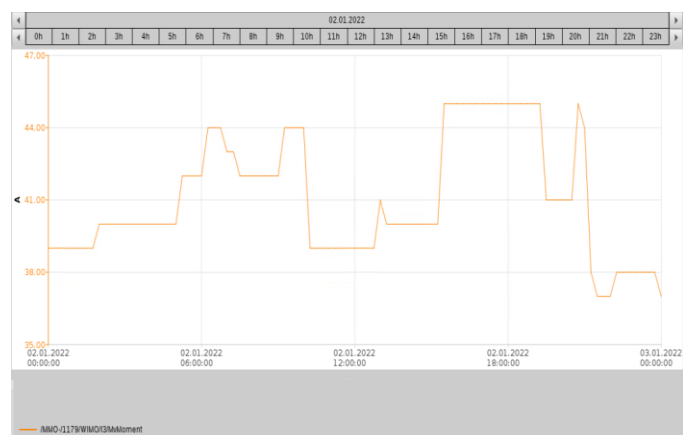
tarkastella ulkoisen toimijan tietokannasta sen käyttöliittymän avulla. Tulevaisuudessa olisi kuitenkin tarkoitus tuoda kaikki data SCADA:n historiatietokantaan. (Kuva 14)

Uudelta mittauslaitteelta vaaditaan samankaltaista sovellusta käyttöönotettavaksi.



Kuva 14. Wimo-mittauslaitteen applikaatio (Schneider Electric, 2015).

SCADA-järjestelmään tulee reaaliaikamittauksia suoraan Wimo laitteelta. Dataa voidaan tarkastella SCADA-järjestelmästä, kun sille on luotu tietokannat, tietoliikennepisteet ja kuvat. Wimon reaaliaikamittaukset näkyvät SCADA:ssa (Kuva 15). Historiatietoja voidaan tarkastella esimerkiksi käyrämuodossa (Kuva 16).



Kuva 15. Wimon mittaukset SCADA-järjestelmässä (TESV Oy). Kuva 16. Virtakäyrä SCADA-järjestelmässä (TESV Oy).

### 3.3 ABB M4M-sarja

ABB:n M4M-sarjan verkkoanalysaattorit on valmistettu sähköenergian monitorointiin sekä sähkönlaadun analysointiin. M4M-sarja korvaa ABB:n vanhat M2M sekä ANR-mallistot. Tuotesarjaan kuuluu kolme laitetta: M4M 20, M4M 30 sekä uutuutena M4M 2X. Laitteet soveltuvat ulkona sijaitseviin muuntamoihin niiden IP54 luokan sekä käyttölämpötilan johdosta. Laitteet tukevat seuraavia tietoliikenne protokollia: Modbus RTU, Modbus TCP/IP, Profibus DP-V0 sekä BACnet/IP. Laitteilla M4M 20 ja M4M 30 on graafinen värinäyttö mikä helpottaa konfigurointia sekä tarkastelua. Laitteet mittaavat jännitettä sekä virtaa. M4M-verkkoanalysaattoreissa on Bluetooth BLE-moduuli, jolla voidaan suorittaa konfigurointi helposti ABB:n EPIC-käyttöönottotyökalulla. Sähkökytkennät suoritetaan irrotettavilla liittimillä, joka helpottaa sähkökytkentöjen tekemistä sekä kaapelointia. ABB:n verkkoanalysaattorit eivät tue suoraa PT100 lämpötilamittausta.

#### 3.3.1 ABB M4M 20

M4M 20 on verkkoanalysaattori perustason energian monitorointiin sekä sähkönlaadun analysointiin. Laite mittaa kaikki sähköparametrit sekä sähkön laatua koskevat perussuurteet. (Kuva 17)



*Kuva 17. M4M 20 (ABB, 2021).*

### 3.3.2 ABB M4M 30

M4M 30 on verkkoanalysaattori edistyneempään energia monitorointiin sekä sähkönlaadun analysointiin. Laite mittaa kaikki sähköparametrit kuten jännite, virta, taajuus, teho sekä tehokerroin. Laitteella on kattavat sähkön laatua koskevat ominaisuudet, kuten erillisten yliaaltojen mittaus, THD, epätasapainot, aaltomuodot sekä muita sähkön laatuun liittyvien tapahtumien analysointia. Laitteella on neljä virtatuloa, josta neljäs on nollavirran mittaus. (Kuva 18)



Kuva 18. M4M 30 (ABB, 2021).

