



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Ville Viitasalo

Portaalirobottijärjestelmän sähkön mittaus ja IoT

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö
Sähkötekniikan diplomityö
Energia- ja informaatiotekniikka (DI)

Vaasa 2020

Sisälllys	sivu
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	5
ALKULAUSE	7
1 JOHDANTO	10
2 PORTAALIROBOTTIJÄRJESTELMÄ	13
2.1 Cimcorpin robotit	13
2.2 Cimcorpin robottisolu	15
3 PORTAALIROBOTTIJÄRJESTELMÄN ENERGIANKULUTUS JA SÄHKÖN LAATU	21
3.1 Järjestelmän sähkönkulutus	21
3.2 Keskuksen pääkytkimen mitoitus	23
3.3 Sähkön ja sähköverkon laadun vaikutukset automaatiojärjestelmään	25
3.3.1 Heikon sähkönlaadun vaikutukset laitteisiin	26
3.3.2 Heikosta sähkönlaadusta aiheutuvat kustannukset	29
4 ESINEIDEN INTERNETIN KÄYTTÖ PORTAALIROBOTTIJÄRJESTELMÄSSÄ	34
4.1 Esineiden internetin tausta ja kehittyminen	34
4.2 Esineiden internetin tuomat mahdollisuudet ja haasteet	39
4.2.1 Big data teollisuusautomaatiossa	40
4.2.2 IoT ja osoitejärjestelmät	43
4.2.3 IoT-laitteiden virransaanti	43
4.2.4 IoT ja tiedonsiirtotekniikka	46
4.2.5 IoT-järjestelmän turvallisuus	47

4.2.6	Pilvirobotiikan hyödyntäminen robottijärjestelmässä	47
4.2.7	Laitteiston huollon tarpeen ennakointi ja kunnonvalvonta	49
4.3	IoT Cimcorpissa	50
4.3.1	Datan keruu nykyisin Cimcorpilla	51
4.3.2	IoT:n mahdollisuudet tulevaisuudessa Cimcorpilla	51
5	PORTAALIROBOTTIJÄRJESTELMÄN MITTAUKSET	55
5.1	Mittausten tavoitteet ja toteutus	55
5.2	Energianmittausjärjestelmän esittely	57
5.2.1	Päälähdön energiamittaus	57
5.2.2	Robottilähtöjen energiamittaukset	58
5.2.3	Smartlink-keskitin	60
5.2.4	Teollisuus-PC	60
5.2.5	Ecostruxure Machine Advisor -palvelualusta	62
5.3	Käytetty sähkönlaatu- ja energia-analysointilaite	63
6	MITTAUSTEN KÄYTTÖÖNOTTO, TULOKSET JA HYÖDYNTÄMINEN	64
6.1	Energianmittauksen käyttöönotto	64
6.2	Energianmittaus ja tulokset	68
6.2.1	Schneiderin mittalaitteilla saadut sähköenergian mittaustulokset	69
6.2.2	Fluken analysointilaiteilla saadut sähköenergian mittaustulokset	70
6.3	Sähkönlaadun mittauksen tulokset	72
6.4	Energianmittauksen kehittäminen ja mittaustulosten hyödyntäminen	75
7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA NÄKYMÄT	78
8	YHTEENVETO	80

Lähteet	82
Liite. Sähkönlaadun mittauksen kuvaajat.	90

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Symbolit

<i>E</i>	Sähköenergia
<i>I</i>	Sähkövirran voimakkuus
<i>P</i>	Pätöteho
<i>U</i>	Jännite

Lyhenteet

B2B	Business to business, yritysmarkkinointi
Bluetooth	Langaton tiedonsiirtotekniikka
DDoS	Distributed denial of service, hajautettu palvelunestohyökkäys
DHCP	Dynamic host configuration protocol, verkkoprotokolla IP-osoitteen jakamiseen
DPF	Displacement power factor, perustajuinen tehokerroin
IIoT	Industrial internet of things, teollisuuden esineiden internet
IoT	Internet of things, esineiden internet
IP	Internet Protocol, TCP/IP -viitemalliin kuuluva verkkoprotokolla
IT	Information technology, informaatioteknologia
M2M	Machine to machine, laitteesta laitteelle
M2C	Machine to cloud, laitteesta pilvipalvelulle
MBR	Modular basic robot, modulaarinen portaalirobotti
OT	Operational technology, toimintateknologia
OPEX	Operating expense, operatiivisen toiminnan kulut
PF	Power factor, kokonaistehokerroin
PLC	Programmable logic controller, ohjelmoitava logiikkaohjain
PQ	Power quality, sähkön laatu
RFID	Radio frequency identification, radiotaajuiden etätunnistus
RMS	Root mean Square, neliöllinen keskiarvo
SCADA	Supervisory control and data acquisition, valvomo-ohjelmisto
Sigfox	Maailmanlaajuinen IoT-verkko

THD	Total harmonic distortion, harmoninen kokonaissärö
VPN	Virtual private network, virtuaalinen erillisverkko
WCS	Warehouse control system, varastonohjausjärjestelmä
Zigbee	Langaton tietoliikenneprotokolla

ALKULAUSE

Tämä diplomityö on tehty Cimcorp oy:n sähkösuunnitelun osastolle. Haluan esittää kiitokseni työni ohjauksesta ja tarkastamisesta Jani Tuomolalle, Juuso Jusille ja Jani Lukkarille. Kiitos myös kaikille muille Cimcorpilaisille ja Schneider Electricin henkilöstölle, jotka olivat mukana diplomityön edistymisessä.

Haluan kiittää myös diplomityöni valvojaa professori Timo Vekaraa ohjaamisesta ja ammattimaisesta kommentoinnista. Kiitän myös professori Kimmo Kauhaniemeä työni tarkastamisesta.

Lopuksi haluan kiittää perhettäni ja kavereitani tuesta ja kannustuksesta opintojeni aikana.

Pori, 20.2.2020.

Ville Viitasalo

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö**

Tekijä:	Ville Viitasalo
Diplomityön nimi:	Portaalirobottijärjestelmän sähkön mittaus ja IoT
Tutkinto:	Diplomi-insinööri
Oppiaine:	Sähkötekniikka
Valvoja:	Professori Timo Vekara
Ohjaaja:	Insinööri Jani Tuomola (Cimcorp)
Tarkastaja:	Professori Kimmo Kauhaniemi
Opintojen aloitusvuosi:	2017
Diplomityön valmistumisvuosi:	2020

Sivumäärä: 92

TIIVISTELMÄ

Ympäristötietoisuuden ja sähkön hinnan vuoksi tieto laitteiden sähkönkulutuksesta kiinnostaa asiakkaita yhä kasvavissa määrin. Suorittamalla energiamittauksia pystytään tarjoamaan asiakkaille tietoa siitä, paljonko laitteet todellisuudessa kuluttavat energiaa ja täten mm. käyttökustannuksien ja takaisinmaksuaikojen yksilöllisempi arviointi mahdollistuu.

Tämä diplomityö tehtiin toimeksiantona Cimcorp oy:lle. Työssä tarkasteltiin automaatiojärjestelmään kuuluvien portaalirobottien energiankulutusta, sähkön laatua ja esineiden internetin yhteensopivuutta. Työssä keskityttiin portaalirobottien sähkön mittaukseen. Mittaukset tehtiin Ulvilan toimipisteen testirobottisolulla sekä asiakkaan kohteessa. Työn yksi tavoitteista oli tutkia eri energiamittausmahdollisuuksia, jotta tulevaisuudessa pystyttäisiin tarvittaessa projektin yhteydessä toimittamaan toimiva energiamittausratkaisu.

Työ sisältää teoriapohjaista tarkastelua mm. sähkönlaadun, energiankulutuksen ja IoT:n osalta. Sähkönlaadun mittaukset, vaikutus ja mittaustulosten analysointi käydään myös läpi. Esineiden internetiä tarkastellaan edeten teoriatasolta pohdintaan siitä, miten sitä voitaisiin hyödyntää kohdeyrityksessä tulevaisuudessa.

Diplomityön lopputuloksena muodostettiin robottisoluun toimiva energiamittaus ja mitattiin asiakkaan määrittelemän robotin työkierron energiankulutus. Työn lopuksi esitellään jatkokehitysideoita siitä, miten kohdeyrityksen energiamittauksista olisi mahdollista lähteä soveltamaan ja laajentamaan tulevaisuudessa.

AVAINSANAT: Sähköenergian mittaus, teollisuusrobotti, esineiden internet, sähkön laatu

UNIVERSITY OF VAASA**School of Technology and innovations**

Author: Ville Viitasalo
Topic of the thesis: Electricity measurement and IoT in portal robot system
Degree: Master of Science in Electrical Engineering
Supervisor: Professor Timo Vekara
Instructor: B.Eng. Jani Tuomola (Cimcorp)
Evaluator: Professor Kimmo Kauhaniemi
Year of entering the university: 2017
Year of completing the thesis: 2020

Number of pages: 92

ABSTRACT

Environmental aspects and the price of electricity have resulted that, customers are increasingly interested in the energy consumption. By performing energy measurements, it is possible to provide information to customers, how much energy is consumed by Cimcorp's devices and thus for example a more personalized assessment of operating costs and payback times is possible.

This Master's thesis was done to Cimcorp oy. The thesis examines the power consumption, power quality and Internet of Things of the portal robots belonging to the automation system. The work focuses on measuring the electricity of portal robots. Measurements were made on a test robot cell at the Ulvila site, as well as at a customer's site. One of the aims of the work was to study the possibilities of different energy metering systems in order to be able to provide a working energy metering solution for future projects, if needed.

The work includes a theory-based review of e.g. power quality, power consumption and IoT. Power quality measurements, impact and analysis of measurement are also reviewed. Internet of things is viewed from a theoretical level to a reflection on how it could be used in the future at Cimcorp.

The results of this thesis were that robotic cell-based energy measurement system was created and additionally energy consumption of a custom-defined robot cycle was measured. At the end of the thesis there are further development ideas about, how to apply and expand the energy measurements at the target company in the future.

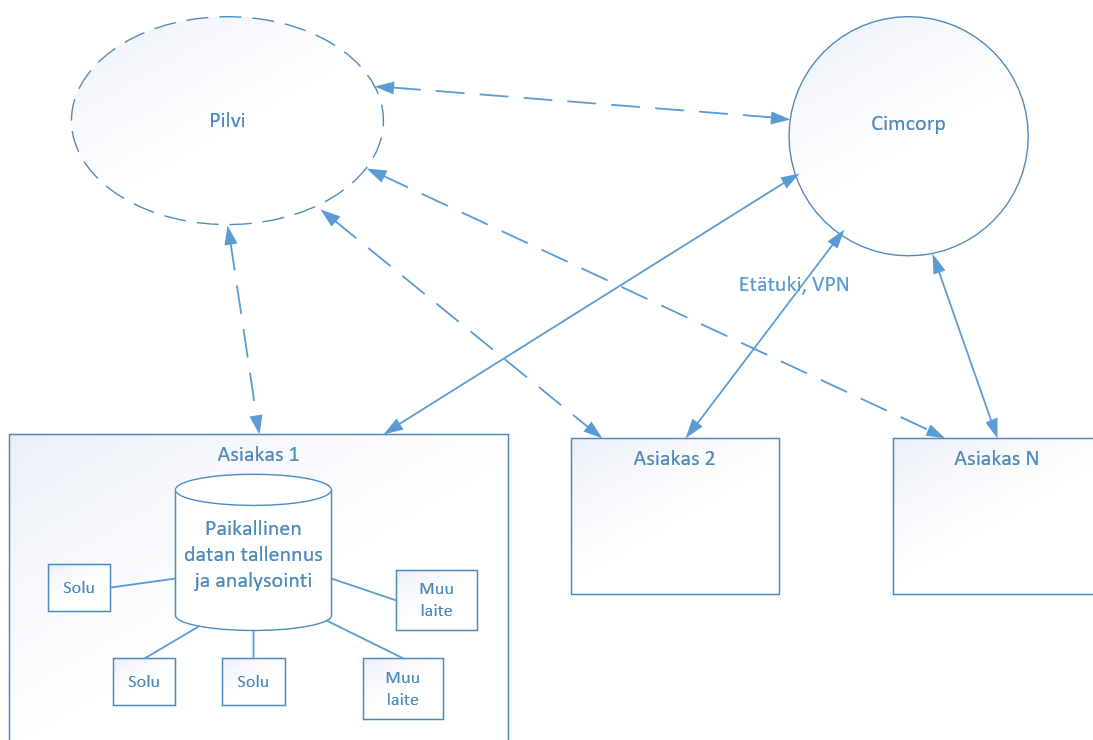
KEYWORDS: Electrical energy measurement, industrial robot, internet of things, power quality

1 JOHDANTO

Sähkönkulutus kasvaa koko ajan maailmanlaajuisesti ja sen myötä lisääntyy myös kiinnostus laitteiden kuluttamasta energiasta. Maailmalla on lisäksi näkyvässä sähkön hinnan nousua (Eurostart, 2019). Monet teollisuusyritykset haluavat tietää tarkasti, mikä niiden toteutuksessa kuluttaa energiaa ja täten pyrkiä luomaan energiatehokkaita ratkaisuja. Energiatietoisuus kasvattaa mahdollisuuksia vähentää kuluja ja ohjaa energiatehokkaampaan toimintaan. Suorittamalla energiamittauksia ja analysoimalla saatua dataa on mahdollista tunnistaa järjestelmän potentiaaliset parannuskohteet. Tämän myötä puuttamalla havaittuihin epäkohtiin voidaan luoda yhä kustannustehokkaampi kokonaisuus. Yritykset asettavat lisäksi itselleen ympäristötavoitteita ja tähän liittyy läheisesti myös sähkön käyttö, koska se omalta osaltaan vaikuttaa päästöjen määrään ja täten tavoitteen saavuttamiseen.

