

Ville Aaltonen

SÄHKÖASEMIEN SENSORIT

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tammikuu 2022

TIIVISTELMÄ

Ville Aaltonen: Sähköasemien sensorit
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaattiohjelma
Tammikuu 2022

Sähköverkon ja sähkönjakelun näkökulmasta tarkasteltaessa voidaan todeta sähköasemien olevan tärkeässä roolissa. Sähköasemat tarjoavat paljon dataa, jota ei ole vielä otettu talteen tai analysoitu. Tämä mahdollistaa sähköasemien perinteisistä mittalaitteista poikkeavien sensorien hyödyntämisen. Sensorien keräämää dataa pystytään hyödyntämään sähköasemien valvonnassa ja hallinnoinnissa. Tässä työssä tullaan tarkastelemaan, millaisille käyttökohteille sensoreita pystytään soveltamaan sähköasemilla ja mitä ominaisuuksia sensoreilla on.

Työ on jaettu kolmeen eri kokonaisuuteen, joiden avulla annetaan kokonaisvaltainen kuva sähköasemalla käytössä olevista sensoreista. Ensimmäisenä osana on kirjallisuuskatsaus, jossa perehdytään sensorien käyttökohteisiin sähköasemalla ja siihen, millaisia suureita komponenteista tai sähköaseman olosuhteista pystytään mittaamaan. Kirjallisuusosiossa tullaan myös käymään läpi hieman sitä, millaisia seikkoja sähköaseman automatisointiin liittyy ja miten sensorien avulla automatisointia pystyttäisiin laajentamaan ja parantamaan. Tärkeänä osana sähköaseman automatisointia on järjestelmien integroituvuus, eli miten sensorit toimivat yhdessä tämänhetkisten niin sanottujen perinteisten sähköaseman automatisointijärjestelmien kanssa.

Kirjallisuusosion jälkeen työssä tarkastellaan sähköyhtiöiden, laitevalmistajien ja automaatio- palveluiden näkemyksiä sensorien käytöstä sähköasemilla. Sähköyhtiöiden näkökulmassa keskitytään yhtiön kokemuksiin, tulevaisuuden näkymiin ja kustannuksiin. Kustannuksista tarkastellaan antureiden alkuinvestoinnin suuruusluokkaa ja käytön aikaisten toimien aiheuttamia kustannuksia. Eri osapuolten mielipiteiden jälkeen katsotaan markkinakatsausta esimerkiksi erilaisista päämuuntajan ennakoivaan kunnossapitoon soveltuvista antureista. Viimeisessä kokonaisuudessa työssä esitellään kaksi pilottihanketta sähköasemien sensoroinneista.

Työn kirjallisuuskatsauksessa keskitytään siis tällä hetkellä käytössä oleviin ja pilottihankkeiden yhteydessä sähköasemille asennettuihin sensoreihin. Kirjallisuus katsauksen ideana on antaa lukijalle ymmärrys sensorien ominaisuuksista, hyödynnettävyydestä ja integroituvuudesta muihin järjestelmiin. Eri osapuolien mielipiteet, markkinakatsaus ja pilottihankkeet selventävät sitä, missä vaiheessa sensorien hyödyntäminen sähköasemilla on tällä hetkellä ja millaisia investointeja sähköaseman sensorointi vaatii verkonhaltijalta.

Avainsanat: Sähköasemien sensorit, jatkuva kunnonvalvonta, ennakoiva kunnossapito, sensorijärjestelmä, IoT-järjestelmä

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ALKUSANAT

Tämä työ käsittelee sähköasemien valvontaan ja hallintaan tarkoitettuihin sensoreihin. Aihe osottautui erittäin mielenkiintoiseksi ja osui hyvin omiin kiinnostuksen kohteisiini. Työn edetessä huomasin, kuinka tärkeäksi kesätöiden kautta saadut suhteet osottautuivat tiedon saamisen kannalta.

Haluaisin kiittää sähköyhtiöiden edustajia, jotka auttoivat minua avokätisesti tarjoamalla runsaasti tietoa työtäni varten.

Tampereella, 9. tammikuuta 2022

Ville Aaltonen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	Johdanto	1
2.	Mittalaitteiston yleiskatsaus	2
2.1	Sensorien käyttökohteita	3
2.1.1	Sensorien rooli sähköaseman automatisoinnissa	4
2.1.2	Sensorien rooli sähköasemien kunnossapidossa	7
2.2	Sensorien ominaisuuksia	10
2.2.1	Sensorien tekniset ominaisuudet	12
2.3	Edut ja mahdolliset haitat	14
3.	Kokemuksia sähköasemien sensoreista.	16
3.1	Sähköyhtiöiden kokemukset	16
3.1.1	Helen Sähköverkko Oy:n kokemuksia	16
3.1.2	Fingridin kokemuksia	17
3.1.3	Kustannukset	18
3.1.4	Sensorien hyödynnettävyys	19
3.2	Laitevalmistajien näkemys	20
3.3	Automaatiopalveluiden tarjonta	21
4.	Markkinakatsaus.	22
4.1	Sensorien saanti markkinoilla	22
4.2	Pilottikokeilut	24
5.	Yhteenveto	25
	Lähteet	26

LYHENTEET JA MERKINNÄT

A/D	engl. Analog-to-digital
DGA	engl. Dissolved Gas Analysis
I/O	engl. Input / Output, tiedon siirrossa käytetty rajapinta
IoT	engl. Internet of Things
IT	Informaatioteknologia
NVM	engl. Non-Volatile Memory
ppm	engl. parts per milloin
SCADA	engl. Supervisory Control and Data Acquisition
SCG	engl. Smart Cable Guard

1. JOHDANTO

Sähköasemat ovat avainasemassa sähkönjakelun näkökulmasta katsottuna. Sähköyhtiöiden kannalta sähköasemilla tapahtuvat häiriöt on hyvä pitää alhaisina ja laitteiston komponenttien kunnan ylläpitäminen on tärkeää. Sähköaseman komponenttien huoltaminen perustuu tällä hetkellä aikaperusteiseen kunnossapitoon, mutta sensorien avulla olisi myös mahdollisuus ennustavan kunnossapidon soveltamiseen. Sähköaseman komponenttien tilan ja olosuhteiden muutokset tarjottavat hyvin paljon dataa, jota pystytäisiin mittaamaan ja ottamaan talteen sensorien avulla. Tämä datan paljous mahdollistaa hyvin paljon eri käyttökohteita sensoreille ja vaatii sensoreilta erilaisia ominaisuuksia, jotta niitä pystytään hyödyntämään halutulla tavalla.

Tämän työn tavoitteena on selvittää millaisia ominaisuuksia sähköasemalla käytettävillä sensoreilla on ja mitä käyttökohteita niillä on. Työssä tarkastellaan myös, miten sensorit vaikuttavat sähköasemien automatisointiin, kunnan- ja kulunvalvontaan sekä kunnossapitoon. Työssä myös tarkastellaan eri tahojen kokemuksia uusista sensoreista ja sekä tehdään markkinakatsausta niistä.

Luvussa 2 käydään ensin läpi sähköaseman mittalaitteistoa yleiskatsauksena, jonka jälkeen tarkastellaan sensorien käyttökohteita, ominaisuuksia, etuja ja mahdollisia haittoja. Luvussa 3 perehdytään sähköyhtiöiden, laitevalmistajien ja automaatiopalveluiden kokemuksiin sensoreista. Sähköyhtiöiden kokemuksissa perehdytään sensorien kustannuksiin ja hyödynnettävyyttä. Luvussa 4 tehdään yleinen markkinakatsaus ja tarkastellaan etenkin sensorien saantia markkinoilla. Tämän lisäksi luvussa 4 käydään läpi pilottikokeiluita. Luvussa 5 tehdään yhteenveto koko työstä.

2. MITTALAITTEISTON YLEISKATSAUS

Tässä luvussa käsitellään sähköasemalla olevia perinteisistä mittalaitteista poikkeavia sensoreita, jotka on tarkoitettu aseman valvontaan ja hallintaan. Tällaiset mittalaitteet ovat yleensä antureita, joiden tarkoituksena on toimia laitteiden tai koneiden aisteina ja kerätä niiltä dataa. Dataa anturit saavat, kun laitteen tilassa tai olosuhteissa tapahtuu muutoksia. Laitteen olosuhteiden muuutokset pystytään havainnoimaan lämpötilan, paikan, paineen, voiman, kiertokulman ja nestepinnan korkeuden muutoksina. Anturit mittaavat edellä mainittujen suureiden muutoksia, jotka muunnetaan yleensä sähköiseksi viestiksi, joka on verrannollinen saatuihin mittaustuloksiin. [1] Anturit eivät pysty yksin muuttamaan saamaansa mittaustietoaan sähköiseksi viestiksi eli digitaaliseksi signaaliksi. Tämän muunnoksen voi suorittaa joko anturin ohjausyksikkö, erillinen A/D-muunnin (analog-to-digital converter) tai I/O-tiedonkeruuyksikkö (Input/Output module). [2]

Antureiden tekniset ominaisuudet vaihtelevat. Tämän takia tulee osata valita käyttökohteen ehtoja vastaava oikeanlainen anturi, jotta se toimii halutuissa olosuhteissa ja käyttö-tarkoituksessa. Kaikilla antureilla on kuitenkin tiettyjä yhteisiä teknisiä ominaisuuksia, joita niiltä odotetaan. Näitä odotettavissa olevia teknisiä ominaisuuksia ovat muun muassa luotettavuus, tarkkuus, herkkyys, reaktionopeus, mittaustaajuus ja ohjauskyky. [1] Edellä mainittujen anturien teknisten ominaisuuksien lisäksi myös anturien elinikää ja sitä, mistä anturi saa tarvitsevansa energian tutkitaan tarkemmin luvussa 2.2.1

2.1 Sensorien käyttökohteita

Tässä luvussa tarkastellaan sensorien soveltamista sähköaseman kunnossapitoon, sekä kulun- ja kunnonvalvontaan. Sensorien hyödyntäminen käyttökohteissa perustuu komponenttien olosuhteiden ja tilojen muutosten mittaamiseen. Kulunvalvonnan käyttökohteissa tarkastellaan, kuinka sensorien hyödyntäminen lisää sähköasemien turvallisuutta. Kunnonvalvonnan ja kunnossapidon käyttökohteita tarkastellessa käydään läpi niiden keskeisimmät ilmiöt, joita sensorien avulla pyritään valvomaan.