### 3.3.3 M4M 2X

M4M 2X on verkkoanalysaattori ilman näyttöä. Laite kommunikoi ainoastaan protokollien välityksellä. Laitetta pystyy konfiguroida ja tarkastella myös Bluetooth-yhteyden välityksellä, ABB:n epic-sovelluksella. Laitteelle voi valita kolme lisäosaa PQ1, PQ2 ja RTS, jotka tuovat laitteelle paremmat ominaisuudet sähkön laadun monitorointiin. PQ1 ja PQ2 lisäosien ero on nollavirran mittaus, joka on lisätty PQ2 osaan. RTS lisäosaan on myös lisätty tariffimittaus, reaaliaikainen kello sekä neljä ohjelmoitavaa tuloa/lähtöä. (Kuva 19)



Kuva 19. M4M 2X (ABB, 2021).

### 3.3.4 M4M-tuotesarjan vertailu

Taulukkovertailu on tehty liitteessä 1. M4M 20-mallilla on 2 digitaalilähtöä ja M4M 30-mallilla on 4 ohjelmoitavaa tuloa/lähtöä, mikä tekee M4M 30 mallista monipuolisemman tulevien valvonta tarpeiden osalta. M4M 2X-mallilla on oletuksena 2 digitaalista lähtöä, ja RTS lisäosalla saadaan 4 ohjelmoitavaa tuloa/lähtöä. Kaikki M4M-tuotesarjan laitteet tukevat Modbus TCP/IP-tietoliikenneprotokollaa.

Kaikilla ABB:n laitteilla on vaadittavat reaaliaika-mittaukset. PT100-lämpötilamittaus puuttuu kaikilta laitteilta. Laitteet M4M 30 sekä M4M 2X ovat saatavilla lähes samoilla ominaisuuksilla paitsi, M4M 2X mallista puuttuu näyttö. Hinnat taulukossa 1 on julkisia hintoja SLO:n sekä Omnical -verkkokaupoista.

ABB:n M4M-sarjasta laitteet M4M 30 sekä M4M 2X soveltuisi parhaiten TESV Oy:n tarpeisiin. Ohjelmoitavat tulot sekä lähdöt ovat hyvin tarpeellisia tuleviin mittauksiin, sekä mahdollisesti lämpötilamittaukseen.

## 3.4 Schneider PM5000-sarja

Schneiderin PM5000-sarja koostuu PM5100-, PM5300-, PM5500-, PM5600- sekä PM5700 -tuotesarjoista. PM5100-tuotesarja jätetään pois tästä vertailusta koska se ei tue haluttua Modbus TCP/IP-protokollaa. Schneiderin laitevertailu tehdään tässä työssä tuotesarja tasolla, jonka jälkeen tehdään tuotekohtaisesti vertailu sopivien laitteiden välillä.

Kaikki laitteet on tarkoitettu sähköenergian monitorointiin sekä sähkönlaadun valvontaan. Laitteet ovat kooltaan 96x96 mm, varustettu graafisilla LCD näytöillä. Laitteet kiinnitetään alustaan uppoasennuksella ja laite soveltuu ulkona sijaitseviin muuntamoihin sen IP52

luokan sekä  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  käyttölämpötilan johdosta. Laitteet suorittavat reaaliaikaisia jännite, virta, teho, taajuus sekä tehokerroin mittauksia. (Kuva 20)



Kuva 20. PM5500 (Schneider Electric, 2021)

Schneider Electricin PM5000-tuotesarjan mittareilla on yleisesti todella kattavat ominaisuudet. Laitteita on kattava määrä pienillä eroavaisuuksilla ja verrataan sen takia eri laitemalleja tuotesarjoista PM5300, PM5500 ja PM5600. Yksittäiseen laitevertailuun valitaan laitteet PM5340, PM5570 sekä PM5650. Kyseiset laitteet tukevat Modbus TCP/IP-tietoliikenneprotokollaa ja laitteissa on vaadittavat reaaliaikamittaukset.

### 3.4.1 PM5340

PM5340 on LCD-näytöllinen monitoimimittari sähkön perussuurteiden sekä sähkön laadun mittauksiin. Laite tukee epäsuoraa virtamittausta virtamuuntajien avulla sekä suoraa jännitemittausta. Laite laskee THD:t sekä yksittäiset harmoniset yliaallot 35: teen saakka.