Tämän diplomityön tavoitteena on kehittää, hyödyntää ja soveltaa energiamittausta Cimcorp oy:n portaalirobotijärjestelmissä. Työssä suoritettavat energiamittaukset toteutetaan yrityksen testirobottisolulla, jossa kahteen identtiseen robottisoluuun suunnitellaan ja toteutetaan energiamittaus. Työssä tutkitaan, miten robotilla suoritettava ajo, eli sen kuorma ja liike vaikuttavat energiankulutukseen. Energiaa kuluu tietenkin eniten ajossa, mutta laitteet kuluttavat energiaa myös olleessaan valmiustilassa.

Työn toisena suurena tutkimuskysymyksenä on esineiden internet (engl. internet of things, IoT) ja sen mahdollinen hyödyntäminen kohdeyrityksessä tulevaisuudessa. IoT:n tarkastelu on rajattu teoria- ja pohdintatasolle. Kuvassa 1 on hahmoteltu, miten tulevaisuudessa Cimcorpin toteutuksessa voitaisiin hyödyntää esineiden internetiä.



Kuva 1. Hahmotelma tulevaisuuden datan keruusta Cimcorpilla (Latva-Pukkila, 2019).

Kuvassa 1 on katkoviivoilla esitetty, miten dataa voitaisiin kerätä keskitetysti useammasta tehtaasta pilveen. Jokaisen tehtaassa sisällä on lisäksi oma paikallinen datan tallennus. Yhdenäiset viivat kuvaavat tämän hetken tilannetta, eli jos halutaan tarkastella asiakkaan toteutusta, on otettava erillisellä luvalla pyydettävä virtual private network -yhteys (VPN) asiakkaan toteutukseen. VPN-yhteys tarkoittaa käytännössä suojattua ja salattua etäyhteyttä, jonka avulla tiedonsiirto on turvallista tässä tapauksessa Cimcorpilla ja asiakkaan välillä.

Työn rakenne

Toisessa luvussa esitellään lyhyesti kohdeyritys, diplomityössä suoritettaviin mittauksiin liittyvä portaalirobotti ja sen sovellukset. Samassa luvussa käydään läpi myös ohjausjärjestelmäkokonaisuuden eli robottisolun ominaisuudet ja tärkeimmät toimilaitteet.

Kolmannessa luvussa selvitetään pääosin teoriapohjaisesti järjestelmään vaikuttavia sähkötekniisiä asioita. Luku sisältää mm. järjestelmän liitäntätehon määrittelyn selvitte- lyn. Diplomityö käsittelee portaalirobottien sähköenergiankulutusta ja sitä pohjustetaan aiheeseen liittyvällä teorialla. Luvussa tarkastellaan myös sähkön ja sähköverkon laadun vaikutukset ja erityisesti heikon sähkönlaadun haitat ja aiheuttamat mahdolliset kustan- nukset.

Neljännessä luvussa avataan käsitettä esineiden internet. Luvussa käsitellään yleisesti, mikä on IoT ja miksi se on yleistynyt viime vuosina suuresti. Luvussa syvennyttään lisäksi myös IoT:n haasteisiin ja mahdollisuuksiin. Teoriapohjustuksen jälkeen pohditaan esinei- den internetin ja Cimcorpin välistä suhdetta. Luku sisältää tarkastelua siitä, miten ja millä vaatimuksilla voitaisiin esimerkiksi asiakkaiden kohteissa hyödyntää IoT-tyylistä järjestel- mää.

Viidennessä luvussa esitellään tarkemmin mitä tässä diplomityössä konkreettisesti mita- taan, eli käydään läpi mittauskohteet ja mittauksen toteutus yleisesti. Lisäksi luvussa esi- tellään energiamittauksessa ja sähkön laadun mittauksessa käytettävät laitteet ja hyö- dynnettävät ohjelmat.

Luku 6 käsittelee työssä suoritettujen sähkönlaatu- ja energiamittausten tuloksia. Lu- vussa analysoidaan saatua mittausdataa ja pohditaan, miten energiamittausta ja mitat- tua dataa voidaan hyödyntää. Luvussa käydään lisäksi läpi näkökulmia, miten nyt aloitet- tua sähköenergianmittausta lähdetään kehittämään tulevaisuudessa ja mitä asiakas voisi mittausdatasta hyötyä. Lopuksi luvuissa seitsemän ja kahdeksan esitellään diplomityön johtopäätökset ja yhteenveto.

2 PORTAALIROBOTTIJÄRJESTELMÄ

Cimcorp-konserni on japanilaisen Murata Machinery Ltd. -konsernin omistama robotiikkaan erikoistunut automaatioyrittäjä. Cimcorp oy toimittaa automaatiojärjestelmiä rengas-, jakelu- ja elintarviketeollisuuteen. Yritys on perustettu vuonna 1975 ja sen pääkonttori sijaitsee Ulvilassa. Työntekijöitä Cimcorp-konsernilla on tällä hetkellä noin 450 (Cimcorp, 2019).

Cimcorpin toiminta on projektilähtöistä, jossa kaikilla työntekijöillä on omat roolinsa ja vastuunsa. Kyseinen toimintatapa sopii hyvin automaatioalalle, koska jokaisessa toimituksessa on monia eri vaiheita ennen projektia, sen aikana ja jälkeen. Tästä syystä tarvitaan monia eri alojen osaajia. Ennen kuin valmiit robotit ja oheislaitteet toimitetaan asiakkaalle, on jo suoritettu lukuisia eri osastojen vastuulla olevia tehtäviä, mm. myyntiä, eri alojen suunnittelua, kokoonpanoa ja dokumentointia. Projektilähtöinen työtapa auttaa näin yritystä esimerkiksi toimittamaan sovitut projektit aikataulussa asiakkaille.

Cimcorpilla on hyvin erilainen konsepti erityisesti rengasteollisuuden automatisointiin, ja tämän ansiosta Cimcorpilla on johtava asema rengasteollisuuden sisälogistiikassa. Varrastoinnin automatisointiin itsessään on kyllä olemassa monia erilaisia sovelluksia, jotka käsittelevät esimerkiksi lavoja tai muovilaatikoita, mutta toteutustapa on niissä erilainen. Cimcorpin toteutuksessa on etuna mm. se, että projektin optimointiin ei tarvita isoa työryhmää. Yleisesti automatisoitu tuotantojärjestelmä auttaa asiakasta mm. kohdentamaan resurssit tehokkaasti. Esimerkiksi robotin hoitaessa painavien renkaiden käsittelyyn siihen ei tarvitse kuluttaa ihmisten voimavaroja.

2.1 Cimcorpin robotit

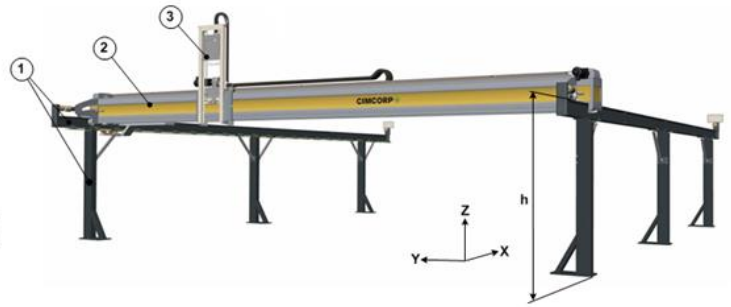
Cimcorpin robotit jaotellaan gantry- eli portaalirobotteihin ja monorail- eli yhdellä kiskolla kulkeviin robotteihin. Monorail-robotit on tarkoitettu erikokoisten rengasaihoiden kuljetukseen. Portaalirobotit taas pitävät sisällään tässä työssä käsiteltävät mallit

MBR700+ ja MBR800+. Malli MBR800+ on kaksisiltainen, joka kykenee mm. siirtämään suurempia kuormia kuin MBR700+. Robottien lisäksi toteutukseen kuuluu usein erilaisia vakiolaitteita, esimerkiksi renkaiden pinoaja ja suuntauslaite. Tuotteiden käsittelystä vastaa varastonohjausjärjestelmä WCS (engl. warehouse control system). Robotit ovat Cimcorpin plusversioita. +-merkintä tarkoittaa kehittyneempää versiota robotista. Näissä versioissa mm. portaalirobotin runkopalkki on kokenut materiaalivaihdoksen, jonka myötä robotista tuli huomattavasti energiatehokkaampi ja suorituskykyisempi.

Tässä diplomityössä keskitytään tarkastelemaan kokonaisuutena kahden kaksisiltaisen portaalirobotin muodostamaa robottisolua. Energianmittaus ja tarkastelu suoritetaan robottiin MBR800+. Robotti on suunniteltu erilaisiin sovelluksiin, esimerkiksi laatikoiden ja renkaiden välivarastointiin ja poimintaan. Laitteen maksimi toiminta-alue on 80 m x 12,5 m x 3,7 m (x, y ja z). Robotti on varustettu paikannusantureilla, jotka varmistavat tarkan toiminnan. Tarttujan ultraäänianturi varmistaa esimerkiksi pinon korkeuden ja lisäksi vertaa sitä ohjausjärjestelmän laskettuun tietoon pinon korkeudesta. Tarttujan maksiminostokuorma on noin 300 kg (Cimcorp, 2017).

Kuvassa 2 on esitetty robotin MBR700+ pääosat ja lisäksi havainnollistettu x, y ja z-suunnat. Itse siltayksikkö liikkuu x-suuntaisesti runkopalkkeja pitkin. Pystymoduuli liikkuu y- ja z-suuntaisesti. Pystymoduulissa on sovelluksen perusteella valittu tarttuja. Esimerkiksi rengas- ja elintarvikesovelluksiin on erilainen tarttuja, koska toteutuksien tuotteet eroavat toisistaan huomattavasti. Tarttuja voi olla servo- tai paineilmaohjattu. Muuten robotin toiminnallisuus ei projektikohtaisesti muutu. Robotti on regeneratiivinen, eli se syötää jarrutusenergiaa takaisin sähköverkkoon.