Sähköaseman kulunvalvonnassa voidaan käyttää oviantureita, sähköisiä avaimia ja videovalvontaa. Kulunvalvonnalla pyritään rajoittamaan asiattomien henkilöiden pääsyä sähköasemille. Ovianturit lähettävät ilmoituksen valvomoon, kun ovi avataan. Tällä tavalla pystytään valvomaan sähköasemilla käymistä ja saadaan tietoa asemalla olevista asentajista. Sähköasemien oven avaamiseen käytetään sähköistä avainta. Sähköiset avaimet annetaan ainoastaan sellaisille henkilöille, joiden tarvitsee päästä sähköasemalle, kuten esimerkiksi asentajille. Sähköisen avaimen saaja täyttää lomakkeen, jonka avaimen luovuttaja arkistoi. Näin sähköyhtiössä pysytään ajan tasalla, kenellä on pääsy sähköasemalle. Oviantureilla, sähköisillä avaimilla ja videovalvonnalla voidaan siis lisätä aseman turvallisuutta, koska pystytään tarkistamaan, onko asemalla työntekijöitä vikatilanteen sattuessa tai ennen, kuin kytkinlaitteiden tiloille tehdään muutoksia.

Päämuuntaja on yksi sähköaseman pääkomponenteista ja siksi sen toimintakunnon ylläpitäminen ja eliniän pidentäminen on kannattavaa sähköyhtiöille. Päämuuntajissa esiintyvät viat tulisi havaita mahdollisimman nopeasti, mutta yleensä vika tulee ilmi vasta seuraavan tarkastushuollon, suojalaitteiden testauksen tai öljyanalyysin yhteydessä. Päämuuntajan mitattavia suureita ovat lämpötila, kosteus, ääni, valoisuus, Hall-ilmiö, värähtely/liike tai muuntajaöljyn epäpuhtaudet. [1] Päämuuntajan lämpötilan tarkastelussa voidaan mitata muuntajaöljyn tai käämien lämpötilaa. Käämien lämpötilan mittauksessa tarkastellaan käämityksen kuumimman kohdan lämpötilaa eli niin sanottua hot-spot lämpötilaa. Hot-spot lämpötila johtuu muuntajan ylikuormituksesta tai paikallisesta ylikuumenemisesta. Hot-spot lämpötila on rajoittava tekijä muuntajan kuormituksessa ja sillä on myös suuri vaikutus muuntajan elinikään.[3]

Sähköasemalla on muitakin tärkeitä komponentteja, kuten katkaisijat ja erottimet. Näiden komponenttien valvonta on tärkeää kunnossapidon ja aseman yleisen toimivuuden kannalta. Erottimet ja katkaisijat ovat sellaisia komponentteja sähköasemalla, joihin olisi mahdollista hyödyntää IoT-kunnonvalvontaa. IoT-kunnonvalvonnan näkökulmasta näiden komponenttien kriittisimpiä seurattavia ilmiöitä ovat ympäristöolosuhteet, mekaaninen toiminta ja katkaisuväliaineen tila. Edellä mainittujen ilmiöiden mittaamiseen soveltuvia antureita ovat ilma- ja kontaktimikrofonit, sekä virta-, lämpötila- ja ilmankosteusmittarit. [2]

2.1.1 Sensorien rooli sähköaseman automatisoinnissa

Sähköasemien automatisoiminen on askel nykyaikaisempaan ja luotettavampaan sähkönjakeluun. Sähköasemilla on tärkeä saada katkon aikana selville vian syy, sekä missä katkon aiheuttama viallinen komponentti sijaitsee. Sähköasemien automatisointi on monen eri tekijän muodostama kokonaisuus. Tässä luvussa tarkastellaan sähköasemien niin sanottua perinteistä automaatio-järjestelmää, sensorien integroimista olemassa olevaan järjestelmään ja mitä seikkoja järjestelmien integrointiin liittyy.

Sähköaseman automatisointiin kuuluu sähköasemien kaukokäyttö ja paikallisautomaatio. Sähköaseman kaukokäyttö mahdollistaa erilaiset mittaukset johtolähdöistä ja kiskostosta. Tämän lisäksi pystytään ohjaamaan kaukokäytöllä muuntajien käämikytkimiä, erottimia ja katkaisijoita. Paikallisautomaatio puolestaan mahdollistaa sähköaseman paikallisohjauksen, tarkan aikajärjestelmän luomisen ja paikalliset ylläpitotoiminnot. [4] Sensoriteknologian kehittyessä ja verkonhaltijan tarpeiden lisääntyessä syntyy erilaisia kysymyksiä, kuten pystyykö sähköasemien nykyisiä automaatiojärjestelmiä laajentamaan, ovatko ne integroituvia uusien sensorijärjestelmien kanssa vai tarvitsevatko molemmat omat alustansa?

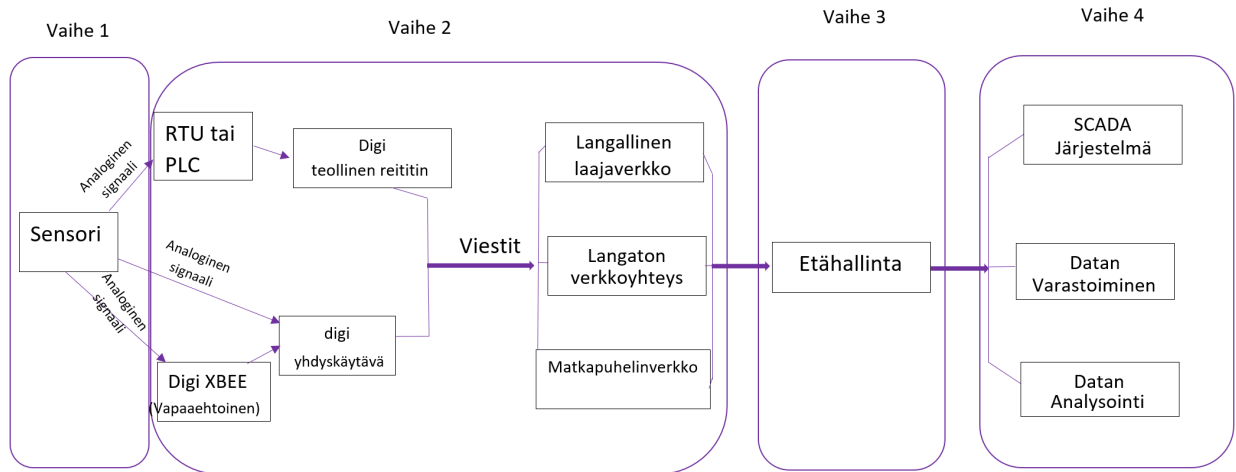
Collinsin ja Saarelaisen teollisen internetin teknologiapinon tasoissa ja IoT-arkkitehtuurissa esitetään, että sensorit ovat tärkeässä roolissa datan keräämisessä ja näin ollen mahdollistavat koko prosessin. [2]



Kuva 2.1. Collinsin ja Saarelaisen esittämä teknologiapino, perustuu lähteeseen [2].

Kuten kuvasta 2.1 huomataan, niin sensorit luovat alustan Collinsin ja Saarelaisen esittämälle teknologiapinolle. Sensorit on asennettu sähköaseman komponentteihin tai niiden lähistöön. Sensorit mahdollistavat siis komponenttien kunnon, ympäristön ja toiminnan

valvonnan. Sensorit lähtevät saadut mittaustulokset sähköisenä viestinä tietoliikenteen avulla eteenpäin tietovarastoihin ja analysoitavaksi. [2] Collinsin ja Saarelaisen teknologiapino auttaa myös ymmärtämään IoT-arkkitehtuuria ja miten data kulkee alimmalta tasolle korkeimmalle. IoT-arkkitehtuuri ohjaa tätä tasojen välistä datan etenemistä sensoreilta digitaaliseen palveluun. Tällä matkalla IoT-arkkitehtuuri ohjaa datan liikettä ja kertoo sille mihin mennä seuraavaksi, miten data pääsee sinne ja minkä tyyppistä datan pitää olla. [5] Seuraavassa kuvassa 2.2 esitellään nelivaiheisen IoT-arkkitehtuurin datan kulkua sensoreilta käyttöön.



Kuva 2.2. Nelivaiheisen IoT-arkkitehtuurin toiminta vaiheittain, perustuu lähteeseen [5].

Kuva 2.2 mallintaa, miten data kulkee IoT-arkkitehtuurin neljän vaiheen läpi. Ensimmäisessä vaiheessa sensorit keräävät dataa mittaamalla olosuhteiden tai tilan muutoksia laitteelta. Toinen vaihe koostuu tiedonhankintajärjestelmistä ja internet-yhdyskäytävistä. Tiedonhankintajärjestelmät keräävät käsittelemättömän datan suoraan sensoreilta ja muuttavat sensorien analogiset signaalit digitaaliseen muotoon. Tämän jälkeen digitaalinen data kootaan ja formatoidaan viestiksi, jonka jälkeen se voidaan lähettää internet-yhdyskäytäviä pitkin seuraavan käsittelyvaiheeseen. Kolmannessa vaiheessa data esikäsitellään reunalaitteessa (engl. edge device). Datan käsittelyä siis jatketaan ja sen määrää vähennetään ennen kuin data lähetetään pilvipalveluun tai datakeskukseen. Esikäsitelyvaiheessa voidaan myös suorittaa paikallista data-analyysiä reunalaitteessa. Neljäs vaihe suoritetaan yleensä yrityksen datakeskuksessa tai pilvipalvelussa. Tässä vaiheessa voidaan ottaa tehokkaat IT-järjestelmät käyttöön, jotta datalle voidaan tehdä tarkempaa analyysiä ja dataa voidaan hallinnoida ja varastoida turvallisesti. Yritykset pystyvät yhdistämään useammalta sensorilta tulevat tietonsa näissä datakeskuksissa tai pilvipalveluissa. Sensoreiden datan yhdistäminen antaa laajemman kokonaiskuvan IoT-järjestelmästä. Tällä tasolla voidaan käyttää toimialakohtaisia ja yrityskohtaisia sovelluksia, jossa tarvitaan datan syvempää analysoimista. [5] Tällaisia toimialakohtaisia sovelluskohteita ovat sähköasemilla IoT-alustan ja IoT-sensoreiden hyödyntäminen jatkuvassa kunnonvalvonnassa ja ennakoivassa kunnossapidossa.