Laitteella on käytössä kaksi digitaalista sisään- ja ulostuloa. Laitteen markkinahinta SLO:n tukussa on noin 1528 €. (Schneider Electric, 2021). (Kuva 21)



*Kuva 21. Schneider Electric PM5340 (Schneider Electric, 2021).*

### **3.4.2 PM5570**

PM5570 on LCD-näytöllinen monitoimimittari, joka soveltuu sähkön perussuureiden mittaukseen, sähkön laadun seurantaan sekä tariffi mittauksiin. Laite tukee kaikkia reaaliaika- sekä THD-mittauksia. Laite laskee yksittäiset harmoniset yliaallot 63: teen saakka. Laite on varustettu kahdella digitaalisella sisään- ja ulostulolla sekä kahdella analogisella sisääntulolla 4–20 mA, josta laite skaalaa signaalin. Tällä analogisella sisääntulolla pystyttäisiin esimerkiksi suorittamaan lämpötilamittausta virtalähteen sekä PT100-anturin avulla. Laite on ensisijaisesti suunniteltu kohteisiin, jossa tarvitaan tarkkaa tariffimittausta sen ominaisuuksien puolesta. (Schneider Electric, 2021)

### 3.4.3 PM5650

PM5650 on monitoimimittari varustettu LCD näytöllä. Laite soveltuu sähkön perussuureiden mittaukseen, sähkön laadun seurantaan sekä tariffi mittauksiin. Laite havaitsee äkilliset jännitteen nousut ja laskut sekä monitoroi aaltomuotoja. Jännitteen äkilliset nousut ja laskut tallentuvat COMTRADE muodossa. Laite pystyy havaitsemaan yksittäiset aaltomuodot 63: teen saakka. Laite on varustettu neljällä digitaalisella sisääntulolla sekä kahdella digitaalisella ulostulolla. (Schneider Electric, 2021). (Kuva 22)



Kuva 22. Schneider Electric PM5570

### 3.4.4 PM5000-tuotesarjan vertailu

PM5000-sarjan taulukkovertailu on tehty liitteissä sijaitsevaan taulukkoon (Taulukko 2). Kolmen vertailun laitteiden ominaisuuksien puolesta laite PM5570 soveltuisi parhaiten TESV Oy:n tarpeisiin, sen analogi sisääntulon ansiosta, jota voisi esimerkiksi hyödyntää lämpötilamittauksissa. Se token vaatii signaalin käsittelyä jollain taustaohjelmistolla, saadakseen data sopivaan muotoon, jota on siten helppo tulkita.

PM5650 laitteella on toiminto, joka havaitsee äkillisen jännitteen laskun tai nousun sekä toiminto, joka monitoroi aaltomuotoja. Yleisesti kaikilla vertailun laitteilla on ne perustoiminnot, joita vaaditaan.

### 3.5 Metrum

Metrum on ruotsalainen yritys, joka kehittää järjestelmäratkaisuja energia mittauksiin. Metrum valmistaa energiamittareita sekä järjestelmiä sähköverkon eri energiamittaus tarpeisiin. Laitteet on kehitetty mahdollistamaan kattavan analyysin verkon sähköenergian ja sähkönlaadun kokonaistilanteesta helposti. Kaikilla laitteilla on tarkkuusluokka A, IEC 61000-4-30 standardin mukaan. Valmistajalla on kolme tuotesarjaa: Metrum PQ/VQ, Metrum PQR sekä Metrum SC. Metrum PQ/VQ tuotesarja on ensisijaisesti suunniteltu sähköasemille keskijänniteverkon energian ja sähkön laadun monitorointiin. Metrum PQR on laite, joka on suunniteltu kriittisiin kohteisiin, joissa vaaditaan korkeaa mittaustarkkuutta energia sekä sähkönlaadun mittauksiin. Metrum SC laite on erityisesti suunniteltu jakeluverkon energia- ja sähkönlaadun mittausten seurantaan. Metrum käyttää laitteelle nimitystä verkkoanalysointilaite. Tämä laite soveltuisi parhaiten Metrumin laitevalikoimasta TESV Oy:n tarpeisiin, joten tässä työssä otetaan vain tämä laite vertailuun. (Metrum, 2021).