1. Robotin runko
2. Siltayksikkö
3. Pystymoduuli (Y-kelkka)

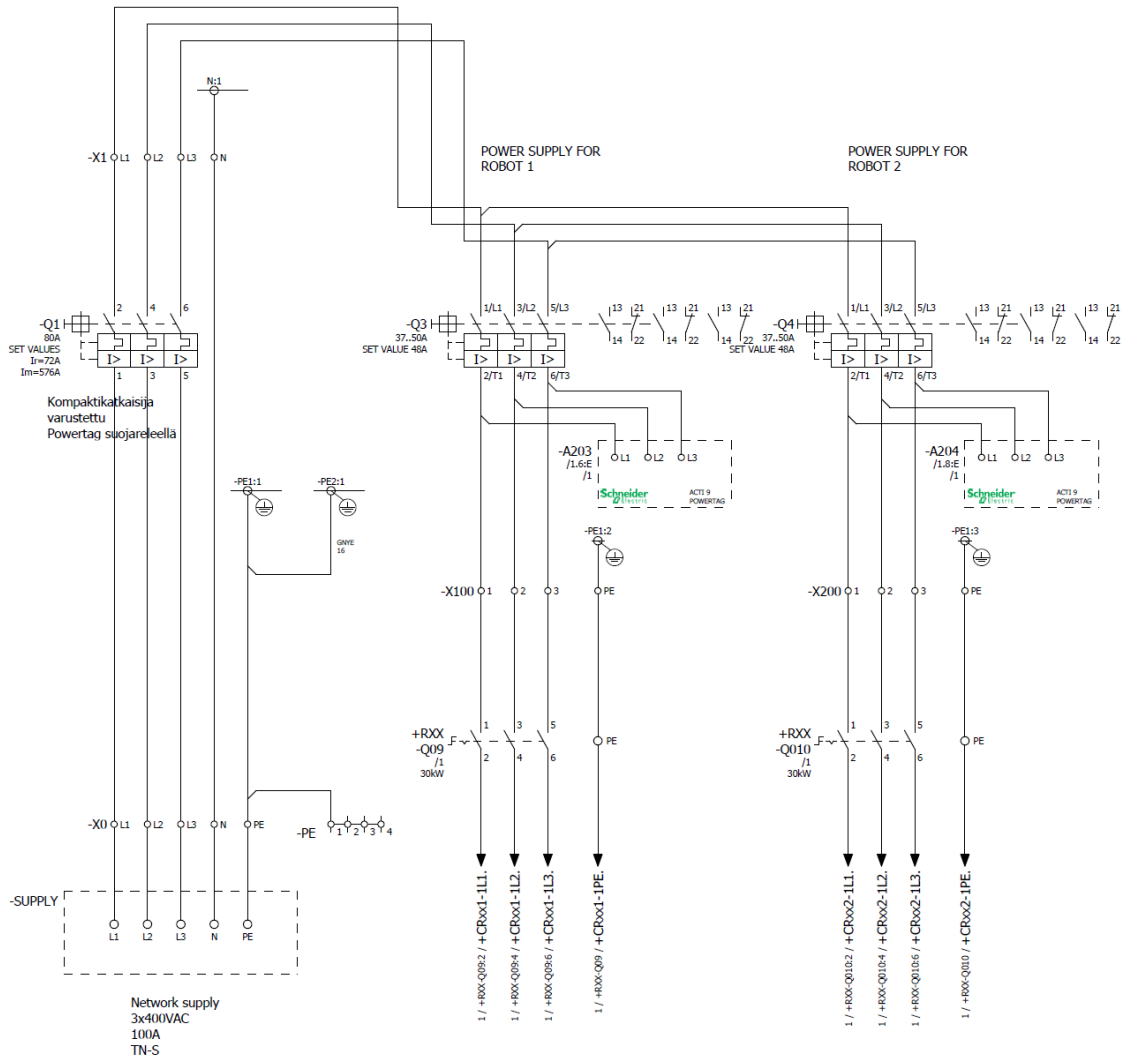


Kuva 2. Robotti MBR700+ (Cimcorp oy, 2017).

2.2 Cimcorpin robottisolu

Robotin ohjausjärjestelmä toteuttaa loogisen ja sekvenssiohjauksen. Lisäksi ohjausjärjestelmä huolehtii robotin teknisistä ohjaustoiminnoista, eli esimerkiksi siitä, että robotti osaa hakea oikean tuotteen ja siirtää sen oikeaan paikkaan. Järjestelmä valvoo myös laitteiden ajoa, eli se tunnistaa aina, mikä on robotin sijainti tietyllä ajan hetkellä.

Kuvassa 3 on esitetty robottisolun keskuksen (engl. cell control cabinet) pääpiirikaavio. Kuvasta havaitaan, että keskukseen tulee 3-vaiheinen 400 V:n vaihtovirtasyöttö. Solukaa-pista taas lähtee robottilähdöt molempien robottien omaan ohjauskaappiin, jotka sijaitsevat robottisolussa siltayksikön päässä.



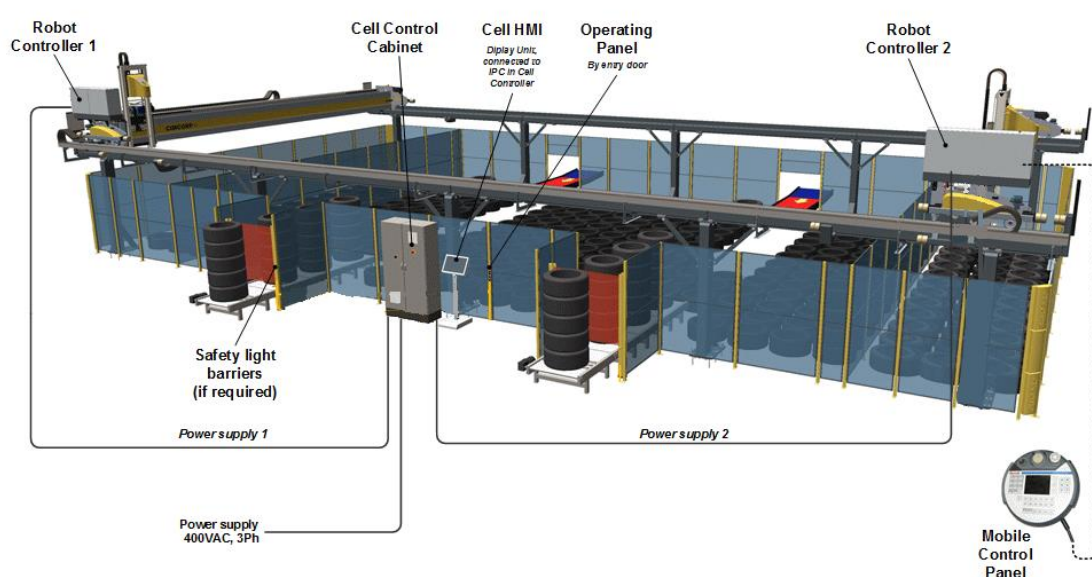
Kuva 3. Yksinkertaistettu ohjausjärjestelmän pääkaavio.

Ohjausjärjestelmän kokonaisuus eli robottisolu pitää sisällään automaatiojärjestelmälle tyypilliset turva-alueet. Teollisuusrobotit täytyy eristää siten, että henkilöiden on mahdollonta päätyä vahingossa niiden toiminta-alueelle.

Cimcorpin toteutuksessa robottisolualan henkilöturvallisuutta suojataan ensisijaisesti turva-aidoilla, jotka on aseteltu toiminta-alueen ympärille. Kokonaisuutta tuetaan myös suojaovella. Lisäksi toteutuksessa on usein mukana valoverhot, jotka on tarkoitettu hen-

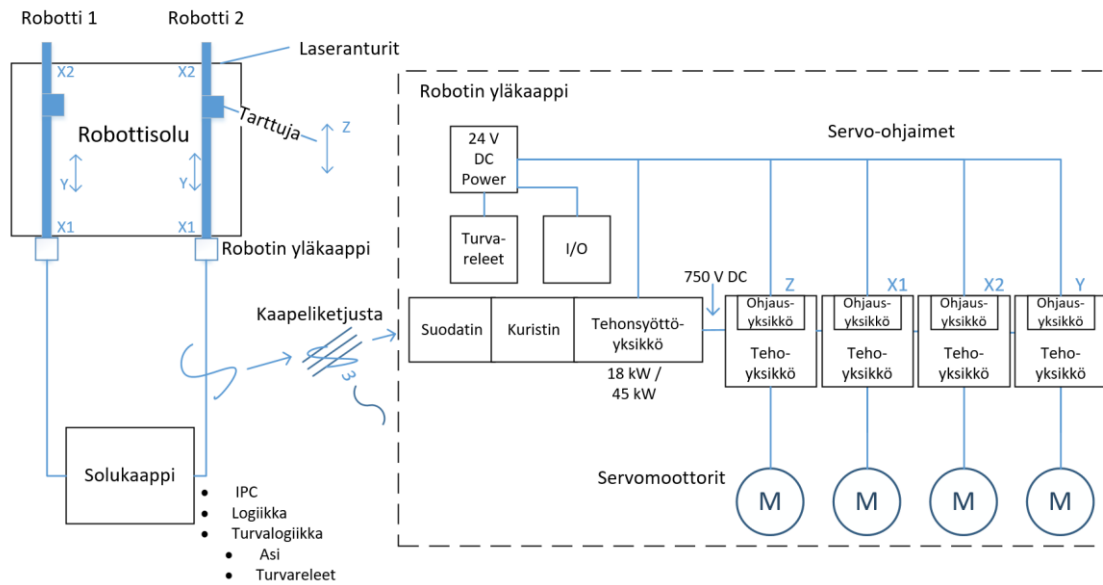
kilöstöön suojaamiseksi. Valoverho hyödyntää anturitekniikkaa ja havaitessaan häiritsevää toimintaa, lähettää sen ohjauslogiikka pysäytysignaalin ja robotit pysähtyvät. Jokaisen sisäänkäyntioven vieressä on lisäksi käyttöpaneeli, jossa on hätäpysäytyspainike.

Kuvassa 4 on robottisolun layout-kuva, jossa on esitetty edellä mainitut laitteet ja toiminnot. Molemmissa robottisolun päädyissä on lisäksi huoltoalueet, joihin on erilliset sisäänkäyntiovet.



Kuva 4. Ohjausjärjestelmäkokonaisuus (Cimcorp oy, 2017).

Kuten edellä on mainittu, Cimcorpin portaalirobotti syöttää jarrutusenergiaa takaisin sähköverkkoon. Tämä onnistuu kuvassa 5 esitetyn suodatin-kuristin-tehonsyöttöyksikön kombinaation avulla. Tehonsyöttöyksikkö (18 kW tai 45 kW) muodostaa 750 V:n suuruisen tasajännitteen välijännitepiiriin, tämä jännite menee jokaiselle servo-ohjaimelle. Servo-ohjain muodostuu teho- ja ohjausyksiköstä. 750 V:n tasajännitesyötön lisäksi se vaatii 24 V DC-ohjausjännitteen. Servo-ohjain ottaa välijännitepiiristä tarvittavan tehon 3-vaihe AC-moottoreille. Robotin jarruttaessa moottorin generoima jarrutusenergia siirtyy servo-ohjaimesta takaisin välijännitepiiriin. Tehonsyöttöyksikkö syöttää suodattimen ja kuristimen kautta energiaa takaisin sähköverkkoon, tämän seurauksena tasajännite pysyy koko ajan 750 voltissa.



Kuva 5. Cimcorpin robottisolu ja sen tärkeimmät toimilaitteet

Toteutuksessa ei käytetä erillisiä jarruvastuksia. Robotin liikkeitä ohjataan servomootoreilla. Käytetyissä servomootoreissa on pitäjarru, eli kun ne eivät ole päällä ovat moottorit levossa ja paikallaan jarrujen avulla. Suurimmillaan robotin energiankulutus on silloin, kun kiihdytetään kaikkien kolmen akselin (x, y ja z) suuntaan samanaikaisesti, koska kyseisessä tilanteessa useampi servomoottori tekee työtä.

Kuorma muodostuu robottisolussa enimmäkseen servomootoreista, joita on toteutuksesta riippuen neljästä kahdeksaan. Servomootoreiden lisäksi toinen suuri tehoa kuluttava osa-alue robottisolussa on 24 voltin tasavirtajännitelaitteet. Yleisestikin Cimcorpin automaatiojärjestelmän kuormaan vaikuttavat eniten sähkömoottorit, sillä niitä on aina toteutuksen mukaan eri määrä riippuen tarvittavista oheislaitteista, eli esimerkiksi kääntöpöytien määrästä. Itse robotin ohjaustavat ovat aiemmin mainitut servomoottorit ja lisäksi ns. I/O PLC ja turvatoiminnoista vastaava ns. safety PLC. PLC tarkoittaa ohjelmoitavaa logiikkaohjainta (engl. programmable logic controller).