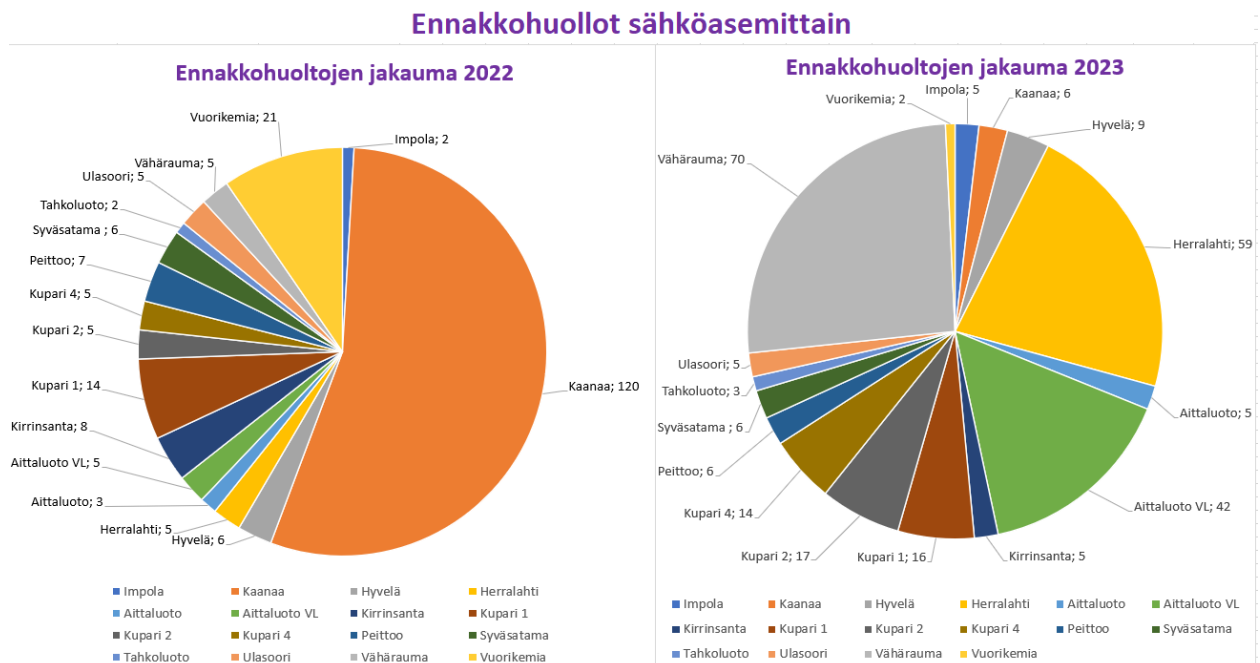
Sähköasemien automaatioinnissa käytetään yleensä SCADA (engl. Supervisory Control and Data Acquisition) järjestelmää. Kuten Collinsin ja Saarelaisen teknologiapinos-
sa huomattiin, että kyberturvallisuus on keskeinen tekijä, kun mietitään esimerkiksi IoT-
sensorien ja -alustan hyödyntämistä sähköaseman automatisoinnissa. SCADA-systeemiin
on liittynyt jo aiemmin kyberturvallisuus onnettomuuksia ja SCADA:n integroiminen IoT-
alustaan lisää tätä altistumisen riskiä haittaohjelmille ja kyberhyökkäyksille. [6]

Esimerkiksi Fingrid on päättänyt pitää IoT-sensoreihin pohjautuvat järjestelmät erillään
automaatiojärjestelmästä. Osatekijänä tähä on se, ettei haluta mahdollisten IoT-järjestelmässä
mahdollisesti esiintyvien ongelmien ja häiriöiden heijastuvan automaatiopuolelle. Tällä
linjauksella pyritään säilyttämään järjestelmien luotettavuus, eikä järjestelmien tietoliiken-
nettä haluta sekoittaa keskenään. [7] SCADA:lle kuitenkin tulee dataa niin sanotuilta pe-
rinteisiltä antureilta. Esimerkiksi Pori Energia Sähköverkot Oy:n käyttämälle Netcon 3000
järjestelmälle tulee ilmoituksia esimerkiksi sähköaseman ulko- ja sisälämpötilasta, pää-
muuntajien käämien ja öljyn lämpötilasta, sähköaseman portin ja kiinteistön oven aukea-
misesta ja öljynerotuskaivon pinnankorkeudesta. Pori Energia Sähköverkot Oy:n käyttö-
päällikön mukaan SCADA:lle tulee jo valmiiksi niin paljon ilmoituksia, että releiltäkin pyri-
tään ottamaan ainoastaan tarpeellinen tieto, ettei vikatilanteen tapahtuessa syyn löytämi-
nen vaikeudu liikaa. [8]

2.1.2 Sensorien rooli sähköasemien kunnossapidossa

Sähkölaitteiston haltijaa vaaditaan ylläpitämään sähkölaitteistonsa kuntoa sillä tasolla, ettei se aiheuta vaaraa kenenkään terveydelle tai omaisuudelle. Sähkölaitteiston kuntoa ylläpidetään säännöllisellä kunnon ja turvallisuuden valvonnalla. Jos laitteistossa huomataan puutteita tai vikoja, tulee ne poistaa mahdollisimman nopeasti. [9]. Edellä mainittujen vaatimusten takia sähkölaitteisto ja tämän työn tapauksessa sähköaseman laitteisto tarvitsee kunnossapitoa. Tässä luvussa tarkastellaan, miten antureita on hyödynnetty sähköasemien kunnossapidossa ja minkälaisia sovelluskohteita ne tarjoavat verkonhaltijalle.

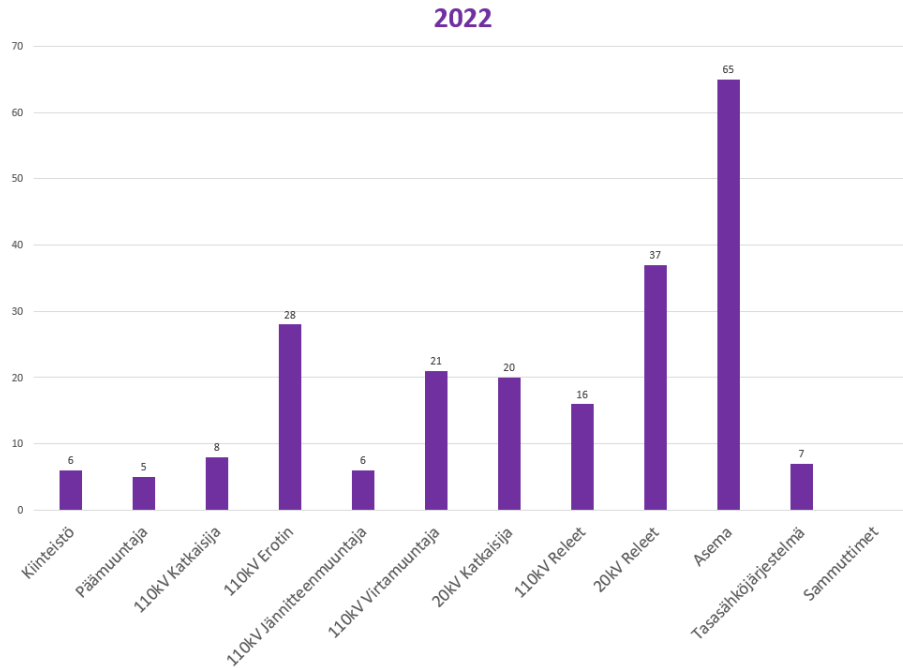
Tämänhetkinen sähköaseman kunnossapito koostuu asemalla tehdyistä kunnossapito-ohjelmaan suunnitelluista tarkastuksista ja käytönvalvonta- ja kameravalvontajärjestelmien avulla tehdystä kunnon ja toiminnan valvomisesta. [10] Tämän lisäksi asemien laitteille tarvitsee tehdä häiriökorjauksia eli vikaantuneen laitteen korjaamista, niin että sen toimintakunto ja turvallisuus on alkuperäisellä tasollaan. Vikaantuneiden laitteiden häiriökorjaukset pystytään jakamaan vielä kahteen alaryhmään eli välittömään ja siirrettyyn häiriökorjaukseen, riippuen laitteen tärkeydestä sähkönjakelun toimivuuden kannalta ja huomioiden kuinka paljon vahinkoa vian korjaamatta jättäminen voi aiheuttaa. [11] Seuraavaksi esitetty kuva 2.3 on graaffinen esitys Pori Energia Sähköverkot Oy:n kunnossapito-ohjelman mukaisista ennakkohuolloista ja miten ne tulevat jakautumaan sähköasemien kesken vuosina 2022 ja 2023.



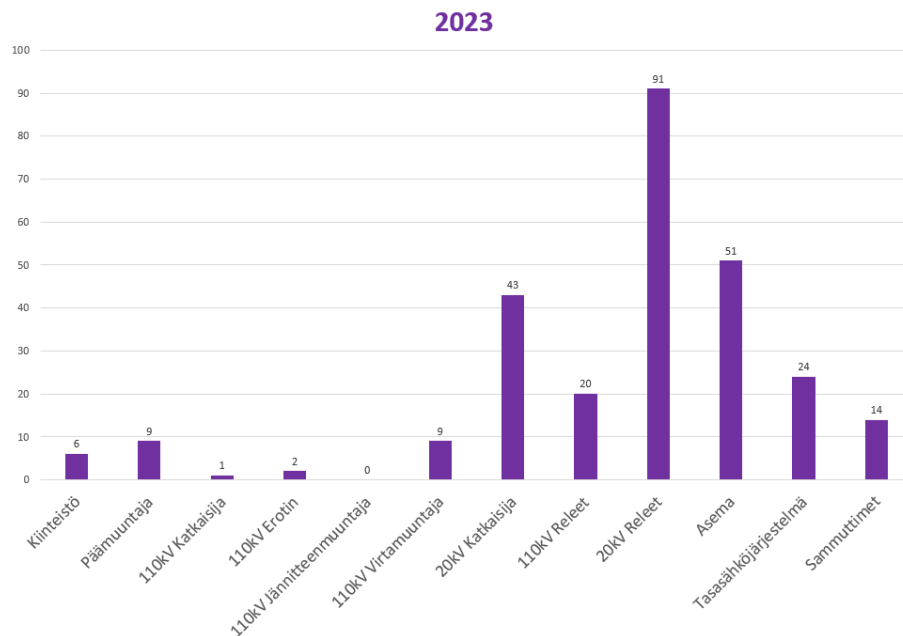
Kuva 2.3. Pori Energia Sähköverkot Oy:n ennakkohuoltojen jakauma asemittain 2022 ja 2023. [12]

Kunnossapito-ohjelmaan kuuluu komponenteille, kiinteistöille, sähköasemille, tasasähköjärjestelmille ja sammuttimille tehtäviä huoltoja, määräaikatarkastuksia ja koestuksia.

Seuraavissa kuvissa 2.4 ja 2.5 nähdään, miten Pori Energia Sähköverkot Oy:n ennakkohuollot jakaantuvat huoltokohteiden välillä vuosina 2022 ja 2023.