#### 3.5.1 Metrum SC

Metrum SC on verkkoanalysointilaite vianpaikannustoiminnolla. Metrumin laitteet suorittavat analyysin, jonka perusteella se luo raportin tilanteesta verkolla. Tämä toiminto minimoi datan määrää, jota halutaan siirtää tietokantoihin. Laitteen luomat raportit ovat helposti luettavissa ja tulkittavissa helpon värikoodauksen ansiosta. Laitteen vianpaikannustoiminto pystyy havaitsemaan nopeat ja hitaat jännitteen nousut ja laskut. Laite analysoi myös verkon aaltomuotoja ja pystyy havaitsemaan niiden avulla mahdollisia vikatilanteita. Laite pystyy vian sattuessa havaitsemaan sen suunnan, joko "ylävirtaan" tai "alavirtaan", jolla tarkoitetaan vikapaikan suuntaa laitteen sijainnin näkökulmasta. Laitteen vianpaikannustoiminto vaatii kuitenkin keskijänniteverkon mittausdataa, vian paikannuksen toteuttamiseen. Laitteelle pystytään myös konfiguroimaan erilaisia tapahtumia ja hälytyksiä. Laite on myös varustettu yhdellä digitaalisella sisääntulolla ja yhdellä ulostulolla, joita voi esimerkiksi hyödyntää ulkoisiin hälytyksiin tai varoituksiin.

Laitteella on hyvin monipuoliset mahdollisuudet kommunikoinnin toteuttamiseen eri protokollien avulla. Laite tukee mm. IEC 60870-5-101/-104, Modbus TCP/IP sekä Modbus RTU tietoliikenneprotokollia. Laitteen koko on suurempi kuin muut vastaavat laitteet ja se vaatii asennuksen keskuksen sisäseinään. (Metrum, 2021). (Kuva 23)



*Kuva 23. Metrum SC (FR) (Metrum, 2021).*

Metrumilla on oma Metdab-serveri, jonne tuodaan laitteelta dataa. Metrumilla on myös oma PQMS ohjelma, jolla voidaan analysoida sähkön laatuun liittyviä ilmiöitä. PQMS on todella helppokäyttöinen ja selkeä ohjelma, josta voidaan helposti tarkastella kaikkia sähkön laatuun sekä vikatilanteeseen liittyviä ilmiöitä. Metrumin vaatii datan tuomisen heidän omaan Metdab-serverillensä. Metdab-serveille voidaan tehdä SCADA:n integraatio, saadakseen data myös sinne. Dataa ei siis voida tuoda suoraan mittalaitteelta SCADA-järjestelmään.

### 3.6 Laitevertailu ja toteutus

Laitteet ABB M4M 30, ABB M4M 2X sekä Schneider Electric PM5570 soveltuvat parhaiten TESV Oy:n tarpeisiin niiden ominaisuuksien kannalta. Kaikilla näillä laitteilla on samankaltaiset ominaisuudet kuten sähkön perussuureet, THD, yksittäiset harmoniat, epäsymmetria, datantallennustoiminnot sekä tuki Modbus TCP/IP protokolla. (Taulukko 1).

Taulukko 1. Laittevertailu

<b>Laitteiden ominaisuudet</b>	<b>M4M 30</b>	<b>M4M 2X</b>	<b>PM5570</b>
<b>THD</b>	Kyllä	Kyllä	Kyllä
<b>Epäsymmetria</b>	Kyllä	Kyllä	Kyllä
<b>Yksittäiset harmoniat</b>	40th	40th	63th
<b>Datantallennus loki</b>	Kyllä	Kyllä	Kyllä (1,1 MB)
<b>Näyttö</b>	Kyllä	Ei	Kyllä
<b>Digitaaliset I/O</b>	4 ohjelmoitavaa	4 ohjelmoitavaa	2/2
<b>Analogiset I/O</b>	4 ohjelmoitavaa	4 ohjelmoitavaa	2/0
<b>Hinta (alv.0 %)</b>	504,71 €	351,92 € (+RTS)	n.1000 €