Robottisolun anturointi

Cimcorpin portaalirobottien anturointi keskittyy tarttujaan, eli tyypillisesti tuotteiden ja toimilaitteiden anturointiin. Sovelluksesta ja tuotteesta riippuen portaalirobotin tarttuja voi sisältää seuraavia antureita:

- valokennot
- induktiiviset anturit
- ultraäänianturi
- magnetostriktiivinen anturi.

Robottisolussa robotin servoakseleilla on ulkoiset anturit x-akselilla (ks. kuvat 2 ja 5) ja ne ovat laser- tai viivakoodiantureita.

Robottisolu osana laajempaa kokonaisuutta

Kuvassa 6 on havainnollistettu yleisellä tasolla, miltä Cimcorpin automaatiojärjestelmä voi näyttää.

3 PORTAALIROBOTTIJÄRJESTELMÄN ENERGIANKULUTUS JA SÄHKÖN LAATU

Tässä luvussa käydään läpi sähköenergiankulutuksen perusteita ja teoriaa, jolla pohjustetaan työn pääaihetta, eli portaalirobotin sähköenergian mittausta. Työssä mitataan myös sähkön laatua ja sen takia myös sitä käsitellään tässä luvussa aluksi teoriatasolla. Tarkastellaan mm. mikä aiheuttaa sähkön laadun heikkenemistä ja mitä seurauksia sillä voi olla järjestelmän laitteille ja niiden toiminnalle.

3.1 Järjestelmän sähkönkulutus

Sähkönkulutuksella tarkoitetaan järjestelmän laitteiston kuluttaman energian määrää tietyllä ajanjaksolla. Laitteiston kuluttamalla energialla on suuri merkitys, sillä kuluttamalla liikaa energiaa voi järjestelmä ylikuormittua. Tämä johtaa mahdollisesti mm. laitteiston ylikuumentumiseen tai vahingoittumiseen, jotka taas aiheuttavat useissa tapauksissa järjestelmän hetkellisen pysähtymisen. Lähes kaikissa tapauksissa pysähtyminen aiheuttaa myös lisäkustannuksia, sillä useimmat toiminnot edellyttävät sähköä. Energiankulutus vaikuttaa suoraan myös kustannuksiin, sillä mitä korkeampi energiankulutus on sitä enemmän laitteiston käyttö ja ylläpito maksavat (Harris, D & Harris, S. 2016).

Sähköteho ja sähköenergia E liittyvät läheisesti toisiinsa. Pätöteho P muodostuu kolmi-vaihejärjestelmässä yhtälöllä

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi , \quad (1)$$

missä U on vaihejännite, I on sähkövirran voimakkuus ja $\cos \varphi$ on tehokerroin (Mohan, Robbins & Undeland, 1995).

Laitteiden energiankulutus vaikuttaa paljon kokonaisuuden kannattavuuteen ja siksi se onkin tärkeää ottaa huomioon esimerkiksi uutta ohjausjärjestelmää suunniteltaessa. Hyödynnettävissä olevien resurssien tehokas käyttö edellyttää energiankulutuksen ja suorituskykyvaatimusten tasapainottamista. Tämä tarkoittaa, että esimerkiksi robotteja ajetaan samaan aikaan mahdollisimman nopeasti ja energiatehokkaasti.

Reaaliaikainen tieto mm. energiankulutuksesta ja sähkönlaadusta auttaa seuraamaan esimerkiksi tuotantojärjestelmän toimivuutta ja luotettavuutta. Isossa toteutuksessa kerätty tieto pitäisi olla mieluiten yksittäisten laitteiden tai pienten kokonaisuuksien tarkkuudella, jotta kerättyä dataa pystytään hyödyntämään paremmin. Tiedon ollessa reaaliaikaista ja tarkkaa, eli vähintään pienistä kokonaisuuksista kerättyä, olisi esimerkiksi sähkön laatuongelma helpompi havaita ja paikantaa nopeasti tiettyyn kohtaan automaatiojärjestelmässä. Sama pätee myös energiankulutukseen. Mitä pienemmistä kokonaisuuksista mitattua dataa on saatavilla, sitä enemmän siitä on hyötyä esimerkiksi energiankulutuksen seurannassa ja viikoittaisen energiankulutuksen laskelmissa. Reaaliaikainen data auttaa siis mm. seuraamaan järjestelmän toimimista oikein ja halutulla tavalla. Lisäksi se mahdollistaa nopean reagoimisen poikkeustilanteisiin tai häiriöihin.

Jos prosessin liitântätehoa ja energiankulutusta halutaan vähentää, pitää ensin tiedostaa paljonko koko järjestelmä tarvitsee energiaa toimiakseen. Tämä tarkoittaa, että tiedetään mikä kuluttaa ja minkä verran energiaa toteutuksessa. Lisäksi järjestelmän optimointia varten on tiedostettava systeemin vapausasteet, eli esimerkiksi ne laitteet, joiden kuluttama energia voi vaihdella (Brinksmeier, Hagendorf, Larek, Meyer, & Pawelitta, 2011).

Teollisessa automaatiojärjestelmässä on paljon energiaa kuluttavia kohteita. On tärkeää tiedostaa, miten järjestelmän energiankulutus jakautuu. Energiankulutukseen vaikuttaa myös ympäristön olosuhteet ja käyttötapa. Järjestelmän eri osatekijät muodostavat koko toteutuksen energiankulutuksen. Energiaa kuluu myös laitteiston ollessa valmiustilassa,

eli esimerkiksi silloin, kun robotti ei tee näkyvää toimenpidettä, mutta on koko ajan valmiudessa suorittamaan tulevia tehtäviä.

Vaihtosähköjärjestelmässä tehon, energian ja sähkönlaadun mittauksiin liittyy läheisesti termi tehokerroin. Tehokerroin (engl. power factor) ja kosini φ tarkoittavat samaa piirissä, jossa virran ja jännitteen siniaallossa ei ole vääristymiä. Tällöin puhutaan perustaaajuista tehokertoimesta DPF (engl. displacement power factor). DPF ei siis sisällä harmonisia yliaaltoja ja ottaa huomioon vain perustaaajuuden. Järjestelmässä, joka ei ole lineaarinen, eli siellä esiintyy harmonisia yliaaltoja, lasketaan tehokertoimeen mukaan myös nämä vääristymät, joka aiheuttaa sen, että tällä tavoin laskettu tehokerroin on pienempi kuin alkuperäinen tehokerroin. Tällöin puhutaan todellisesta tehokertoimesta (tai vain PF), joka on siirtotehokerroin kerrottuna vääristystehokertoimella (Mohan, Robbins & Undeland, 1995).

3.2 Keskuksen pääkytkimen mitoitus

Pääkytkimen mitoitukseen liittyy käsite liitäntäteho, joka tarkoittaa tässä tapauksessa kaikkien keskuksen pääkytkimen takana olevien sähkölaitteiden tehonkulutuksen summaa, nimellisarvoista laskettuna. Mitoitus tapahtuu keskuskohtaisesti. Laskentaa tarvitaan, jotta osataan mitoittaa oikean kokoinen pääkytkin keskukseen. Liitäntätehoa laskettaessa on huomioitava mm. seuraavat asiat:

- Laskenta suoritetaan laitteiden nimellistehon perusteella, eikä esimerkiksi virran. Saatua laskentatulosta muunnetaan vasta lopuksi yksiköltään ampeereihin. Huomioidaan syöttöjännite. Näin saadaan tieto järjestelmän nimellisvirrasta ja sen myötä osataan valita oikean kokoinen pääkytkin.
- Järjestelmässä on erityyppisiä kuormia ja sähkölaitteita. Pitää tiedostaa, onko niiden käyttö jatkuvaa vai epäjatkovaa. Jatkovaksi kuormaksi määritellään laitteet, joiden maksimivirta kestää yli 3 tuntia yhtäjaksoisesti (Desmond, 2014).

- Kaikki laitteet eivät käy aina nimellistehollaan ja se kannattaa huomioida, jotta laskennasta saadaan realistisempi. Esimerkiksi sähkömoottorit käyvät harvoin koko ajan nimellistehollaan, joten moottorien ja muun vaihtelevan kuormituksen osalta täytyy ottaa huomioon niiden käynnistysvirta.
- Tietyt laitteet eivät voi olla päällä samanaikaisesti. Tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi laite 1 ei voi käydä, jos laite 2 on päällä. Cimcorpin toteutuksessa on esimerkiksi moottoreilla toimivia kääntöpöytiä, jotka voivat kuljettaa kerrallaan tuotetta ainoastaan yhteen suuntaan. Kyseisessä tilanteessa vain tiettyjen kääntöpöytien moottorit voivat käydä samanaikaisesti. Kuvassa 7 on havainnollistettu tätä tilannetta. Siitä nähdään, että jos esimerkiksi elintarvikelaatikon haluttaisiin menevän tai tulevan eri suuntaisesti, tarvitsisi kääntöpöydän pyörähtää.



Kuva 7. Kuljetinjärjestelmän kääntöpöytä

- Pääkytkin ylimitoitetaan, koska katkaisijan takana olevan kuorman suositellaan turvallisuussyistä olevan maksimissaan 80 % sen todellisesta mahdollistamasta läpikulkuvirrasta. Eli esimerkiksi 80 A katkaisijan takana oleva jatkuva kuorma saa

tämän perusteella olla maksimissaan 64 A (Doyle, 2018). Lisäksi ylirajoitus mahdollistaa järjestelmään sähkölaitteiden lisäämisen tarvittaessa myös myöhemässä asennusvaiheessa.

- Joissain tapauksissa on mahdollista hyödyntää pääkytkintä, joita on mahdollista käyttää 80 %:n läpikulkuvirran sijaan 100 %:n läpikulkuvirralla. Kyseisellä merkinnällä varustetut kytkimet mahdollistavat täten suuremman läpikulkuvirran myös jatkuvassa käytössä. Joissain tapauksissa tämä tuo siis säästöjä, sillä mahdollisesti toteutukseen riittää tällä tavoin pienemmän nimellisarvon kytkin (Shishani, 2019).
- Laskennassa voi ja kannattaa hyödyntää lisäksi aikaisempien suunnitteluprojektien tuomaa kokemusta ja tietoa.

3.3 Sähkön ja sähköverkon laadun vaikutukset automaatiojärjestelmään

Sähkön laadusta (engl. power quality, PQ) puhuttaessa käytetään usein eri nimityksiä esimerkiksi jännitteen, virran tai palvelun laatu. Sähkön laadun on myös ilmaistu tarkoittavan väyläjännitteen pitämistä häiriöttömänä siniaaltona, nimellisjännitteessään ja taajuudessaan (Fuchs & Masoum, 2008).

Sähkön laatua käsitellään useassa standardisarjassa, jotka määrittelevät standardin mukaisen laadun ja lisäksi siihen liittyvät mittaukset. Ensimmäinen tarkastelumme kohde on SFS-EN 50160 (Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet). Nimensä mukaisesti kyseinen standardi käsittelee yleisiä jakeluverkon jännitteen ominaisuuksia. Sähkön laatu voidaan edellä mainitun standardin perusteella määritellä huonoksi, jos se ei vastaa esimerkiksi jännitteelle asetettuja vaatimuksia. Standardin määrittelemään jännitteen laatuun liittyy myös eripituiset keskeytykset. Toinen tärkeä sähkön laatuun liittyvä standardisarja on IEC 61000-4-30 (Testing And Measurement Techniques - Power Quality Measurement Methods), joka sisältää sähkön laadunmittauksiin liittyvät vaatimukset. Eri

sähkön laadun häiriöiden mittauksiin on olemassa myös lisäksi omia standardejaan. Esimerkiksi standardi IEC6100-4-7 (Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto), käsittelee erityisesti harmonisten yliaaltojen mittausta (Härmä, 2017).