Kuva 2.4. Pori Energia Sähköverkot Oy:n ennakkohuoltojen jakauma huoltokohteittain vuonna 2022. [12]



Kuva 2.5. Pori Energia Sähköverkot oy:n ennakkohuoltojen jakauma huoltokohteittain vuonna 2023. [12]

Jos verkonhaltijan näkökulmasta katsottuna nämä häiriökorjaukset ovat suunnitelmattomia ja aiheuttavat yllättäviä kuluja. Järjestelmissä tapahtuvia vikoja pystytään kuitenkin havaitsemaan ennen kuin komponentin käytössä ilmenee ongelmia. Tämä on mahdollista

esimerkiksi päämuuntajien jatkuvalla kunnonvalvonnalla. Päämuuntajan elinikä on keskimäärin 40 vuotta, mutta se voi vaihdella 25-50 vuoden välillä riippuen siitä, miten hyvin sitä huolletaan. Jatkuvan kunnonvalvonnan ja ennakoivan kunnossapidon uskotaan vaikuttavan huomattavasti päämuuntajien eliniän pidentämiseen. Jatkuvassa kunnonvalvonnassa kerätyn tiedon perusteella pystytään reagoimaan esimerkiksi päämuuntajien tilapäisesti korkeaan tai matalaan kuormitukseen. Näiden kunnonvalvonnan tietojen perusteella tehdyissä valinnoissa voi kuitenkin syntyä tulkinallisia virheitä, mutta nämä mahdolliset virheetkin pystytään ennaltaehkäisemään jatkuvan kulunvalvonnan ja ennakoivan kunnossapidon avulla. [13]

Ennakoivan ja jatkuvan kunnossapidon hyödyntäminen sähköasemilla vaatii sähköyhtiöltä resursseja, jotta sensoreiden mittaamasta datasta saadaan käyttökelpoista tietoa. Esimerkiksi IoT-sensoreihin perustuvan järjestelmän soveltaminen kunnonvalvontaan ja ennakoivaan kunnossapitoon vaatii asiantuntijatasoa osaamista. Tämä johtuu muun muassa siitä, että komponenttien vikaantumista ei pystytän mittaamaan suoraan, vaan tarvitaan asiantuntija tulkitsemaan komponentin kuntoon vaikuttavien suureiden muutoksia. Asiantuntija pystyy tulkitsemansa tiedon perusteella tekemään päätöksiä komponenttien hetkisen kuntoon perustuen. [7]

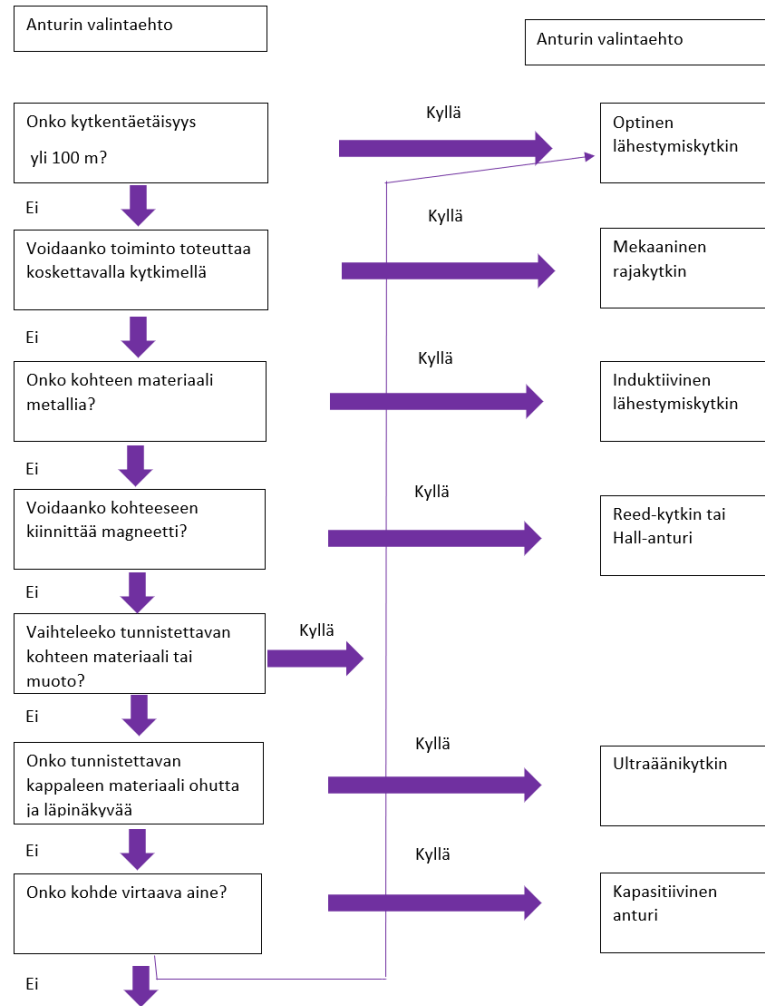
2.2 Sensorien ominaisuuksia

Antureilla eli koneidein aisteilla tarkoitetaan laiteita, jotka mittaavat tilassa tai olosuhteissa tapahtuvia muutoksia laitteen käytön aikana. Sensorien ominaisuuksilla tarkoitetaan sitä miten sensorit mittaavat, millä taajuudella ja mittavälillä. Ominaisuuksiin kuuluu myös mittaustapa eli mittaako sensori suoraan vai epäsuoraan. On myös hyvä ottaa huomioon, onko sensorilla itsellään muistia, eli pystyykö se itse analysoimaan mittaamaansa dataa. Tässä luvussa tarkastellaan anturien rakennetta ja millaisia ominaisuuksia sensoreilta vaaditaan sähköaseman kunnossapidon ja kulunvalvonnan käyttökohteissa. Tarkastelu keskittyy analogisten anturien ominaisuuksiin.

Sensoreita ei käytännössä käytetä yksinään, vaan ne ovat yleensä osina erilaisissa laitteissa, kuten tässä työssä tarkasteltavissa mittalaitteissa. Näillä laitteilla on virtalähde, mikroprosessori, modeemi ja verkkoyhteys eli nämä laitteet muistuttavat pieniä tietokoneita. Tällaiset pieniä tietokoneita muistuttavat laitteet pystyvät tallentamaan sensoriensa mittaamaa dataa ja esikäsittämään sitä. [2]

Mittalaitteeseen valittavilla sensoreilla on oltava käyttökohteeseen soveltuvat ominaisuudet. Sensorien pitää olla luotettavia ja niillä pitää olla tarvittava lujuus ja suojaus. [1] Sähköasemalla käytettävistä mittalaitteista voidaan tarkastella Vaisala Oyj:n kosteus-, vety- ja lämpölähetin MHT410:aa ja katsoa, miten sen valmistuksessa on huomioitu päämuuntajan vaatimukset. Vaisala Oyj:n MHT410 on suunniteltu kestäämään ankaria olosuhteita ulkokäytössä, laajoja lämpötilamuutoksia ja päämuuntajan tärinää. [14] Sensoreilta vaadittavat ominaisuudet eivät liity ainoastaan sensorien olosuhteisiin käyttökohteessa, vaan myös itse suureiden mittaamiseen liittyviin ominaisuuksiin. Tällaisia ominaisuuksia sensoreilla ovat mittatarkkuus, herkkyys, reaktionopeus ja tunnistamisetäisyys. [1] Jatketaan Vaisala Oyj:n MHT410:n ominaisuuksien tarkastelua mittaamisen näkökulmasta. MHT410 mittaa vetypitoisuutta muuntajaöljystä yhden ppm (parts per million) tarkkuudella ja sen tunnistusraja on 15ppm. MHT410:n reaktionopeus riippuu halutun vastauksen laajuudesta. Jos vetypitoisuudesta halutaan täydellinen määritelmä, niin siinä kestää 12 tuntia. Suuntaa antavan vastauksen MHT410 pystyy antamaan kahdessa tunnissa ja sen tarkkuus on 63 % täydellisestä vetypitoisuuden määritelmästä. [14]

Sähköasemilla on eri käyttökohteita, joihin kaikki sensorit eivät sovellu. Sensorien ominaisuuksien pitää täyttää käyttökohteen vaatimukset. Seuraavassa kuvassa 2.6 nähdään anturien valintakaavio, jonka tarkoituksena on auttaa hahmottamaan sensorien valintaprosessia käyttökohteen vaatimuksien perusteella. [1]



Kuva 2.6. Kuva anturien valintakaaviosta, perustuu lähteeseen [1].

Sähköaseman kunnossapidon kannalta tarkastellaan antureita, joita voidaan soveltaa tai käyttää luvussa 2 mainittujen käyttökohteiden suureiden mittaamiseen. Tällaisia antureita ovat lämpötila-, paine- ja värähtelyanturit, sekä öljy- ja kaasunvalvontalaitteet. Esimerkiksi edellä mainittuun lämpötila-anturiin ollaan sovellettu valokuitupohjaista anturia perinteisen kuparipohjaisen analogisen anturin sijaan. Nämä valokuitupohjaiset lämpötila-anturit vaikuttavat olevan ainoa keino saada mitattua hot-spot lämpötila suoraan muuntajan käämeistä. [3]

Analogisen anturin signaali on määritelty kaikilla ajanhetkillä ja voi saada minkä tahansa arvon sille määritetyltä mitta-alueelta. Analogiset anturit voidaan jaotella vielä niin sanottuihin perinteisiin ja älykkäisiin antureihin. Älykkäät anturit ovat laitteita, joissa signaali voi vahvistua, sen impedanssia voidaan muuttaa tai signaalia suodattaa. Älykkäiden anturien etuna on, että anturiin voidaan syöttää ja siitä pystytään myös lähettämään digitaalista tietoa. [1] Tämän älykkäiden anturien etu vastaanottaa ja lähettää digitaalista tietoa mahdollistaa erillinen A/D-muunnin, ohjaus- tai I/O-tiedonkeruuyksikkö. Sensorit voidaan vielä lajitella passiivisiin ja aktiivisiin sensoreihin niiden luonteen mukaan. Passiiviset sen-

sorit toimivat ainoastaan informaation vastaanottajina, kun taas aktiiviset sensorit voivat välittää energiaa ympäristöönsä ja odottaa vastetta.[2]

2.2.1 Sensorien tekniset ominaisuudet

Tässä luvussa tarkastellaan kunnonvalvontaan ja kunnossapitoon solvetuvia sensoreita, jotka ovat saatavilla markkinoilla. Luvussa käydään ensin läpi lyhyesti Helen Sähköverkko Oy:n kaasuanalysointilaitteiden toimintaa ja miltä valmistajilta niitä ollaan hankittu. Tämän jälkeen tarkastellaan Kelmanin ja Vaisala Oyj:n DGA (engl. Dissolved Gas Analysis) kaasuanalysointilaitteiden teknisiä ominaisuuksia.