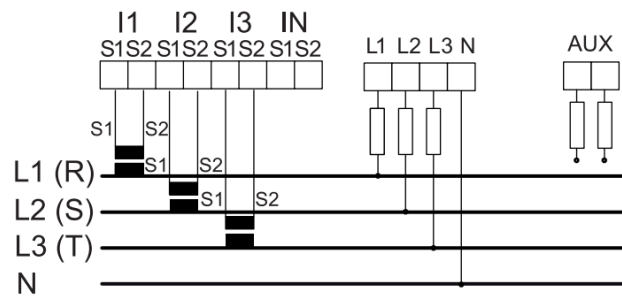
ABB M4M-sarjan laitteet ovat toisia laitteita selkeästi halvempia. M4M 30 laitteella on kosketusnäyttö sekä bluetooth liitäntä, jonka avulla voidaan tarkastella ja konfiguroida parametreja paikan päällä helpommin. Laite voidaan asentaa helposti pienjännitekeskuksen oveen ja hyödyntää olemassa olevia virtamuuntajia ja kaapelointeja. Laitteen ohjelmoitavien tulojen avulla voidaan tulevaisuudessa hyödyntää helposti tarvittaviin hälytyksiin ja mittauksiin, esimerkiksi ovihälytykseen tai analogiseen mittaukseen. Tämän perusteella valitaan ABB M4M 30 verkkoanalysaattori tulevaksi mittalaitteeksi TESV Oy:n uudis- ja saneerauskohteisiin.

### 3.6.1 Toteutusratkaisu

M4M 30-mittalaite asennetaan uudis- ja saneerauskohteisiin. Tiettyihin kohteisiin asennetaan kaukokäyttöjärjestelmä, mikäli tämä on kannattavaa verkon käytön kannalta. Jos uudis- tai saneerauskohteeseen asennetaan kaukokäyttökojeisto niin tällöin asennetaan myös laitteille ala-asema tietoliikennettä varten. Uudet ala-asemat tukevat Modbus TCP/IP ethernet protokollaa jolloin uusi mittalaite kytketään ethernetkaapelilla kiinni ala-asemaan.

Mikäli muuntamoon ei asenneta kaukokäyttöä tarvitaan reititin tietoliikennettä varten. TESV Oy:llä on käytössä Teltonikan 4G/3G/LTE RUT-reititin. Reititin asennetaan jakelumuuntamon pienjännitekeskukseen ja mittalaite kytketään laitteeseen suoraan ethernetkaapelilla. Molempien toteutusratkaisujen perusteella voidaan todeta että tämä ei aseta muita vaatimuksia tietoliikennetarkaisuille kuin Modbus TCP/IP-protokollan tuki.

Virta- sekä jännitemittauksen johtimet kytketään kuvan 24 mukaan laitteeseen.



Kuva 24. ABB M4M 30 mittauksien johdotus (ABB, 2021).

## 4 Tulos

Työn tavoite oli kehittää sähköverkon operatiivista mittausjärjestelmää sekä löytää uusi korvaava mittalaite pienjännitemittauksien toteutukseen. Työn tulos on pohja TESV Oy:n tulevan mittalaitteen valintaan pienjännitemittauksien sekä sähkön laadun seurannan toteutukseen. Työssä saatiin neljä ehdokasta korvaamaan nykyistä mittalaitetta tulevaisuudessa, joista ABB M4M 30 laite valittiin. Markkinakartoituksen avulla saatiin parempi kuva siitä, mitä mittalaitteita markkinoilla on tarjolla sekä mitä ominaisuuksia laitteilla on. Metrum SC laite soveltuisi hyvin ominaisuuksien puolesta TESV Oy:n

muuntamoihin, mutta laitteen kaikkien ominaisuuksien hyödyntäminen vaatii suuremman laite- ja palveluhankinnan. Metrumin laitteella on myös vianpaikannustoiminto joka TESV Oy:llä on jo toteutettu vianilmaisoin laitteilla. Laite joka soveltuu parhaiten TESV Oy:n mittaustarpeisiin on ABB M4M 30 verkkoanalysointilaite. Laite tukee suoraa jännitemittauksia sekä epäsuoraa virtamittauksia virtamuuntajien avulla. Mittalaite laskee pätö-, lois- sekä näennäistehot. Laitteella on myös kattavat sähkönlaadun mittausominaisuudet kuten THD, yksittäisten harmonioiden mittaus sekä jännite-epäsymmetria mittaus. Suora Pt100 lämpötilamittaus sisääntulo oli yksi vaatimus, joka ei toteutunut. Markkinakartoituksessa selvisi, että harvat laitteet on varustettu tällä ominaisuudella. ABB M4M 30 laite on toisia laitteita halvempi ja se täyttää TESV Oy:n mittausvaatimukset. Laitteita hankitaan erä koekäyttöön ja asennetaan muuntamoihin. Laitteen ja SCADA:n väliseen tietoliikenteeseen käytetään Modbus TCP/IP ethernet protokollaa, oli muuntamo kauko-ohjattu tai ei.