Sähköjärjestelmän sähkön laatu vaikuttaa kaikkiin siihen liitettyihin sähkötekniisiin ja elektroniisiin laitteisiin. Itse laatuun vaikuttavat esimerkiksi virran, lämpötilan, jännitteen ja taajuuden arvot ja erityisesti niiden poikkeamat. Viimevuosina epälineaariset kuormat ovat yleistyneet huomattavasti erityisesti hajautetuissa ratkaisuissa. Kyseiset kuormat synnyttävät harmonista virtaa (engl. harmonic current), joka aiheuttaa esimerkiksi laitteiston ylikuumentumista, epätarkkaa tehonmittausta, yhteyshäiriöitä ja luotettavuuden alenemista (Fuchs & Masoum, 2008). Robottiikka ja yleisesti teollisuus, joka käyttää nykyaikaisia monimutkaisia ratkaisuja, tarvitsevat laadukasta sähköä toimiakseen oikein ja tarkoitetulla tavalla. Laadukkaan jännitteen merkitys korostuu samalla kun automatisoinnin määrä toteutuksessa kasvaa (Ross, 2019).

Suuri osa taajuuden ja jännitteen epätasaisuudesta voidaan paikantaa tehtaan sisälle. Tällaisessa tilanteessa sähkönlaatuongelmaa aiheuttaa esimerkiksi tehtaan oma prosessi tai siihen liittyvä laitteisto. Tämä on toisaalta positiivinen asia, sillä se tiedostettaessa on siihen helpompi reagoida itse oman järjestelmän muutoksilla (Ignatova, 2015).

3.3.1 Heikon sähkönlaadun vaikutukset laitteisiin

Huono jännitteen laatu on ilmiönä kasvava, sillä sähköverkossa sähkö- ja tehoelektronikkalaitteiden määrä kasvaa koko ajan. Nykypäivänä asiakkaat ovat paljon tottuneempia hyödyntämään sähkölaitteita, esimerkkinä tietokoneet, ohjelmoitavat logiikkaohjaimet ja taajuusmuuttajat. Kyseiset laitteet ovat herkkiä sähkönlaadun häiriöille, esimerkiksi jännitteen vaihtelulle. Tätä selittää se, että nykyaikaiset sähkölaitteet ovat monimutkaisia ja lisäksi monet toimivat yhdessä muiden verkkoon liitettyjen sähkölaitteiden kanssa (Bhattacharyya, Kling & Myrzik, 2007).

Heikko jännitteen laatu on ilmiönä hyvin salakavala, sillä se huomataan usein vasta, kun vikoja alkaa esiintyä. Tämän takia on tärkeää tietää, miten häiriöt syntyvät ja miten ne vaikuttavat loppukäyttäjiin ja sähköjärjestelmän laitteisiin, jotta häiriötilanteiden ennaltaehkäisyyn kiinnitettäisiin huomiota. Vaikka häiriöitä ei järjestelmässä suoranaisesti esiintyisi, niin huono sähkön laatu lyhentää mm. komponenttien käyttöikää ja aiheuttaa erinäisiä häviöitä (Fuchs & Masoum, 2008).

Heikon sähkönlaadun vaikutuksia laitteistolle voivat Fuchsin ja Masoumin mukaan esimerkiksi olla:

- Toimintahäiriöt turvalaitteissa, esimerkiksi sulakkeissa ja releissä. Aiheutuu ei-toivottuja laukaisuja.
- Harmonisten yliaaltojen vaikutus jännitteen huippu- ja tehollisarvoon (engl. root mean square, RMS). Nimellijännitteestä poikkeava, korkea huippujännite voi altistaa laitteiston häiriölle. Ylijännite voi lisäksi saada laitteen, esimerkiksi transistorin toimimaan kyllästys- eli saturaatioalueensa ominaisuuksilla, joka aiheuttaa taas ylimääräisiä häiriöitä.
- Rinnakkais- ja ferresonanssin seurauksena sähköjärjestelmän komponentit ja asiakkaan kuormat saattavat olla alttiita häiriölle. Edellä mainitut ilmiöt voivat aiheuttaa esimerkiksi sähköpiirin jännitteen tai virran kasvua (Fuchs & Masoum, 2008).

Taulukossa 1 on esitetty yleisimmät heikosta jännitteen laadusta johtuvat häiriöt, niiden vaikutukset ja mahdolliset ehkäisytekniikat. Taulukossa on myös hahmoteltu, miltä jännitteen aaltomuoto näyttää kussakin häiriötilanteessa.

Taulukko 1. Yhteenvedo heikon sähkönlaadun vaikutuksista (Muokattu lähteestä, Seymour, 2019).

Häiriöluokka	Häiriötilanteen aaltomuoto	Vaikutukset	Mahdolliset aiheuttajat	Mahdolliset ratkaisut
1. Kytkeäilmiöt				
Impulsiivinen transienti		Tietojen katoaminen, mahdolliset vauriot ja järjestelmän pysähtyminen	Salamointi, sähköstaattinen purkaus	Ohimenevä jännitteen ylijännitesuoja, kosteus 35-50 %
Väriähtelevä transienti		Tietojen katoaminen, mahdolliset vauriot laitteistolle	Induktiivisten/kapasiivisten kuormien kytkeminen	Ohimenevä jännitteen ylijännitesuoja, UPS, reaktori/kuristin
2. Keskeytykset				
Katkos (esim. syöttöjännitteen)		Tietojen katoaminen, odottamaton laitteiston sammuminen	Kytkeä-, käyttö- tai komponenttivika, katkaisijan laukeaminen	UPS
3. Alijänniteilmiöt				
Jännitteenalenema		Järjestelmän pysähtyminen, tietojen katoaminen, sammuminen	Kuorman käynnistys, viat	Tehonsäädin, UPS
Alijännite		Järjestelmän pysähtyminen, tietojen katoaminen, laitteiston sammuminen	Kuorman vaihtelut, käyttövika	Tehonsäädin, UPS
4. Ylijänniteilmiöt				
Jännitteen kohouma		Häiriön laukaisu, laitteiston vahingoittuminen/lyhentynyt elinkaari	Kuorman vaihtelut, käyttövika	Tehonsäädin, UPS, muuntajat ferresonanssin hallintaan
Ylijännite		Laitteiston vahingoittuminen/lyhentynyt elinkaari	Kuorman vaihtelut, käyttövika	Tehonsäädin, UPS, muuntajat ferresonanssin hallintaan
5. Poikkeavuudet käyrämuodossa				
DC-virhe		Häiriön laukaisu, maasulku, muuntajien ylikuumentuminen	Vialliset tasasuuntaajat, virtalähteet	Viallisten laitteiden korvaaminen ja vianmääritys
Harmoniset yliaallot		Muuntajien ylikuumentuminen, järjestelmän pysähtyminen	Elektroniset kuormat (epälineaariset kuormat)	Tehokertoimen korjain (PFC), k-kerroin muuntajat, syöttöreitin vaihto
Epäharmoniset yliaallot		Välkyntä, lämpeneminen	Ohjauksignaalit, vialliset laitteet, taajuusmuuntimet, epätahtimoottorit	Tehonsäädin, UPS
Jännitteen lovi		Tietojen katoaminen, järjestelmän pysähtyminen	Taajuusmuuttajat, kaarihitsaus, valon himmentimet	UPS, suodattimien asennus, syöttöreitin vaihto
Kohina		Tietojen katoaminen, järjestelmän pysähtyminen	Radiolähettimet, vialliset laitteet, toimimaton maadoitus	Suojasuodattimien lisääminen, eristysmuuntaja
Jännitteen heilahtelu		Tietojen katoaminen, järjestelmän pysähtyminen	Radiolähettimet, vialliset laitteet, toimimaton maadoitus, radiotaajuisten häiriölähteen läheisyys	Herkkien kuormien siirto, UPS, tehonsäädin, syöttöreitin vaihto
Syöttötaajuuden poikkeama		Järjestelmän pysähtyminen, välkyntä	Ajoittainen kuorman laitteiden käyttö	Herkkien kuormien siirto, UPS, tehonsäädin, syöttöreitin vaihto

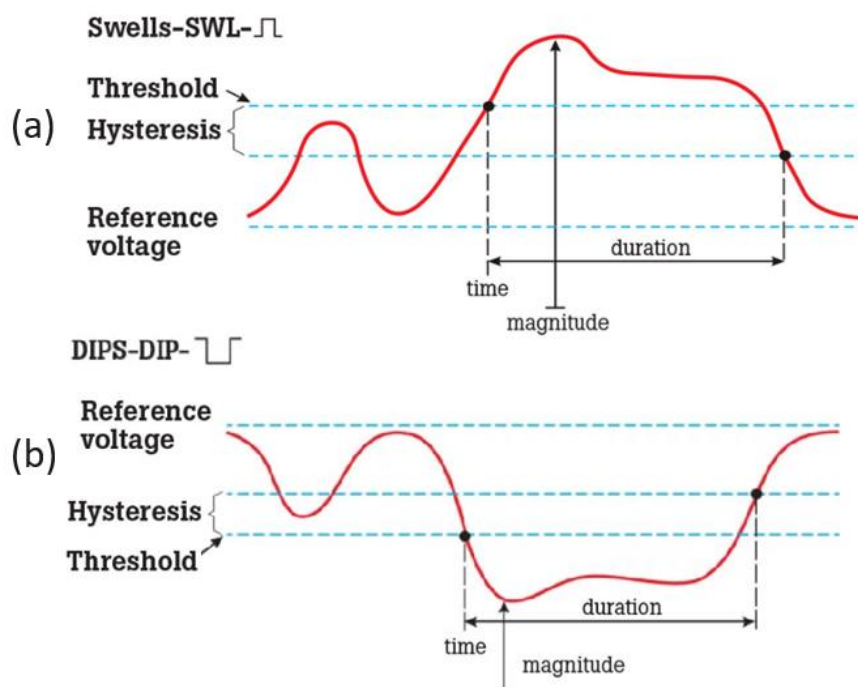
Taulukosta 1 havaitaan, että sähkönlaadun ongelmat voivat aiheutua lukuisista eri syistä. Ne vaikuttavat eri tavoin järjestelmän laitteisiin ja niiden toimintaan, mutta aina negatiivisesti. Esimerkiksi tietojen häviäminen, järjestelmän pysähtyminen ja laitteiden vahingoittuminen ovat yleisiä järjestelmän ja laitteiden kokemia seurauksia. Sähkön laatuongelmat tulisi tiedostaa, jotta niihin pystytään reagoimaan ajoissa.

Sähkölaitteisiin huono sähkönlaatu vaikuttaa aina yksilöllisesti. Laitteen sähköisen rasituksen määrä ja voimakkuus ennen vikaantumista voi siis vaihdella. Laitteen huonon sähkönlaadun toleranssiin vaikuttavat lisäksi mm. komponentin ikä, sijainti järjestelmässä ja häiriön kestoaika (Bhattacharyya ja muut, 2007).

3.3.2 Heikosta sähkönlaadusta aiheutuvat kustannukset

Heikon sähkönlaadun aiheuttamat kustannukset vaihtelevat laajasti. Laun ja Tamjksen Euroopan maita käsittelevän tutkimuksen mukaan jännitteen häiriöt, eli esimerkiksi jännitteen alenemat, voivat aiheuttaa asiakkaalle jopa 56 %:n tappiot ja harmoniset yliaallot (engl. harmonics) 5 %:n tappiot. Verkonhaltijalle harmonisista yliaalloista johtuvat kustannukset ovat huomattavasti pienemmät (Lau & Tamjis 2006, siteerattu kirjoittajien Sharma ja muut 2018 artikkelista).