Jotta pystytään vertailemaan samaan käyttökohteeseen soveltuvia sensoreita, niin on tiedettävä, mille käyttökohteille sensoreita on tarkoitus käyttää ja kenen valmistajan sensoreita ollaan käyttämässä. Helen Sähköverkko Oy:lla on käytössä 110kV päämuuntajien ja loistehon kompensointireaktoreiden vikakaasujen ja kosteuden tarkkailuun tarkoitettuja kaasuanalysointilaitteita. Helen Sähköverkko Oy on hankkinut sensoreitaan eri valmistajiltaan, kuten Hydrocalilta, Hydranilta ja Kelmanilta. Kaasuanalysointilaitteiden mittaustiedot tulevat muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta virtaviesteillä käytönvalvontajärjestelmään. [15]

Tutkitaan seuraavaksi tarkemmin Kelmanin valmistamaa DGA- ja kosteussensoria ja sen teknisiä ominaisuuksia. Kelmanin Transfix mahdollistaa päämuuntajan öljyn kattavan kaasuanalyysin ja kosteuden mittaamisen. Kaasuanalysointilaitteisto pystyy tunnistamaan ja mittaamaan jopa yhdenkään eri kaasua muuntajaöljystä. Nämä mitattavat kaasut ovat vety, hiilimonoksidi, hiilidioksidi, metaani, asetyyli, etaani, eteeni, happi, typpi ja vesi eli muuntajaöljyn kosteus. Taulukossa 2.1 esitetään edellä mainittujen kaasujen mittaussväli ja mittausvirhe. [16]

Kaasu	Mittausväli	Tarkkuus
Vety (H ₂)	5-5 000 ppm	±5%
Hiilimonoksidi (CO)	2-50 000 ppm	±5%
Hiilidioksidi (CO ₂)	20-50 000 ppm	±5%
Metaani (CH ₄)	2-50 000 ppm	±5%
Asetyleeni (C ₂ H ₂)	0.5-50 000 ppm	±5%
Etaani (C ₂ H ₆)	2-50 000 ppm	±5%
Eteeni (C ₂ H ₄)	2-50 000 ppm	±5%
Happi (O ₂)	100-50 000 ppm	±10%
Typpi (N ₂)	10 000-100 000 ppm	±15%
Kosteus (H ₂ O)	0-100 %	

Taulukko 2.1. *Kelman Transfix Full on-line DGA & moisture kaasuanalysointilaitteen tekniset ominaisuudet taulukoituna, perustuu lähteeseen [16]*

Taulukon 2.1 mittausvirheet on määritelty anturien kalibrointimittausten aikana. Transfix pystyy ottamaan kaikkien yhdeksän kaasun kaasuanalyysin tunnin välein. Transfixissä on täysin sulatettu prosessori ja sen sisäiseen muistiin mahtuu 10 000 tietuetta eli se pystyy tallentamaan oletusnäytteenottotaajuudella mittaustuloksia kahdeksan vuoden ajan ja sen käyttämä NVM (engl. Non-Volatile Memory) estää tiedon katoamisen. Transfixin virtalähteenä voidaan käyttää vaihtovirtaa tai muuntajan avulla muunnettua tasavirtaa. Virtalähde vaikuttaa Transfixin käyttölämpötilaan. Vaihtovirtaa käytettäessä käyttölämpötila saa olla -40°C - +55°C ja muuntajan avulla tasavirtaa käytettäessä -18°C - +55°C. [16]

Vaisala Oyj on myös valmistanut monikaasuanalysointilaitteen, jota voidaan soveltaa päämuuntajien kattavaan kunnonvalvontaan analysoimalla muuntajaöljyä. Tällä kyseisellä Vaisala Oyj:n OPT100 Optimus-DGA-analysointilaitteella pystytään mittaamaan päämuuntajan öljystä vedyn, hiilimonoksidin, hiilidioksidin, metaanin, asetyylin, etaanin, eteenin ja veden eli kosteuden pitoisuuksia. Taulukossa 2.2 on esitetty OPT100 kaasuanalysointilaitteelle edellä mainittujen kaasujen mittausalueet ja mittausvirheen. [17]

Kaasu	Mittausväli	Tarkkuus
Vety (H ₂)	5-5 000 ppm	±10%
Hiilimonoksidi (CO)	0-10 000 ppm	±5%
Hiilidioksidi (CO ₂)	0-10 000 ppm	±5%
Metaani (CH ₄)	0-10 000 ppm	±5%
Asetyleeni (C ₂ H ₂)	0-5 000 ppm	±5%
Etaani (C ₂ H ₆)	0-10 000 ppm	±5%
Eteeni (C ₂ H ₄)	0-10 000 ppm	±5%
Kosteus (H ₂ O)	0-100 ppm	±10%

Taulukko 2.2. Vaisala Oyj:n monikaasuanalysointilaitteiden OPT100:n tekniset ominaisuudet taulukoituna, perustuu lähteeseen [17]

Taulukon 2.2 tarkkuudet on määritelty anturien kalibrointimittausten aikana. OPT100 analysointilaitteen yhden mittausjakson kesto vaihtelee 60 minuutin ja 90 minuutin välillä ja vasteaika on yhden mittausjakson pituinen. OPT100 tarvitsee kahden mittausjakson pituisen lämpenemisajan ennen kuin ensimmäiset mittauks tulokset ovat saatavilla, mutta kokonaisvaltaisessa tarkassa tuloksessa kestään noin kaksi päivää. OPT100 pystyy varastoimaan mittauks tuloksia vähintään kymmeneltä vuodelta ja sen eliniän odotetaan olevan yli 15 vuotta. OPT100:n virtalähteenä toimii 100V - 240V vaihtovirta, jonka tajuus voi vaihdella 50Hz-60Hz ±10%. Virtalähteen korkein käyttövirta on 10A ja tehon kulutus saa olla korkeintaan 500W. OPT100:n normaali tehon kulutus on 100W +25°C lämpötilassa. [17]

2.3 Edut ja mahdolliset haitat

Tässä luvussa tarkastellaan sensorien etuja ja mahdollisia haittoja kunnon- ja kulunvalvonnan, kunnossapidon ja automaation näkökulmista.

Kunnossapidon ja kulunvalvonnan kannalta sensorit tuovat paljon etuja ja mahdollisuuksia uusille sovelluskohteille, mutta myös pieniä haittojakin löytyy. Eduksi voidaan katsoa, että sensorit mahdollistavat jatkuvan kunnonvalvonnan sähköaseman kriittisimmille komponenteille, kuten päämuuntajille. Jatkuvan kunnonvalvonnan avulla pysytään ajan tasalla esimerkiksi päämuuntajien kunnosta, eikä sitä tarvitse arvioida yhden tai kahden vuoden takaisista mittauks tuloksista, jotka eivät kerro mitään tämän hetkisestä komponentin kunnosta. Jatkuvan kunnonvalvonnan avulla sähköyhtiöt pystyvät tekemään kuntotietoihin perustuvia päätöksiä, kuten ennustavaa kunnossapitoa, jonka avulla pystytään pidentämään laitteiden elinikää. Se myös auttaa karsimaan komponenttien turhat kunnossapito-toimet pois. Kuntotietojen avulla sähköyhtiö pystyy myös ajoittamaan paremmin laitteiden uusimisen, jolloin vanhaa toimintakunnossa olevaa komponenttia ei vaihdeta turhaan vielä uuteen. [7]

Komponenttien kunnonvalvontaan liittyen haittana voidaan pitää joidenkin sensorien vaihtelevaa elinikää. Esimerkiksi Helen Sähköverkko Oy:n kaasuanalysaattoreista kuusi on jouduttu ottamaan pois käytöstä vikojen takia ja käyttöön jäi enään 17 toimivaa kaasuanalysaattoria. Kokemusten perusteella kaasuanalysaattorien eliniän ei uskota ylittävän kymmentä vuotta. [15]

Sensorien etuna on soveltuminen useisiin erillaisiin käyttökohteisiin. Esimerkkinä tästä on Fingridin digitaalinen kunnonhallinta hanke, jossa he ovat hyödyntäneet sensoreita eri sensorijärjestelmissään, joihin palataan vielä tarkemmin luvussa 3.1.2. Tällaiset suuremmat hankkeet ovat mahdollisia ja kannattavia vain, jos sensorien hinta on alhainen. Tällä hetkellä markkinoilla olevat kaupalliset sensorit eivät vastaa ominaisuuksiltaan vaatimuksia ja ovat edelleen kustannuksiltaan liian korkeita, jotta niiden asentaminen sähköasemille laajemmin olisi kannattavaa. [7]

Vikatilanteissa on tärkeä saada selville, missä vika sijaitsee ja löytää vian aiheutumiselle syy. Automaatiossa SCADA:lla tulee muutenkin niin paljon dataa, että vikatilanteessa liika data saattaa myös vaikeuttaa vian löytämistä. Tämän takia SCADA:lle ei oteta kaikkea mahdollista dataa releiltä, vaan SCADA:lle tulevaa dataa ollaan rajattu niin, ettei ylimääräistä dataa ole vaikeuttamassa prosessia. [8]

3. KOKEMUKSIA SÄHKÖASEMIEN SENSOREISTA

Tässä luvussa tarkastellaan Pori Energia Sähköverkot Oy:n, Helen Oy:n ja Fingridin kokemuksia sähköasemilla olevista sensoreista. Sähkøyhtiöiden kokemuksissa tarkastellaan millaisia sensorijärjestelmiä yhtiöt ovat ottaneet käyttöönsä, millaisia kustannuksia sensorien käytöstä on syntynyt ja miten sensoreita ollaan pystytty hyödyntämään. Toisena näkökulmana tarkastellaan, millainen näkemys laitevalmistajilla on sensorien hyödyntämisestä sähköasemilla. Lopuksi tarkastellaan, onko automaatiopalveluissa hyödynnetty sensoreita, ja jos on, niin minkälaisia sensoreita ja mihin käyttötarkoitukseen.

3.1 Sähkøyhtiöiden kokemukset

Sähkøyhtiöiden kokemuksia sensoreista tarkastellaan Pori Energia Sähköverkot Oy:n, Helen Sähköverkko Oy:n ja Fingridin näkökulmasta. Tarkastelu aloitetaan käymällä läpi, kenen valmistajan sensoreita ollaan käytetty ja mihin käyttökohteisiin sensoreita ollaan hyödynnetty.