Lämpötilamittaus voidaan toteuttaa toisella tavalla esimerkiksi IoT-anturin tai analogisen sisääntulon avulla. On helpompaa toteuttaa IoT-mittauksia edullisten anturien kanssa, kun mittausjärjestelmää kehitetään konsernin omien datavarastojen avulla. Lopuksi voidaan todeta, että on päästy askelen lähemmäksi mittausjärjestelmän kehittämisen toteutuksessa.

## 5 Loppukeskustelu

Tämän työn tavoite oli alun perin myös uuden laitteen asennus sekä datan tuominen uudelta mittalaitteelta SCADA-järjestelmään, mutta tämä osoittautui liian kattavaksi tämän työn suhteen, joten tämä toteutetaan myöhemmin. Haasteita tässä työssä oli löytää sopivat mittalaitteet vertailuun sekä laitteen valinta. Markkinoilla on paljon erilaisia laitteita eri ominaisuuksilla, joka tekee valinnasta haastavan. Tietoliikenne-ratkaisut sekä käyttölämpötila vaatimukset kuitenkin rajasivat laitteiden valintaa markkinakartoitukseen. Oli myös haastavaa päättää mitä ominaisuuksia otetaan mukaan vertailuun koska kaikkien valmistajien ominaisuudet vaihtelevat ja miten he esittävät nämä. Löysin kuitenkin sopivia laitteita vertailuun, jotka soveltuvat TESV Oy:n verkkoon ja tarpeisiin. Muuntajan lämpötilamittaus Pt100-anturin avulla osoittautui olevan harvinainen ominaisuus uusissa laitteissa markkinoilla. Muuntajan lämpötilamittaus on kuitenkin tärkeä mittaus, joka kertoo muuntajan kuormitustilanteesta. Lämpötilamittauksen voi kuitenkin toteuttaa eri

menetelmällä kuin Pt100-anturin avulla, esimerkiksi analogisen sisääntulon kanssa tai IoT-anturin avulla.

Työn aikana selvisi, että monella laitevalmistajalla on omia ohjelmia sähkön laadun seurantaan ja analysointiin. Ohjelmat ovat selkeitä ja helppoja käyttää mikä edesauttaa verkon yleiskuvan havainnointia. Ohjelmat ja palvelut tuottaa toki verkkoyhtiöille kiinteitä kuukausimaksuja. Palvelut sitovat verkkoyhtiöitä turvautumaan yhden valmistajan laitteisiin, joka rajoittaa tulevaisuuden hankintoja ja kehityksiä. Tehokkaan sähkön laadun valvontaan vaaditaan toki tehokkaita ohjelmia analysoinnin toteuttamiseen. Sähkön laadun seuranta voidaan mielestäni luokitella toiseksi aiheeksi ja kehitystavoitteeksi. Sähkön perussuureiden seuranta, joka oli työn tavoitteena ei vaadi sen sijaan älykkäitä ohjelmia sen seurantaan ja analysointiin.