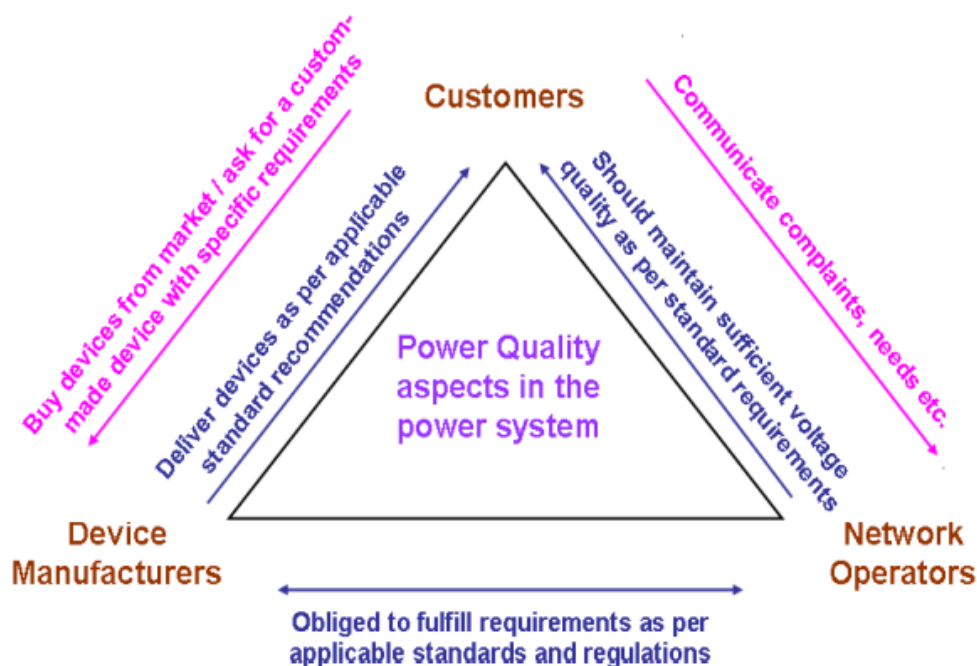
Sähkön laatu voi vaihdella toteutuksen mukaan suurestikin ja sen myötä kvantifiointi nousee tärkeäksi tekijäksi. Tarkastelua ei ole helppoa toteuttaa, sillä ongelmat voivat olla joko näkyviä tai piileviä. Esimerkkinä jos jännitteenalenema (engl. voltage sag/dip) aiheuttaa häiriön ja sähkölaitteet ja mahdollisesti koko prosessi pysähtyy, huomataan vaikutus heti. Jännitteen nouseminen suuremmaksi kuin 10 % yli suositellun nimellisarvon, puhutaan termillä jännitteen kohouma (engl. voltage swell), aiheuttaa sähkölaitteisiin vanhentumista, jota on heti vaikea havaita tai ennustaa. Ennenaikainen laitteiden vanhentuminen taas muodostaa ylimääräisiä kustannuksia. Tapauksissa, jotka eivät aiheuta välitöntä ongelmaa, on siis työlästä ja vaativaa määrittää heikon jännitteenlaadun vaikutuksia. Jännitteen laatuongelmien määrittämiseen on kehitetty omat standardit, esimerkiksi aiemmin mainittu SFS-EN 50160, joka on eurooppalainen (Sharma ja muut, 2018). Kuvassa 8 on havainnollistettu jännitteen käyrämuodot edellä mainituissa tilanteissa.



Kuva 8. Jännitteen kohouma (a) ja alenema (b) (Fluke, 2019a).

Kuvasta 8 huomataan, että tietyllä ajanjaksolla jännite poikkeaa normaalista. Häiriö kestää niin kauan, kunnes jännite palautuu takaisin puhtaaksi siniaalloksi. Kuvassa 8a on havainnollistettu kohouma ja kuvassa 8b on esitetty alenema. Kuvissa ”magnitude” tarkoittaa jännitteen poikkeaman on huippua.

Sähkön laatuongelmien ilmetessä nousee usein esiin kysymys, kuka on vastuussa aiheutuneista kuluista. Asia on aina tapauskohtainen, koska huono jännitteen laatu voi olla peräisin joko sähkön loppukäyttäjän, verkko-operaattorin tai laitevalmistajan puolelta. Kuvassa 9 on esitetty edellä mainittujen toimijoiden välistä keskinäistä suhdetta, kun kyseessä on sähköjärjestelmään syntynyt sähkön laadun ongelma.



Kuva 9. Sähkön laatuun vaikuttavien osapuolten vuorovaikutus (Bhattacharyya, 2011).

Kuvassa 9 on esitetty kaikkien kolmen osapuolen rooli sähköjärjestelmässä. Ongelmaksi voi tilanteen mukaan muodostua, että verkko-operaattori syyttää sähkön loppukäyttäjää ja että mahdollisesti myös laitevalmistajan mielestä sähkön laatuongelmat johtuvat asiakkaan omasta käytöstä. Asiakkaan näkemys taas voi olla, että ongelmat johtuvat joko ei-standardinmukaisista laitteista tai sähköntoimittajan puolen ongelmasta.

Verkko-operaattorin katsotaan olevan vastuussa jännitteen laadusta, kun taas loppukäyttäjä on itse vastuussa riittävästä virran laadusta. Kyseinen perustelu pohjautuu siihen, että virran laatuongelmat yleensä viittaavat mahdollisiin asiakkaan omiin järjestelmässä tapahtuneisiin asennusvirheisiin (Bhattacharyya 2011). Yleensä sähkö on korkealaatuista voimalaitoksen päässä, eli siellä missä se on tuotettu. Matkalla asiakkaalle sähkön laatu voi kuitenkin heikentyä, esimerkiksi siirto- ja jakeluverkkojen häiriöistä johtuen (Bhattacharyya ja muut, 2007).

Sharman ja muiden (2018) tutkimuksen perusteella heikosta sähkön laadusta johtuvat kustannukset voidaan jakaa välillisiin ja välittömiin kustannuksiin.

Välilliset kustannukset ovat:

- yritykselle aiheutuneet kustannukset tuotannon viivästymisestä
- markkinaosuuden menetyksestä johtuvat taloudelliset kustannukset.

Välittömät kustannukset ovat:

- prosessin uudelleenkäynnistäminen
- laitteen tai laitteiston vauriot
- keskeytyskustannukset
- jätteet puolivalmiissa tuotannossa
- ajan ja resurssien menetys (Sharma ja muut, 2018).

Käyttämiensä sähkölaitteiden perusteella asiakkaat voidaan jaotella teollisuus- ja yksityisasiakkaiden välillä. Huonosta sähkönlaadusta johtuvat tappiot ovat suuremmat teollisuusasiakkaille, koska esimerkiksi järjestelmät ovat paljon suurempia ja täten viat aiheuttavat enemmän kustannuksia. Tästä syystä teollisuusasiakkaat keskittyvät yksityisasiakkaita enemmän heikosta sähkönlaadusta johtuvien taloudellisten tappioiden laskemiseen (Sharma ja muut, 2018). Taulukossa 2 on esitetty heikon sähkönlaadun kustannukset teollisuusasiakkaille. On kuitenkin otettava huomioon, että tuotantosektorista riippuen eri kustannusluokat vaikuttavat alan kokonaiskustannuksiin eri määrin.

Taulukko 2. Heikon sähkönlaadun aiheuttamia mahdollisia kustannuksia teollisuusasiakkaalle (Lau & Tamjis 2006, siteerattu ja muokattu lähteestä, Sharma ja muut, 2018).

PQ kustannusluokka	Sisältää
Henkilökustannukset	Henkilöstö tuottamatonta häiriintyneen työnkulun/prosessin takia
Keskeneräinen työ	Prosessin raakaaineiden kustannukset Työvoimakustannukset Menetetyn tuotannon korvaaminen. Esim ylityöt
Laitteiden toimintahäiriöt	Hidastavat yrityksen aktiivisuutta Määrittelemätön tuotannon keskeytys
Laitteiden vahingoittuminen	Vaurioituneiden laitteiden korjauskustannukset Väliaikaiset laitehankinnat Ylimääräiset huoltokustannukset laitteiden kulumisen seurauksena
Muut kulut	Sakot toimittamattomista/myöhästyneistä tuotteista Ympäristösakot Korvausten maksaminen Henkilöstövahinkojen kustannukset
Erityiset kulut	Sähkölaskuun tulleet lisäkustannukset Välkyntä, vähentää henkilöstön tuottavuutta
Säästöt	Varastoa ei kulu Mahdolliset maksamattomat palkat Energiasäästöt, kun tehdas ei käy

Taulukosta 2 havaitaan esimerkiksi, että teollisuudessa huonosta sähkönlaadusta aiheutunut keskeytynyt sähkönjakelu voi aiheuttaa monia eri tyyppisiä kuluja tuotantojärjestelmälle. On kallista joutua pysäyttämään tuotanto kokonaan ja usein jo yksi kulutuksen aiheuttaja johtaa toiseen. Esimerkiksi rikkoutunut laite voi vaikuttaa siihen, että ei saada välttämättä asiakkaiden tilaamia tuotteita toimitettua ajoissa.

4 ESINEIDEN INTERNETIN KÄYTTÖ PORTAALIROBOTTIJÄRJESTELMÄSSÄ

Tässä luvussa perehdytään esineiden internetin eli IoT:n hyödynnettävyyteen ja mahdollisuuksiin. Aluksi pohjustetaan aihetta käymällä läpi IoT:n perusteita, minkä jälkeen pohditaan sen mahdollisuuksia ja haasteita teollisuusautomaatiossa. Lopuksi tarkastellaan IoT:n soveltamista kohdeyrityksen omissa toteutuksissa.

4.1 Esineiden internetin tausta ja kehittyminen

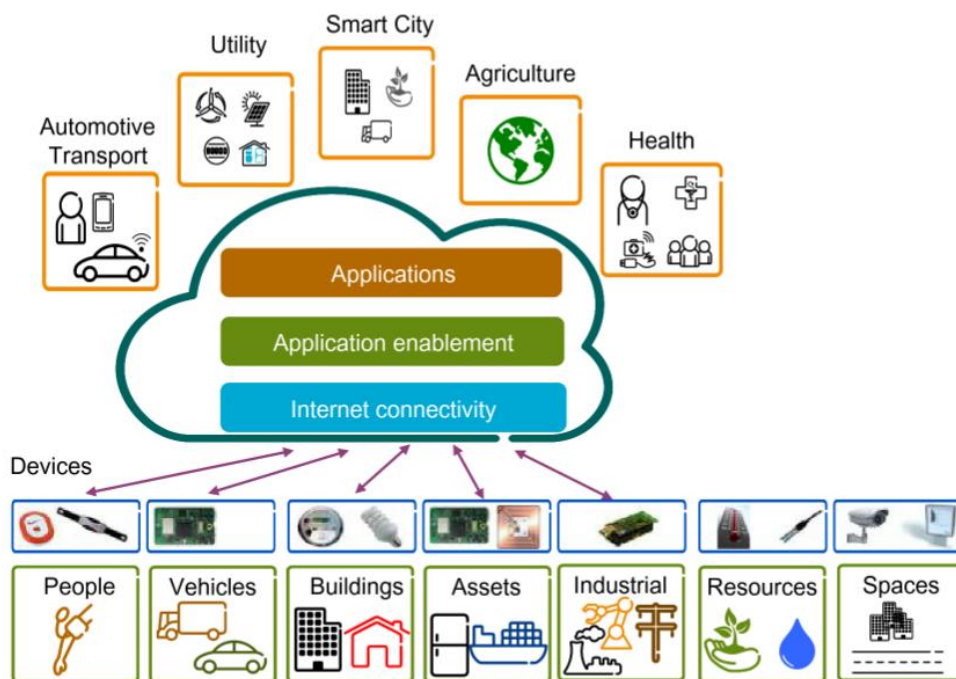
Yleisesti IoT voidaan määritellä eri teknologioiden kokonaisuudeksi, jonka tarkoituksena on yhdistää laitteet, ihmiset ja sovellukset hyödyntäen internetiä. Tavoitteena on soveltaa laitteiden ominaisuuksia monipuolisemmin ja internetiä hyödyntäen hoitaa esimerkiksi valvontaa ja ohjausta. Tässä ideassa laitteet tuottavat dataa, eli tietoa itsestään ja lähiympäristöstään. Internetin avulla mm. järjestelmän ohjaus voidaan toteuttaa etänä (Al-Mashari & Del Giudice, 2016).

Itse termi IoT on syntynyt vuonna 1999, mutta ajatus laitteiden yhdistämisestä on ollut esillä jo kymmeniä vuosia. Kevin Ashtonia pidetään esineiden internetin keksijänä. Vaikka IoT on keksitty jo kauan aikaa sitten, niin mielenkiinto sitä kohtaan on alkanut selvästi yleistyä vasta 2010-luvulta lähtien (Lueth, 2014). Ihmisten ja yritysten kiinnostus IoT:ta kohtaan on ollut ainoastaan kasvavaa viime vuosina. Tämän myötä myös IoT-laitteiden määrä on kasvanut räjähdysmäisesti viime vuosina.