3.1.1 Helen Sähköverkko Oy:n kokemuksia

Helen Sähköverkko Oy:ltä löytyy kokemuksta 110kV päämuuntajiin ja kompensointireaktoreihin asennetuista kaasuanalysaattoreista, jotka on tarkoitettu vikakaasujen ja kosteuden tarkkailuun. Kokemuksia löytyy myös 110kV GIS-kojeiston SF6-kaasun paineen valvontaan tarkoitettuista hydriditiheysvahdeista, keskijännitepuolen SCG:stä (engl. Smart Cable Guard) ja 110kV:n kaapeleissa käytetystä Pry-Cam Grids järjestelmästä. [15]

Helen Sähköverkko Oy:llä on kokemuksta useamman valmistajan, kuten Hydrocalin, Hydran ja Kelman kaasuanalysaattoreista. Toiminnassa olevia kaasuanalysaattoreita on tällä hetkellä 17 ja vikojen takia käytöstä pois otettuja kuusi kappaletta. Keskijännitepuolella käytössä olevassa DNV:n SCG:ssä on 11 anturiparia eli sillä pystytään monitoroimaan 11:sta keskijännitelähtöä. [15]

Pisin keskijännitelähtö, joka olla Helen Sähköverkko Oy:llä onnistuttu mittaamaan SCG:llä on ollut noin kuusi kilometriä pitkä. Järjestelmässä on myös online osittaispurkausmittaus, joka mahdollistaa mittaamisen kaapelin sähköaseman päätteeltä verkolle päin, aina toiseksi viimeiseen muuntamoon enne jakorajaa. Järjestelmä mittaa osittaispurkausten

etäisyyden, myös niin sanotusti muuntajien läpi. DNV analysoi mittaamia tuloksia ja myös järjestelmän tilaaja pystyy tarkkailemaan tuloksia nettiliittymän kautta. Järjestelmän anturit eivät ole kiinteitä, joka mahdollistaa niiden kierrättämisen verkolla. [15]

Helen Sähköverkko Oy:n 110kV kaapeleissa on käytössä Pry-Cam Grids järjestelmä, mutta se on otettu käyttöön vain yhdellä 2x1600Cu siirtoyhteydellä. Tämä järjestelmä mittaa reaaliaikaisesti kaapelin lämpötilaa, se laskee myös maksimikuormitettavuutta ja lisäksi järjestelmään kuuluu vielä osittaispurkausmittaaminen. Lämpötilamittauksessa järjestelmä paikantaa hot-spotin ja esittää sen lämpötila etäisyyden funktiona näkymässä. Kaapelin molempiin päihin asennetaan anturit ja myös kaksi anturia asennetaan kaapelin päiden väliin. Järjestelmän osittaispurkausmittauksen anturit saavat tehonsa kaapeliyhdyden kuormitusvirran aiheuttamasta magneettikentästä. Kyseinen kaapeliyhteys, jossa järjestelmää käytetään toimii pienellä kuormalla, joka on saatu verkon poikkeusjärjestelyillä noin 50%:iin nimelliskuormitettavuudesta. Tästä syystä järjestelmän lämpötilavalvonta ei ole päässyt näyttämään täyttä potentiaaliaan vielä käytössä. Osittaispurkausmittauksissa on samaa ongelmaa kuin lämpötilavalvonnassa, eli vaadittaisiin suurempi kuormitusvirta, jotta laitteisto toimisi halutulla tavalla. [15]

Helen Sähköverkko Oy:llä on ollut vuosien varrella haasteita kaasuanalysointilaitteiden kanssa. Osa asennetuista kaasuanalysointilaitteista on vikaantunut jo muutaman vuoden ikäisenä ja on tämän takia vaatinut huoltamista. Tämän hetkisen kokemuksen perusteella kaasuanalysointilaitteiden elinikä ei useasti ainakaan ylitä kymmentä vuotta ilman huoltotoimenpiteitä. Vaihtelu kaasuanalysointilaitteiden iässä ei ole osoittanut kannattavuutta niiden asentamiselle jokaisen sähköaseman päämuuntajiin. Vanhemmille laitteille asennetut vikaantuneet kaasuanalysointilaitteet on todettu järkevämmäksi ottaa pois käytöstä kuin huoltaa. SF6-kaasun tiheydenvalvontalaitteistossa ei ole toistaiseksi esiintynyt ongelmia ja ne ovat toimineet luotettavasti. [15]

3.1.2 Fingridin kokemuksia

Tässä luvussa tarkastellaan, miten syntyi tarve sensorien käyttöön sähköasemilla, millaisia järjestelmiä Fingridillä on käytössä ja mitä tavoitteita sensorisovelluksilla on. Kokemukset koostuvat Fingridin IoT-asiantuntijan haastattelusta. Fingridin kokemukset keskittyvät IoT-sensoreihin, joita sovelletaan digitaaliseen kunnossapitoon. IoT-sensoreilla varustettuja sähköasemia löytyy tällä hetkellä noin kymmenen ympäri Suomea, mutta tulevaisuudessa sensorointi tulee lisääntymään. Nämä sähköasemille asennetut sensorit ovat vasta noin kolme vuotta vanhoja, eli IoT-sensorit ovat varsin uusi innovaatio sähköasemilla. Fingrid tavoittelee sensoroinnillaan kunnonhallinnan optimointia ja priorisointia, mahdollisuutta tehdä kuntotietoihin perustuvia päätöksiä, omaisuuden elinkaaren pidentäminen sekä turvallisuuden lisäämistä. [7]

Tarve sähköasemien sensoroinnille syntyi, kun huomattiin laitekannan vaihtuessa, että

osa laitteistosta on uusia ja osa iäkkäämpiä. Laitekannan näkymä kunnon kannalta oli heikko, sillä sähköasemien laitteiden kuntotieto perustui pääosin aikaperusteisiin mittauksiin, jotka eivät usein vastanneet laitteiden todellista kuntoa. Tämän laitekannan uusiutumisen ja digitaalisaation lisääntymisen takia tarvittiin uusi kunnonhallintamalli, jonka takia Fingrid on ottanut käyttöönsä tarveperusteisen kunnonhallintamallin aikaisemman aikaperusteisen mallin tilalle. Tarveperusteinen kunnonhallinta on mahdollista digitaalisen kunnonvalvonnan avulla. IoT-sensorien keräämällä kuntotiedolla pystytään ajoittamaan laitteiden uusiminen ja kohdistamaan kunnossapitotyöt huoltoon tarvitseville komponenteille. Fingrid on hyödyntänyt sensoreitaan kytkinlaitteiden valvontajärjestelmässä, osittaispurkausvalvonnassa, talotekniikanvalvonnassa, primääripiirin valvonnassa ja lämpökameroissa. [7]

IoT-sensorien tiedot kuljetetaan sensoreilta pilvipalveluun, johon tieto tallennetaan, käsitellään ja analysoidaan. Sensoreilta tulleesta datasta etsitään poikkeamia, jotka voivat viitata laitteen vikaantumiseen. Data-alustaan eli tässä tapauksessa pilvipalveluun tuotua dataa hyödynnetään loppukäyttäjätökalussa, jonka tarkoituksena on tehdä hälytyksiä poikkeavasta datasta, käsitellä sensorien mittaamia tuloksia ja visualisoida kerättyä dataa. Asiantuntijat pystyvät hyödyntämään käsiteltyjä tuloksia ja datan visualisointia päätöksen teossaan. Esimerkiksi tulevaisuudessa kytkinlaitteiden valvontajärjestelmän visualisoidusta datasta asiantuntija pystyy tunnistamaan mahdolliset valokaaret ja niiden keston. [7]

3.1.3 Kustannukset

Tässä luvussa tarkastellaan luvussa 3 esiteltyjä sensoreita ja keskitytään niiden kustannuksiin. Kustannuksia tarkasteltaessa keskitytään enemmän käytön aikana tuleviin kustannuksiin. Sensorien käytön aikana kustannuksia voi syntyä sensorien vikaantuessa. Vikaantunut sensori yleensä korvataan uudella, mutta joillekin tehdään myös huoltoja.

Pori Energia Sähköverkot Oy käyttää kulunvalvonnassaan oviantureina rajakytkimiä ja älyavaimia. Rajakytkimiä ei tarvitse oikeastaan huoltaa ja niiden elinikä on yhtä pitkä kuin itse sähköaseman. Näille rajakytkimille ei tehdä huoltoja, joten ne eivät aiheuta käytön aikana kuluja sähköyhtiölle. Kulunvalvonnassa käytettävät älyavaimet tarvitsevat päivityksiä, paristojen vaihtoja ja niille tulee satunnaisesti myös mekaanisia vikoja. Pori Energia Sähköverkot Oy:n käyttämät älyavaimet maksavat noin 200 euroa avainta kohden. Älyavaimet vaativat paristojen vaihdon viiden vuoden välein. Paristojen vaihto maksaa noin 20 euroa avainta kohden. Älyavaimet vaativat myös FirmWare päivityksen 1-3 kertaa vuodessa. FirmWare päivitykset eivät kestä kovin kauaa ja näistä päivityksistä syntyvät kulut määräytyvät niiden asentajan tuntipalkan mukaan. 50 älyavaimen FirmWare päivityksissä kestää noin kaksi tuntia, joten päivityksistä syntyvät vuotuiset kustannukset eivät ole kovinkaan suuret. Jos älyavaimen tulee mekaanisia vaurioita eli esimerkiksi jos se taittuu

tai katkeaa, niin älyavainta ei huolleta, vaan vioittuneen älyavaimen tilalle ostetaan uusi. Vioittuneen älyavaimen korvaaminen uudella maksaa myös 200 euroa sähköyhtiölle. [18]

Helen Sähköverkko Oy:n luvussa 3.1.1 esiteltujen DNV:n SCG:n ja Pry-Cam Grids järjestelmien kustannukset koostuvat investointikustannuksista ja vuotuisesta ylläpidosta. Samassa luvussa mainittujen SF6-kaasun hybridivahtien kustannukset koostuvat alkuinvestoinnista, sillä nämä laitteet eivät ole tarvinneet vielä kunnossapitoa. Päämuuntajien ja kompensointireaktoreiden kaasuanalysaattorien kustannukset riippuvat laitteen asennuksen ajoituksesta. Kaasuanalysaattoreita ollaan sisällytetty uusien päämuuntajien hankintaan sähköasemaprojektissa ja myös jälkiasennuksena. Jälkiasennettuna kaasuanalysaattorien asennus- ja hankintakustannukset ovat helposti kaksinkertaiset verrattuna sähköasemaprojektin mukana hankittuihin kaasuanalysaattoreihin. Jälkiasennettuna tehtyjen hankintojen kustannukset riippuvat tarvittavan kaapeloinnin määrästä ja pituudesta, kuin myös kohteena olevasta laitteesta. Jälkiasennusten kokonaiskustannukset ovat edullisimmillaan noin 10 000 euron luokkaa. Kaasuanalysaattorien kustannukset ovat myös riippuvaisia sen käyttäjasta. Jos kaasuanalysaattorin halutaan kestävän päämuuntajan koko eliniän, niin se pitää uusia muutaman kerran, joka aiheuttaa tarvikekustannuksia noin 10 vuoden välein. [15]

Fingridin IoT-järjestelmät ovat varsin uusia ja ensimmäiset järjestelmät ovat vasta noin kolme vuotta vanhoja, eikä niitä ole vielä tarvinnut huoltaa. Ainoat kustannukset käytön aikana syntyvät, jos jo valmiiksi asennettuja yksittäisiä sensoreita halutaan päivitetään kehittyneempään versioon. Eli alkuinvestoinnin lisäksi ainoat kustannukset syntyvät järjestelmän kehittämisestä. [7]

3.1.4 Sensorien hyödynnettävyys

Tässä luvussa tarkastellaan luvun 3 sensoreita niiden hyödynnettävyyden kannalta. Fingrid ja Helen Sähköverkko Oy soveltavat sensoreita kunnonvalvonnassa, mutta Pori Energia Sähköverkot Oy ei ole vielä ottanut sensoreita käyttöönsä.