## 6 Lähteet

- ABB. (2021). *M4M-verkkoanalysointilaitteet*. Haettu 1. 12. 2021 osoitteesta <https://new.abb.com/low-voltage/fi/tuotteet/moduulikojeet/energianmittaustuotteet/verkkoanalysointilaitteet/verkkomonimittarit/m4m-verkkoanalysointilaitteet>
- ABB. (2021). *TTT-käsikirja 2000-07, Sähkön laatu*. Haettu 30. 10. 2021 osoitteesta [http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/04\\_0\\_S%84hk%94n%20laatu.pdf](http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/04_0_S%84hk%94n%20laatu.pdf)
- ABB. (2021). *TTT-käsikirja. 2000-07. Sähkönjakoautomaatio*. Haettu 1. 12. 2021 osoitteesta [http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/15\\_S%84hk%94njakeluvkon%20automaatio.pdf](http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/15_S%84hk%94njakeluvkon%20automaatio.pdf)
- Ahoranta, J. (2009). Strömtransformator. Teoksessa *Elteknik* (ss. 305-307). Jyväskylä: Utbildningsstyrelsen.
- Alfen Elkamo. (2021). *Puistomuuntamot*. Haettu 16. 10. 2021 osoitteesta <https://alfenelkamo.fi/fi/puistomuuntamot>
- Elenia. (2021). *Sähköverkon turvallisuus*. Haettu 24. 11. 2021 osoitteesta <https://www.elenia.fi/vastuullisuus/turvallisuus/sahkoverkon-turvallisuus>
- Elovaara, J. & Haarla, L. (2011a). Sähköasemien laitteet. Teoksessa *Sähköverkot II* (ss. 141-160). Helsinki: Otatieto.
- Elovaara, J. & Haarla, L. (2011b). Jännitteen epäsymmetria. Teoksessa *Sähköverkot I* (ss. 442-447). Helsinki: Otatieto.
- Elovaara, J. & Haarla, L. (2011c). Asema-automaatio, kaukokäyttö ja käytön valvonta. Teoksessa *Sähköverkot II* (ss. 385-426). Helsinki: Otatieto.
- Fluke. (2021). *Mitä true-RMS tarkoittaa?* Haettu 28. 10. 2021 osoitteesta <https://www.fluke.com/fi-fi/lue-lisaa/blogi/sahko/mita-true-rms-tarkoittaa>
- Kymenlaakson Sähköverkko. (17. 10. 2018). *Loistehon + kompensointiohje*. Haettu 15. 10. 2021 osoitteesta <https://www.ksoy.fi/sahkoverkko/urakoitsijapalvelu/muut-tekniset-ohjeet>
- Lakervi, E. & Partanen, J. (2008a). Pienjänniteverkko. Teoksessa *Sähkönjakelutekniikka* (ss. 157 - 175). Helsinki: Otatieto.
- Lakervi, E. & Partanen, J. (2008b). Verkon käyttöprosessi. Teoksessa *Sähkönjakelutekniikka* (ss. 231-248). Helsinki: Otatieto.
- Lakervi, E. & Partanen, J. (2008c). Sähkön laadun hallinta. Teoksessa *Sähkönjakelutekniikka* (ss. 248-260). Helsinki: Otatieto.
- Lapp Automaatio Oy. (2021). *Miten toimii Pt100-anturi*. Haettu 16. 10. 2021 osoitteesta <https://www.epicsensors.fi/faq/miten-pt100-anturi-toimii/>
- Metrum. (2021). *Fasta instrument*. Haettu 8. 12. 2021 osoitteesta Instrument: <https://metrum.se/losningar/instrument/>

- Modbus. (2021). *Modbus FAQ*. Haettu 18. 11. 2021 osoitteesta Modbus FAQ: About the protocol: <https://modbus.org/faq.php>
- Nikkinen, J. (2018). *Jakelumuuntamon suunnittelutyö*. Siilinjärvi: Ammattikorkeakoulu Savonia. Haettu 17. 11. 2021 osoitteesta [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/143590/Nikkinen\\_Juha.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/143590/Nikkinen_Juha.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Schneider Electric. (2015). *WIMO 6CP10*. Haettu 28. 10. 2021 osoitteesta <https://m.vamp.fi/products/pow/wimo-6c10/>
- Schneider Electric. (2021). *Electrical network management*. Haettu 28. 11. 2021 osoitteesta [https://www.se.com/th/en/download/document/PLSED309005EN\\_print\\_ToTH/](https://www.se.com/th/en/download/document/PLSED309005EN_print_ToTH/)
- TAMK. (6. 11. 2013). *Talotekniikka*. Haettu 4. 11 2021 osoitteesta TN-järjestelmä: <https://tate.blogs.tamk.fi/sahkoinen-talotekniikka/sahkoverkko/tn-jarjestelma/>
- Turku Energia. (2021). *Ympäristöohjelma*. Haettu 3. 10. 2021 osoitteesta Turku Energian tytär- ja osakkuusyhtiöt: <https://www.turkuenergia.fi/tietoameista/tytar-ja-osakkuusyhtiot/>