IoT-laitteeksi voidaan mieltää esimerkiksi kuluttajien aikoja sitten hankkimia laitteita, kuten älytelevisio tai pelikonsoli. Ne on todennäköisesti hankittu ennen esineiden internetin määritelmää, joten ihmiset eivät edes ajattele niitä IoT laitteina. Markkinat ovat nopeasti muuttuvia ja ihmiset ostavat usein tuotteita eivätkä teknologiaa, joten lisäominaisuuksien liittäminen laitteeseen tuntuu luonnolliselta (Gilchrist, 2017). Teollisuudessa tilanne on täysin verrattavissa edellä mainittuun. Esimerkiksi automaattioratkaisuissa on jo

valmiiksi olemassa paljon laitteita, joita vasta myöhemmin aletaan hyödyntää osana IoT-järjestelmää. Esineiden internet mahdollistaa siis kyseisessä tilanteessa jo olemassa olevien laitteiden monipuolisemman hyödyntämisen.

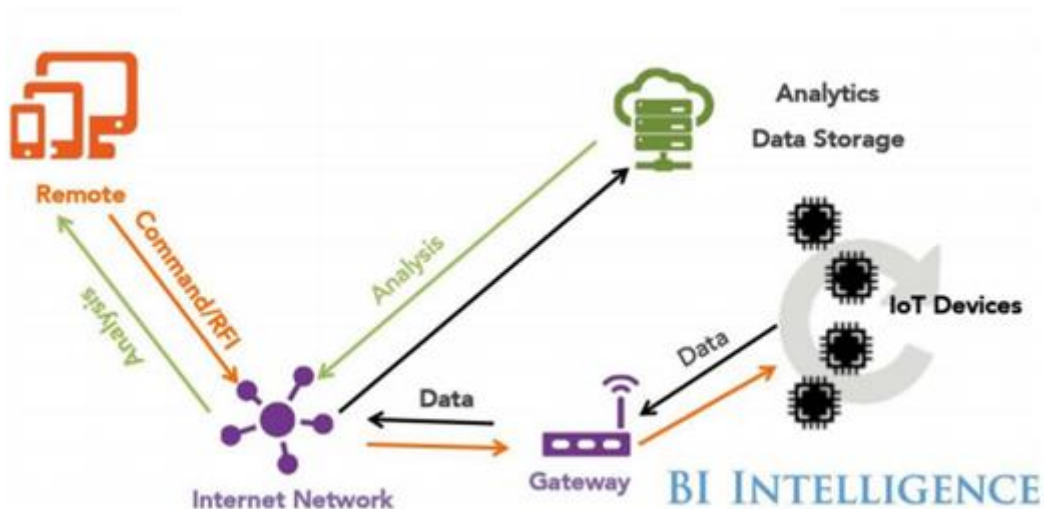
Teollisuudessa IoT nähdään mm. yhdistettyjen robottien, laitteiden ja ihmisten kokonaisuutena. IoT-laitteiden kerätessä dataa ja kommunikoidessa keskenään muodostuu esimerkiksi automaatiojärjestelmästä yhä yhtenäisempi kokonaisuus (Rouse, 2016). Teollisuusympäristössä käytetään usein tarkemmin määriteltyä termiä IIoT (engl. industrial internet of things), eli teollinen esineiden internet. IIoT:n kanssa puhutaan myös älykkästä teollisuudesta. Edellä mainittuihin termeihin liittyy myös käsite teollisuus 4.0, jolla tarkoitetaan mm. IoT:n, IIoT:n, robotiikan ja muun vastaavan edistyksellisen teknologian muodostamaa kokonaisuutta (Modarres, 2019). Kuvassa 10 on havainnollistettu IoT:n soveltuvuutta laajemmin eri ympäristöihin.



Kuva 10. IoT ja sen monipuolinen hyödynnettävyys eri osa-alueilla (Avesand ja muut, 2014).

Kuvasta 10 huomataan, että IoT mahdollistaa monien sovellusten ja laitteiden sulauttamisen yhteen hyödyntäen pilvipalvelua. IoT:n tarkoitus ei ole olla uusi internet, vaan pikemminkin kehittää ja hyödyntää jo voimassa olevaa. Vaikka tässä diplomityössä keskitytään IoT:n mahdollisuuksiin teollisuusautomaatioissa, on kuitenkin hyvä tiedostaa sen laajat hyödyntämismahdollisuudet eri toimialoilla. Teollisuus- ja automaatioalojen lisäksi esineiden internetiä on mahdollista hyödyntää mm. logistiikan, rakentamisen ja terveydenalan sektoreilla.

Yhtenäisen teknisen ekosysteemin kehittyminen tuo mukanaan datan ja liiketoiminnan kasvun. Yhtenäistyvän IoT-tekniikan seurauksena dataa on myös kerättävä paljon. Kentällä olevia laitteita tarvitsee lisäksi ohjata ja niihin on pystyttävä tarjoamaan mm. vaadittavat etäpäivitykset. Etäkommunikointi on tärkeä osa IoT:ta. Laitteita ja niiden muodostamaa dataa on isossa järjestelmässä paljon, joten on ensisijaisen tärkeää, että kerätty data on tarkkaa. Lisäksi on pystyttävä erottamaan isosta tiedon määrästä juuri se merkityksellinen osa (Baker, 2017). Kuvassa 11 on esitetty IoT:n ekosysteemi.



Kuva 11. Esineiden internetin tekninen ekosysteemi (Meola, 2018).

Kuvasta 11 huomataan, että datan siirtyminen, tallentaminen ja analysointi luovat ehdot IoT-pohjaisen järjestelmän toiminnallisuudelle. Pelkkä datan keruu ei ole teknisessä

ekosysteemissä arvokasta, vaan sitä täytyy myös analysoida jälkeen hyödyntää jollakin tapaa. Vasta datan hyödyntäminen – eli konkreettiset toimenpiteet – tuottavat arvoa.

Yleisesti IoT:n kehittyminen luo yritykselle taloudellista hyötyä muutosprosessin myötä sekä lisäksi resurssien monipuolisemman hyödyntämisen ja ennakoivan huoltotarpeen kehittymisen kautta. Taloudellista hyötyä muodostuu myös mahdollisista uusista liikeideoista tai palveluista (Al-Mashari & Del Giudice, 2016). Kilpailukykyisissä teollisuusyrityksissä on tärkeää keskittyä edellä mainittuihin asioihin ja keskeiseen päätöksentekoon. Tiedonsaataavuuden ja hallinnan avulla voidaan luoda teollisuusautomaatioyrityksille ominaisuuksia, joiden avulla on mahdollista parantaa yrityksen tuottavuutta.

M2M -protokolla

Laitteesta laitteelle (engl. machine to machine, M2M) protokolla tarkoittaa ratkaisua, joka sallii laitteiden välisen suoran kommunikaation, saman tyyppisellä ja tietyllä sovelluksella. Kyseinen protokolla ei ole riippuvainen internetistä, eli laitteiden välinen viestintä voi olla toteutettu joko langallisesti tai langattomasti. Laitteet tallentavat dataa ja jakavat sen keskenään muodostaen älykkään laitteisto- tai järjestelmäverkon. M2M-ratkaisun avulla loppukäyttäjän on mahdollista tarkastella ja tallentaa esimerkiksi tuotantojärjestelmästä kerättyä dataa ja hyödyntää sitä mm. varastotason seurantaan. Kyseistä protokollaa hyödynnetään monissa sovelluksissa ja pääosin sen tarkoitus on sama kuin IoT:n eli vähentää kuluja, samalla parantaen tuotettavuutta ja turvallisuutta (Avesand ja muut, 2014). Itse termi M2M on ollut olemassa jo vuosikymmeniä ja se on tunnetumpi televiestintäalalla.

Sekä M2M ja IoT ovat molemmat teknologisen kehityksen aikaansaannoksia. Niiden mahdollistamat soveltamismahdollisuudet ovat vain mielikuvituksemme rajoitteissa. Ilmiö on vasta yleistymässä laajemmin teollisuudessa. Internetin kehittymisellä on ollut suuri vaikutus yhteiskuntaan, ja se on luonut valtavaa kasvua koko teknologian saralla. Samalla kun internet on kehittynyt, on myös avautunut uusia mahdollisuuksia hyödyntää

mm. antureita, elektronisia tunnisteita ja toimilaitteita. Tämä tarkoittaa, että digitaalinen tunnistaminen ja tarkkailu on myös kehittynyt ja yleistynyt. Teknologian kehittymisen myötä esimerkiksi antureiden hinnat ovat alentuneet huomattavasti, ja sen myötä yhä useammalla on ollut mahdollisuus lähteä hyödyntämään niihin liittyvää tekniikkaa (Avesand ja muut, 2014).

Molemmat – M2M sekä IoT –hyödyntävät kommunikaatiota ja datan jakamista. Vaikka ne liittyvät läheisesti toisiinsa, niiden välillä on kuitenkin selviä eroja, eikä niitä pidä sekoittaa keskenään. Järjestelmässä voi esiintyä samanaikaisesti sekä M2M- että IoT-kommunikaatiota. Pääerot kyseisten protokollien välillä on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Pääerot IoT:n ja M2M:n välillä (Muokattu lähteestä, Electronics for You, 2019).

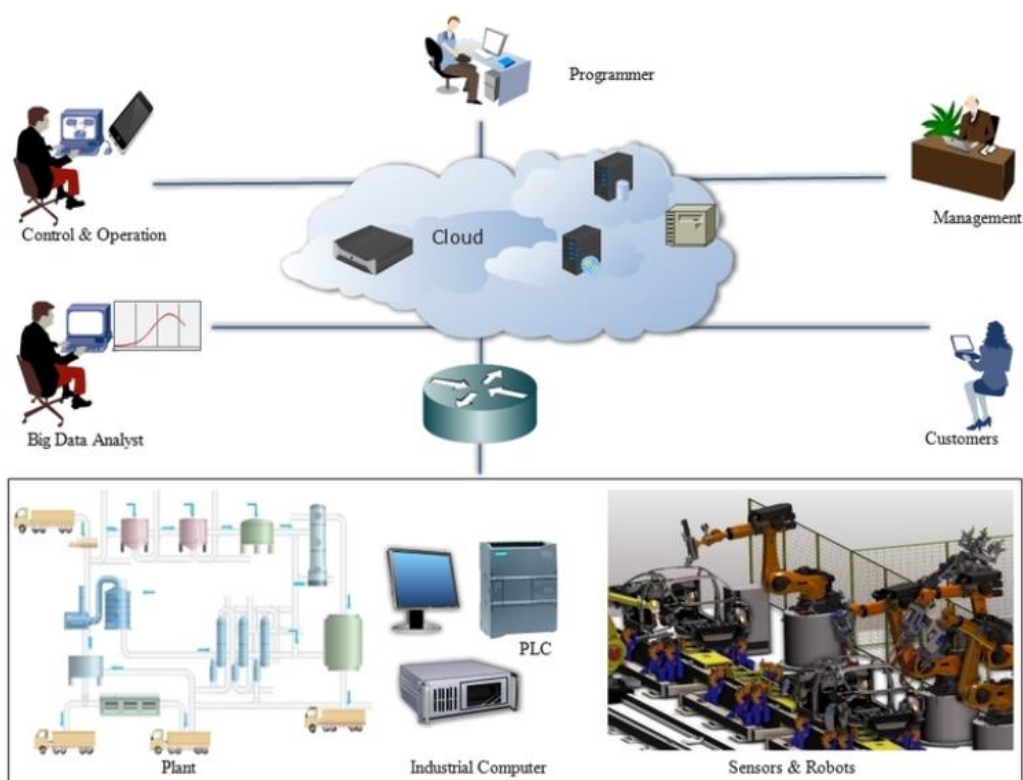
IoT	M2M
Pilvipalvelupohjainen kommunikaatio	Pisteestä pisteeseen kommunikaatio
Datan siirto riippuu IP-protokollasta	Hyödyntää tiedonsiirrossa mobiiliverkkoa
Vaatii internet-yhteyden	Ei ole riippuvainen internetistä
Useampi käyttäjä voi käyttää samanaikaisesti nettiä, johon laitteet on yhdistetty	Pääsääntöisesti kommunikaatio on yksi laite kerrallaan -tyyppistä
Ohjelmisto- ja laitteisto -pohjainen	Laitteisto -pohjainen

Taulukosta 3 havaitaan, että IoT soveltuu ainoastaan internetpohjaisiin ratkaisuihin ja hyödyntää kommunikaatioon ja tiedon tallennukseen pilvipalvelua. Laitteiston lisäksi IoT:ssa on mahdollisuus hyödyntää myös ohjelmistoja, mitä ominaisuutta ei ole M2M-protokollassa. M2M ei vaadi toimiakseen internetiä ja soveltuu tiedonsiirtoon laitteiden välillä, hyödyntäen tässä mobiiliverkkoa.