Helen Sähköverkko Oy asensi ensimmäiset kaasuanalysaattorinsa noin 20 vuotta sitten päämuuntajille. Näiden 20 vuoden aikana ei ole esiintynyt alkavia päämuuntajavikoja, jotka oltaisiin saatu havaittua analysaattorien avulla. Kaasuanalysaattorien mittaustiedoilla ja hälytysmahdollisuudella ollaan, kuitenkin pystytty korvaamaan päämuuntajille tehtävät kaasuanalyysit, jotka suoritetaan kolme kertaa vuodessa. Näiden kolme kertaa vuodessa tehtävien kaasuanalyysien korvaaminen on säästänyt kustannuksissa, mutta nämä säästetyt kulut menevät kaasuanalysaattorin kokonaiskustannuksiin eli siinä suhteessa kustannuksissa tehdyt säästöt jäävät nolville. SF6-kaasun mittaussensorien avulla ollaan saatu selville kaasutilan vuoto jo ennen kuin siitä on tullut kosketinhälytys perinteisellä tiheysvahdilla. DNV järjestelmällä on potentiaalia selvittää kuorman vaikutus kaapeliyhdyden kuntotilaan, mutta Helen Sähköverkko Oy:llä järjestelmä on vielä käytössä pienel-

lä kuormituksella, kuten luvussa 3.1.1 todettiin. Pry-Camilla on potentiaalia lämpötilavalvonnassa, jota pystytään hyödyntämään kaapeliyhteyden todellisesta hetkellisestä kuormitettavuudesta. Pry-Camin antama kaapeliyhteyden hetkellinen kuormitus voi kuitenkin poiketa suuntaan tai toiseen laskennallisesti. [15]

Fingridillä on tavoitteena saada kaikille sähköasemille skaalautuva digitaalinen kunnonhallinta eli tavoitteena on hyödyntää IoT-valvontaa 116:lle sähköasemalle. Fingridi ei tavoittele järjestelmillään taloudellista voittoa, vaan pyrkii parantamaan verkon luotettavuutta, turvallisuutta ja kustannustehokkuutta lisäämällä IoT-valvottujen sähköasemien määrää. Fingrid kokee tämän kehityssuunnan kannattavaksi kustannuksista huolimatta, sillä yhdenkin virtamuuntajan räjähtämisen estäminen on niin suuri etu, että se tekee IoT-valvonnasta kannattavan. [7]

3.2 Laitevalmistajien näkemys

Tässä luvussa tarkastellaan Schneider Electricin näkemyksiä sähköasemien uusista ominaisuudenhallinnan ratkaisuista ja Vaisalan kosteus-, vety- ja lämpölähettimeen MHT410 liittyviä kokemuksia.

Schneider Electricin Thomas Rudolph ottaa kantaa sähköasemien sensoroinnista ja niiden tulevaisuudesta. Hänen mukaansa sähköasemien käyttötekniikka kehittyy, mutta hitaalla tahdilla. Kehittymisen myötä sähköasemillakin pyritään vastaamaan yhä monimutkaisempiin haasteisiin. Näiden haasteiden ratkaiseminen johdattaa sähköasemia entistä hiilivapaampaan, digitalisoituneempaan ja hajautettuun sähkönjakelujärjestelmään. Tämän saavuttamiseen tarvitaan kasvavassa määrin uuden digitaalisen sähkönjakutekniikan soveltamista automaatiojärjestelmiin, kytkinlaitteisiin, muuntajiin, suojaroleisiin ja kaukokäyttöön. [19]

Rudolphin mukaan sähköyhtiöiden ja muiden verkonhaltijoiden tulisi ottaa huomioon sähköverkon yhä monimutkaisemmat vaatimukset ja epävarmuuden. Rudolph ehdottaa sähköyhtiöille ja muille verkonhaltijoille ratkaisuna kojeistoja, IoT-tekniikkaan perustuvia antureita, käyttötekniikkaa ja IT-viestintäinfrastruktuuria esimerkiksi omaisuudenhallintaan. Kehittyvän sähköverkon vaatimuksien täyttämisen kannalta tärkeimpiä ominaisuuksia ovat digitaalisuus, tietoturva, turvallisuus, helppokäyttöisyys, takaisinmaksu ja tietoliikenne. [19]

Vaisala Oyj on valmistanut päämuuntajien kunnonvalvontaan soveltuvia mittareita, kuten kosteus-, vety- ja lämpötilalähetin MHT410:n ja Optimus OPT100 DGA-kaasuanalysaattorin. Tässä luvussa keskitytään MHT410:een liittyviin kokemuksiin. MHT410 on siis päämuuntajien kunnonvalvontaan kehitetty mittari, jonka avulla pystytään valvomaan muuntajaöljyn vetytiheyttä, kosteutta ja lämpötilaa. MHT410 mahdollistaa päämuuntajien jatkuvan kunnonvalvonnan ja ennakoivan kunnossapidon reaaliaikaisella tiedolla päämuuntajan kun-

nosta. Mittalaitteen jatkuva kunnonvalvonta perustuu päämuuntajien olosuhteiden valvontaan eristeöljyn kautta. [14]

Vaisalan MHT410-lähetin on asennettu Nivos Oy:n Kapulin muuntoaseman päämuuntajaan. Nivos Oy on hyödyntänyt lähetintä tiedon keräämiseen, vikojen valvontaan ja kunnossapidon suunnitteluun. Lähettimen keräämän tietoa ollaan siirretty suoraan valvomoon. [20] Nivos Oy:n käyttöpäällikkö on kommentoinut seuraavasti jatkuvan kunnonvalvonnan antamasta laitteen kunnon näkyvyydestä. Hänen mielestään tilanteen jatkuva seuraaminen on aivan eri asia, kuin silloin tällöin otetut näytteet. Jatkuvan valvonnan avulla pystytään esimerkiksi valvomaan päämuuntajan kuormaa, käykö se vajaateholla, vai onko sillä korkea hetkellinen kuorma. [21]

3.3 Automaatiopalveluiden tarjonta

Tässä kappaleessa tarkastellaan, minkälaisia sensoreita automaatiopalvelut ovat hyödyntäneet ratkaisuissaan. Tarkastellaan P2 Engineering Oy:n automaatiopalveluita ja heidän muuntamoautomaatiotaan. Heidän muuntamoautomaatoratkaisunsa on Aapeli-muuntamoautom Aapelissa käytetty modulaarinen tekniikka mahdollistaa monipuoliset vakioratkaisut, joita voidaan muokata asiakaskohtaisesti. Aapelin komponentit ovat vapaasti markkinoilla saatavilla. Perusversiossa Aapeliin kuuluu [22]

- Ohjausten ja tilatietojen välittäminen SCADA:aan
- 24V akusto ja 2x12V lämpökompensoidut varaajat
- Verkkoliitännän ylivirta- ja ylijännitesuojaus
- Erotusmuuntaja
- Akuston oikosulku- ja syväpurkaussuoja sekä purkausvastus
- Kotelon termostaattiohjattu lämmitys
- Huoltoväylä, HTTP
- SCADA-liityntä IEC 61850-5-101 tai -104
- Polykarbonaattikotelo (vakio) tai teräskotelo [22]

P2 Engineering Oy tarjoaa Aapelin perusversion lisäksi mahdollisuuden automaatioyksikön asiakaskohtaiseen räätälöintiin eri optioidensa avulla, joissa osassa ollaan hyödynnetty antureita. Nämä kyseiset optiot ovat muuntajan lämpötilan mittaaminen ja ympäristömittaukset eli lämpötilan ja kosteuden mittaaminen muuntajan ympäristöstä. Muuntajan lämpötilan mittaamisessa P2 Engineering Oy on käyttänyt PT100 muunninta ja pintanturia. Lämpötilatiedot siirretään SCADA:lle. [22]

4. MARKKINAKATSAUS

Tässä luvussa tarkastellaan markkinoilla olevia eri valmistajien sensoreita. Ensimmäisessä alaluvussa tarkastellaan Helen Sähköverkko Oy:llä käytössä olevien valmistajien kaasuanalysaattorien lisäksi kahta Vaisala Oyj:n valmistamaa kaasuanalysaattoria, jotka soveltuvat päämuuntajan jatkuvaan kunnonvalvontaan. Toisessa alaluvussa tarkastellaan Fingridin Kymin sähköasemalle tehtyä pilottihanketta IoT-sensorijärjestelmästä.

4.1 Sensorien saanti markkinoilla

Tässä luvussa tarkastellaan Helen Sähköverkko Oy:llä käytössä olleiden Hydrocalinin, Hydranin ja Kelmanin valmistamia kaasuanalysaattoreita ja myös kahta Vaisala Oyj:n valmistamaa kaasuanalysaattoria.

Markkinoilla olevilla kaasuanalysaattoreilla pystytään mittaamaan eri määrä kaasu, vaikka käyttökohde olisi sama. Mitattavien kaasujen määrä vaihtelee valmistajien ja mittalaitteen tyyppien välillä, kuten huomataan taulukossa 4.1

Valmistaja	Tyyppi	Käyttökohde	Mitattavien kaasujen määrä
Kelman	Transfix	Päämuuntaja	9
Hydran	M2	Päämuuntaja	4
Hydrocal	1003	Päämuuntaja	2
Vaisala	OPT100	Päämuuntaja	7
Vaisala	MHT410	Päämuuntaja	1

Taulukko 4.1. Valmistajien ja heidän mittalaitteiden tyyppien käyttökohde ja mitattavien kaasujen määrä, perustuu lähteisiin [14] [23][17][24] [16]

Eri valmistajien ja eri tyyppisten kaasuanalysaattorien eroavaisuuksia ei nähdä pelkäämään mitattavien kaasujen määrässä, vaan siitä mitä kaasuja pitoisuuksia muuntajaöljystä pystytään mittaamaan ja millaisella mittavälillä. Kuvassa 4.1 esitetään Kelmanin Transfixin ja Hydrocalin 1003:n, sekä Vaisala Oyj:n OPT100:n ja MHT410:n mitattavat kaasut ja niiden mittavälit.

Mittalaite	Vety (H ₂) (ppm)	Hiilimonoksidi (CO) (ppm)	Hiilidioksidi (CO ₂) (ppm)	Metaani (CH ₄) (ppm)	Asetyleeni (C ₂ H ₂) (ppm)	Etaani (C ₂ H ₆) (ppm)	Eteeni (C ₂ H ₄) (ppm)	Happi (O ₂) (ppm)	Typpi (N ₂) (ppm)	Kosteus (H ₂ O)
Kelman Transfix	5 – 5000	2 – 50 000	20 – 50 000	2 – 50 000	0,5 – 50 000	2 – 50 000	2 – 50 000	100 – 50 000	10 000 - 100 000	0 - 100 %
Hydrocal 1003	0 – 2000	0 – 2000								0 - 100 %
Vaisala OPT100	5 – 5000	0 – 10 000	0 – 10 000	0 – 10 000	0 – 5 000	0 – 10 000	0 – 10 000			0–100 ppm
Vaisala MHT410	5 – 5000									0 - 100 %

Kuva 4.1. Taulukko mittalaitteen mittaamista kaasuista ja niiden mittausväleistä, perustuu lähteeseen [14] [17][24] [16].