## Liite 1. ABB M4M-tuotesarjan vertailu (ABB, 2021)

Laitevertailu	M4M 20	M4M 30	M4M 2X
<b>Reaaliaika mittaukset</b>			
TRMS-virta	•	•	•
TRMS-jännite	•	•	•
Taajuus	•	•	•
Päto-, lois- sekä näennäisteho	•	•	•
Tehokerroin	•	•	•
<b>Energia</b>			
Päto-,lois-sekä näennäisenergia	•	•	•
4-kvadrantti energia (tulo/meno)	•	•	•
Tariffi	-	•	-
<b>Sähkön laatu</b>			
THD	•	•	•
Yksittäiset harmoniat	-	•	+PQ1 ja +PQ2
Epäsymmetria	-	•	+PQ1 ja +PQ2
Nollavirta	Laskettu	Mitattu	Laskettu (+PQ2 mitattu)
Vaihe osoittimet	-	•	-
Aaltomuodot	-	•	-
<b>Datan tallennus ja lokit</b>			
Hälytykset	25	25	25
Varoitukset, virheilmoitukset	•	•	•
Hälytykset logiikalla	-	4	+RTS
Minimi-/maksimitarve	Perus	Edistyksellinen	Perus
Datantallennustoiminnot	-	•	•
Reaaliaikainen kello	-	•	+RTS
Käyttöliittymä (HMI)	Värinäyttö	Värikosketusnäyttö	Ei näyttöä
Graafinen visualisointi	Perus	Edistyksellinen	-
Ilmoitukset	•	•	-
Salasana suojaus	•	•	-
Markkinahinta SLO (alv.0 %):	347,86 €	504,71 €	351,92 €(OMNICAL)

## Liite 2. PM5000-tuotesarjan vertailu (*Schneider Electric, 2021*)

Laittevertailu	PM5300	PM5500	PM5600	PM5700
<b>Reaaliaika mittaukset</b>				
TRMS-virta	•	•	•	•
TRMS-jännite	•	•	•	•
Taajuus	•	•	•	•
Päto-, lois- sekä näennäisteho	•	•	•	•
Tehokerroin	•	•	•	•
<b>Energia</b>				
Päto-,lois- sekä näennäisenergia	•	•	•	•
4 - kvadrantti energia	•	•	•	•
Tariffi	•	•	•	•
<b>Sähkön laatu</b>				
THD	•	•	•	•
Yksittäiset harmoniat	31	63	63	63
Epäsymmetria	•	•	•	•
Nollavirta	Laskettu	Mitattu	Mitattu	Mitattu
Vaihe osoittimet	•	•	•	•
Aaltomuodot	-	•	PM5650	•
<b>Datan tallennus ja lokit</b>				
Hälytykset	35	52	54	56
Varoitukset, virheilmoitukset	•	•	•	•
Hälytykset logiikalla	-	•	•	•
Minimi-/maksimitarve	•	•	•	•
Datantallennustoiminnot	•	•	•	•
Reaaliaikainen kello	•	•	•	•
Käyttöliittymä (HMI)	LCD	LCD	LCD	LCD
Graafinen visualisointi	Yksivärinen	Yksivärinen	Yksivärinen	Yksivärinen
Painikkeet	4	4	4	4
Salasana suojaus	•	•	•	•
Markkinahinta SLO (alv.0 %):	1200–1619 €	2300 €	n. 1000 €	n. 1000 €

### Liite 3. Metrum SC (Metrum, 2021)

Ominaisuudet	Metrum SC
<b>Reaaliaika mittaukset</b>	
TRMS-virta	•
TRMS-jännite	•
Taajuus	•
Päto-, lois- sekä näennäisteho	•
Tehokerroin	•
<b>Energia</b>	
Päto-, lois- sekä näennäisenergia	•
4 - kvadrantti energia	•
Tariffi	-
<b>Sähkön laatu</b>	
THD	•
Yksittäiset harmoniat	50
Epäsymmetria	•
Nollavirta	-
Vaihe osoittimet	-
Aaltomuodot	•
<b>Datan tallennus ja lokit</b>	
Hälytykset	•
Varoitukset, virheilmoitukset	•
Hälytykset logiikalla	•
Minimi-/maksimitarve	•
Datantallennustoiminnot	•
Reaaliaikainen kello	•
Käyttöliittymä (HMI)	Pieni
Graafinen visualisointi	Pieni
Painikkeet	Kyllä
Salasana suojaus	-
Markkinahinta Metrum (alv.0 %):	1223 €