Kuvassa 4.1 esitettyjen mittalaitteiden lisäksi taulukossa 4.2 esitellään vielä samalle käyttökohteelle soveltuvan Hydran M2 kaasuanalysaattorin mittaamat kaasut, niiden suhteelliset herkkydet ja mittaustarkkuudet.

Kaasu	Suhteellinen herkkyys	Tarkkuus (konsentraatiosta)
Vety (H ₂)	100%	±10%
Hiilidioksidi (CO ₂)	15%	±4%
Asetyleeni (C ₂ H ₂)	8%	±2%
Eteeni (C ₂ H ₄)	1.5%	±0.5%
Kosteus (H ₂ O)	0-100 %	±2%

Taulukko 4.2. Hydran M2 Mark III Enhanced DGA monitoring for transformers tekniset ominaisuudet taulukoituna, perustuu lähteeseen [23]

4.2 Pilottikokeilut

Sähköasemien kunnonhallinnan digitaalisatio on erittäin uusi hanke sähköyhtiöiden keskuudessa. Ensimmäisiä IoT-sensorien pilottihankkeita ovat tehneet Fingrid Oy ja Elenia Oy. Fingrid on aloittanut hankkeensa vuoden 2017 lopussa ja on saanut jo noin kymmenen sähköasemaa sensoroitua. Fingridin tavoitteena on saada kaikille sähköasemille skaalautuvat IoT-antureihin perustuvat sensorijärjestelmät. Fingridillä on jatkossa tavoitteena saada varustettua sensoreilla 20 sähköasemaa vuodessa. [7]

Aleksi Roiman tekemä diplomityö käsittelee edellä mainitun Kymin sähköasemalle tehtyä IoT-pilottihanketta. Hankkeessa keskityttiin tarkastelemaan IoT-anturien soveltuvuutta 110kV:n kytkinlaitteiden kunnonvalvonnassa ja niissä tapahtuvien vikatilanteiden ennalta tunnistamiseen. Kytkinlaitteissa tutkittiin anturien avulla laitteiden mekaanisia komponentteja, kuten moottoria, vaihteistoa ja iskunvaimenninta. Käyttökohteissa IoT-sensoreita käytettiin moottorin virtasignaalisissa, lämpötilassa, mekaanisten komponenttien äänessä ja ilmankosteudessa tapahtuvien muutosten havaitsemiseen. [25]

Pilottihankkeessa asennettiin yhteensä 361 anturia ja mikrofoonia seuraamaan kytkinlaitteissa tapahtuvia muutoksia. Yhteen erottimien ohjausyksikköön asennettiin kaksi ilmapilottihanketta, kaksi kontaktimikrofoonia, virtamittari, lämpötilamittari ja ilmankosteusmittari. Katkaisijoiden ohjausyksikköön asennettiin kaksi kontaktimikrofoonia, ilmapilottihanketta, virtamittari, lämpötilamittari ja ilmankosteusmittari. Maadoituskytkimen ohjausyksikköön asennettiin kaksi kontaktimikrofoonia, virtamittari, lämpötilamittari ja ilmankosteusmittari. [25]

Pilottihanke on toistaiseksi osoittautunut onnistuneeksi. Roima teki diplomityönsä yhteenvedossa hyvän huomion siitä, kuinka dataohjattuun kunnossapitomalliin siirryttäessä on tärkeä ymmärtää, ettei muutos ole riippuvainen pelkästään teknologian muutoksesta, vaan se edellyttää päätöksentekijöiltä kokonaan uusien toimintamallien omaksumista. [25]

5. YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli selvittää millaisia ominaisuuksia sähköasemalla käytettävillä sensoreilla on ja mitä käyttökohteita niillä on. Työn tarkoituksena oli tarkastella miten sensorit vaikuttavat sähköasemien automatisointiin, kunnon- ja kulunvalvontaan sekä kunnossapitoon. Työ toteutettiin tutustumalla aiheeseen liittyvän kirjallisuuskatsauksen ja artikkelien avulla. Aiheeseen tutustuttiin syvemmin haastatteleamalla eri sähköyhtiöiden asiantuntijoita ja käymällä läpi sähköyhtiöille jo tehtyjä diplomitöitä.

Sähköasemien sensoreita voidaan hyödyntää monipuolisesti sähköasemien hallinnointiin ja valvontaan, esimerkiksi tässä työssä käsiteltyihin kulun- ja kunnonvalvonnan sekä kunnossapidon eri sovelluskohteisiin. Sensorit ovat niin sanottuja koneiden ja laitteiden aisteja, joita hyödynnetään eri mittalaitteissa ja jotka luovat pohjan eri järjestelmille, kuten esimerkiksi IoT-järjestelmälle. Erilaiset sensorijärjestelmät puolestaan luovat pohjan jatkuvalla kunnonvalvonnalle ja ennustavalle kunnossapidolle.

Haastatelluista sähköyhtiöistä Fingrid ja Helen Oy hyödyntävät jo toiminnassaan sensorijärjestelmiä, kun taas Pori Energia Sähköverkot Oy on pysyttäytynyt niin sanotuissa perinteisissä järjestelmissä. Suureksi syyksi sille, miksi sensorijärjestelmät eivät ole vielä laajemmin käytössä on niiden resurssien puute, kuten kunnossapitoon erikoistuneiden asiantuntijoiden puute. Ilman asiantuntijoita sensorijärjestelmistä ei saada tarvittavaa hyötyä. Haastatteluista kävi ilmi, että suuri syy sensorijärjestelmien hankkimiselle oli tarve saada parempi näkyvyys laitekannan kunnosta, jota nykyinen kunnonhallintamalli ei tarjoa.

Markkinoilla olevien valmistajien mittalaitteet ovat tällä hetkellä sen verran hintavia, että ne eivät vielä skaalaudu laajempaan käyttöön kaikille sähköasemille. Niiden hintakestävyys suhde ei ole vielä sillä tasolla, että niitä olisi kannattavaa ottaa käyttöön sähköaseman kaikille komponenteille, vaan niitä sijoitetaan sähköyhtiöiden kriittisimmille komponenteille, esimerkiksi satunnaisille päämuuntajille. Fingridin pilottihankkeet ovat kuitenkin olleet onnistuneita ja heidän tulevaisuuden tavoitteenaan on saada kaikille sähköasemilleen käyttöön skaalautuva digitaalinen IoT-valvonta.

LÄHTEET

- [1] *Automaatiojärjestelmien logiikat ja ohjaustekniikat*. fin. Helsinki: WSOY Oppimateriaalit, 2007. ISBN: 978-951-0-32423-3.
- [2] Collin, J. *Teollinen internet*. fin. Helsinki: Talentum, 2016. ISBN: 978-952-14-2849-4.
- [3] Han, Y. ja Song, Y. Condition monitoring techniques for electrical equipment-a literature survey. eng. *IEEE transactions on power delivery* 18.1 (2003), s. 4–13. ISSN: 0885-8977.
- [4] Oy, A. *ABB:n TTT-käsikirja 2000-07*. Accessed: 5-12-2021.
- [5] *The 4 Stages of IoT Architecture. Data Flow: From the Edge to the Server/Cloud*. URL: <https://www.digi.com/blog/post/the-4-stages-of-iot-architecture> (viitattu 16.12.2021).
- [6] *Cloud-Assisted IoT-Based SCADA Systems Security: A Review of the State of the Art and Future Challenges*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7445139> (viitattu 29.11.2021).
- [7] Vartiainen, M. *Teams-palaveri Fingridin asiantuntija kanssa*. Accessed: 27-12-2021.
- [8] *Teams-palaveri Sähköasemien antureista ja automaatiosta Pori Energia Sähköverkot Oy:n kunnossapitoinsinööri Sanna Syysmäen, käyttöpäällikkö Tero Isoviitan ja Käytön Suunnittelijan Mika Suojasen kanssa*. Accessed: 14-12-2021.
- [9] Tukes. *Tukes-ohje 16/2017 Sähkölaitteistot ja tarkastukset*. Accessed: 5-12-2021.
- [10] *Fingrid sähköasemat*. URL: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kunnossapito/sahkoasemat/> (viitattu 29.11.2021).
- [11] *Spotilla teollisuuden kunnossapito*. URL: <https://www.spotilla.com/teollisuuden-kunnossapito> (viitattu 29.11.2021).
- [12] *Porin Energia Sähköverkot Oy:n IFS-järjestelmä*. Accessed: 27-12-2021.
- [13] *Jatkuva kunnonvalvonta takaa, etteivät valot sammu*. URL: <https://www.vaisala.com/fi/blog/2020-01/jatkuva-kunnonvalvonta-takaa-etteivat-valot-sammu> (viitattu 16.12.2021).
- [14] VAISALA. *MHT410 Moisture, Hydrogen and Temperature Transmitter*. Accessed: 22-12-2021.
- [15] Kuosmanen, T. *Kysely sähköasemien sensoreista Helen Sähköverkko Oy:n kunnossapitoasiantuntijalta*. Accessed: 13-12-2021.
- [16] GE. *Kelman TRANSFIX Full on-line DGA moisture*. Accessed: 8-1-2022.
- [17] Vaisala. *OPT100 Optimus DGA Monitor*. Accessed: 8-1-2022.
- [18] Syysmäki, S. *Teams-palaveri Pori Energia Sähköverkot Oy:n kunnossapitoinsinööri kanssa*. Accessed: 13-12-2021.

- [19] *An IoT-Based Recipe for Future Substations*. URL: <https://blog.se.com/electricity-companies/2016/11/03/iot-based-recipe-future-substations/> (visited on 12/12/2021).
- [20] *Jatkuva kunnonvalvonta takaa, etteivät valot sammu. Nivos Oy:n kokemat hyödyt*. URL: <https://www.vaisala.com/fi/blog/2020-01/jatkuva-kunnonvalvonta-takaa-etteivat-valot-sammu> (viitattu 12. 12. 2021).
- [21] *Kosteus-, vety- ja lämpötilälähetin MHT410. Olosuhdevalvonta antaa täyden näkyyden*. URL: <https://www.vaisala.com/fi/products/instruments-sensors-and-other-measurement-devices/instruments-industrial-measurements/mht410> (viitattu 16. 12. 2021).
- [22] P2 Engineering Oy:n Verkostoautomaatio. (Viitattu 13.9.2021).
- [23] GE. *Hydran M2 Mark III Enhanced DGA monitoring for transformers*. Accessed: 8-1-2022.
- [24] MTE. *HYDROCAL 1003 Transformer Online Monitoring System with Gas-in-Oil and Moisture in Oil Measurement*. Accessed: 8-1-2022.
- [25] Roima, A. *Sähköaseman kytkinlaitteista kerätyn anturidatan hyödyntäminen ennustavassa kunnossapidossa*. fin. Tuotantotalous ja tietojohdaminen – Industrial ja Information Management, 2018.