4.2 Esineiden internetin tuomat mahdollisuudet ja haasteet

IoT tuo mukanaan paljon mahdollisuuksia, mutta siihen liittyy myös monia haasteita. Yksi merkittävimmistä ongelmista esineiden internetissä on, että sen pitäisi sallia kaiken tyyppisten asioiden, kuten ihmisten ja tietokoneiden yhdistäminen keskenään, datan jakaminen ja monipuolinen kommunikointi eri alueilla. Nämä ovat ominaisuuksia, mutta tuovat mukanaan myös riskejä. Mietittäessä IoT:n turvallisuutta, yksityisyyttä ja luotettavuutta pitää pohtia, mitä uutta järjestelmässä on verrattuna jo oleviin sovelluksiin. Esineiden internet on kehittynyt omaksi itsenäiseksi polukseksi toteuttaa asioita ja sen pitäisi pystyä vastaamaan valtavaan ennustettuun kasvuun ja mahdollisiin ongelmiin (Gilchrist, 2017).

Kuvassa 12 on esitetty esimerkki IoT:n soveltamisesta tehtaassa, joka sisältää automaatiota.



Kuva 12. Fyysisten järjestelmien yhdistyminen pilviarkkitehtuuriin (Dou, Khan, Wu, & Xu, 2017).

Kuvasta 12 havaitaan, että yhteensovitetavuus eri roolien välillä on huomioitava teollisuusautomaatiossa. Isossa tehtaassa tapahtuu paljon asioita samanaikaisesti ja tämän takia olisi tärkeää, että saatu tieto olisi mahdollisimman monen toimijan hyödynnettävissä reaaliaikaisesti. Tiedon ollessa vain tietyillä henkilöillä voi todella sitä tarvitsevalta kuluu turhaa aikaa selvittelyyn. Esimerkiksi yrityksessä eräät henkilöt tietävät, että tiettyssä laitteessa oli ollut vika tiettyinä päivinä. Tämä ei tarkoita, että tieto on saavuttanut kaikki sitä tarvitsevat henkilöt. Tiedon ollessa saatavilla esimerkiksi yhteisellä pilvialustalla, säästytään tilanteilta, joissa tieto ei kulje yrityksen sisällä.

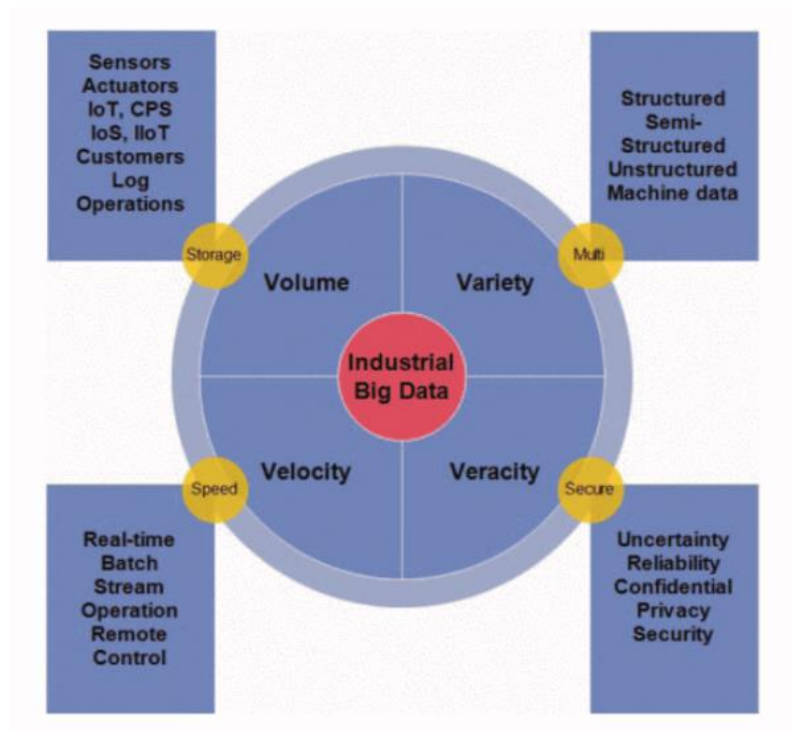
4.2.1 Big data teollisuusautomaatiossa

Massadatalla, tuttavallisemmin big datalla tarkoitetaan suurta ja monimutkaista datakokonaisuutta ja sen käsittelyä. Termiä on vaikea asettaa mihinkään tiettyyn rajaan esimerkiksi tallennuskapasiteetin perusteella, sillä sen sisältö vaihtelee käsiteltävän järjestelmän mukaan (Ellingwood, 2016).

Teollisuusautomaatio muuttuu jatkuvasti monimutkaisemmaksi ja sen myötä datan kokonaisuus kasvaa. Roboteista, antureista, langattomista laitteista yms. kerättävä data kokonaisuudessaan synnyttää automaatiojärjestelmän big datan. Kehittyvä datavolyymi ja modernit teknologiat saavat aikaan sen, että datan käsittelyyn on kehiteltävä ja otettava käyttöön erityisesti big datan analysointiin sopivia työkaluja (Dou ja muut, 2017). Tietojenkäsittely onkin yksi merkittävimmistä big datan mahdollisuuksista ja dataa voidaan jollakin tavoin tulevaisuudessa hyödyntää. Dataa voi siis kerätä itse, mutta on myös tietoa, jota on mahdollista ostaa eri toimijoilta. Datan omistukseen liittyviin kysymyksiin ei aina ole selvää ratkaisua. Tästä seuraakin kysymys siitä, kuka oikeasti omistaa esimerkiksi yleisesti saatavissa olevan datan varsinkin tilanteessa, jossa monella toimijalla on olemassa oleva käyttöoikeus (Tiainen, 2015).

Teollisen big datan ominaisuudet ja haasteet

IoT itsessään hyödyntää suurta määrää tietoa, joka on kerätty ja koottu eri tyyppisistä laitteista. Kaikki data ei ole suoraan hyödynnettävissä, joten on kehitettävä tekniikoita, joiden avulla tieto saadaan muunnettua käyttökelpoiseksi. Big datan ominaisuuksia kuvataan nimellä "V:t" (Alissa ja muut, 2018). Kuvassa 13 on havainnollistettu nämä pääominaisuudet.



Kuva 13. Teollisuuden big datan malli (Dou ja muut, 2017).

Kuvassa 13 esitetyt V:t tarkoittavat ja pitävät sisällään:

- Nopeus (engl. velocity) viittaa datan käsittelynopeuteen ja se kattaa tiedon keräämisen, siirron ja prosessoinnin. Tieto on usein reaaliaikaista. Sovelluksen mukaan myös datan käsittelyyn kuluva aika vaihtelee. Tietyissä tapauksissa se on nopeaa ja toisissa tarvitsee hyödyntää reaaliaikaista käsittelyä, esimerkiksi analytiikkaohjelmaa (Alissa ja muut, 2018). Datan hallinta voi isossa toteutuksessa

olla hyvinkin hankalaa, sillä tietoa kertyy paljon ja sitä pitää myös pystyä käsittelemään ja tallentamaan oikein. Tiedonsiirto tarvitsee kehittyneitä, eli riittävän nopeaa kaistanopeutta. Laitteiden välinen hidas tiedonsiirto voi mm. aiheuttaa järjestelmään katkoksia, sillä usein laitteet ovat riippuvaisia toisistaan. Edellisellä laitteella ollessa viivettä, myös seuraava laite kärsii ongelmasta (Dou ja muut, 2017).

- Vaihtelevuus, (engl. variety) eli laitteiden keräämät erityyppiset tiedot. Teollisuudessa dataa syntyy pääosin kentällä olevista laitteista ja esimerkiksi ohjelmoitava logiikkaohjain käsittelee fyysistä dataa ja sähköisiä signaaleja. Järjestelmän sisäisten prosessien välillä datan on oltava samassa muodossa. Datan on oltava koneenkäyttäjille sellaisessa muodossa, että esimerkiksi etäyhteyden muodostava käyttäjä hyötyy siitä. Tietojen mahdollinen monimuotoisuus pitää tiedostaa ja pystyä käsittelemään johdonmukaisella tavalla. Teollisuus 4.0:n yksi tärkeimpiä konsepteja on se, että eri tyyppiset laitteet pystyvät kommunikoimaan keskenään (Dou ja muut, 2017).
- Totuus (engl. veracity) tässä yhteydessä tarkoittaa, että kerätty ja tallennettu data on oikeaa ja laadukasta. Dataan voidaan luottaa ja sitä on turvallista kerätä ja hyödyntää asiakkaan ja yrityksen näkökulmasta. Mahdollisuuksien mukaan erottaa vioittunut tai ei-toivottu tieto pois järjestelmästä (Alissa ja muut, 2018). Haasteen muodostaa se, että datan pitäisi olla niin luotettavaa, että sen perusteella on mahdollista tehdä suuriakin päätöksiä.
- Määrä (engl. volume) viittaa teollisuudessa eri tyyppisten tietojen määrään, joka on kerätty, tallennettu, haettu ja päivitetty useasta lähteestä. IoT:n kehittyessä myös laitteiden ja datan määrä kasvaa ja räjähdysmäisesti (Alissa ja muut, 2018). Dataa kertyy yhtäaikaisesti monesta eri sovelluksesta ja toiminnosta.

On myös olemassa edellä mainittujen neljän v:n lisäksi viides ”v” eli arvot (engl. values). Termillä viitataan siihen, kun dataa on kerätty paljon ja oikeellisesti, tulee tästä tiedon määrästä löytää juuri oikea ja tietty arvo. Etsinnässä hyödynnetään mm. erilaisia algoritmeja (Alissa ja muut, 2018).

Haasteita big datan hyödyntämiselle synnyttää myös se, että yrityksessä samaa dataa tarvitsee hyödyntää monessa eri muodossa. Yrityksen johto haluaa datan tulokset raportoituna, sitä ennen mm. ohjelmoijat hyödyntävät eri tietomuotoja kehittääkseen esimerkiksi palvelua, josta data on peräisin. Asiakkaat taas tarvitsevat johdolta datan esityksen ymmärrettävässä ja taas kerran eri muodossa esitettynä. Haaste onkin siis esittää ja hyödyntää samasta lähteestä oleva tieto monella eri tavalla moneen eri tarkoitukseen (Dou ja muut, 2017).

4.2.2 IoT ja osoitejärjestelmät

IoT:n kannalta yksilöllinen tunnistaminen on tärkeää, jotta sovellukset toimivat oikein. Tärkeitä ominaisuuksia yksilöllisen osoitteen luomisessa ovat mm. skaalautuvuus, luotettavuus, pysyvyys ja ainutlaatuisuus (Buyya, Gubbi, Marusic & Palaniswami, 2013). Laitteet tarvitsevat yksilöllisen osoitteen, jotta ne osaavat kommunikoida keskenään ja liittyä itsenäisenä kohteena osaksi kaikkien järjestelmän laitteiden muodostamaa kokonaisuutta (Alissa ja muut, 2018). IPv6-protokollaa on tutkittu sopivaksi IoT-sovelluksille, sillä nykyiset IPv4-protokollan osoitteet eivät pysty vastaamaan tulevaisuuden kasvavaan kysyntään. Uusi protokollakaan ei kuitenkaan ole suoraan täydellinen ratkaisu, sillä myös vanhemman protokollan, IPv4:n ja uuden IPv6:n laitteiden täytyy pystyä kommunikoimaan keskenään tulevaisuudessa (Ray, 2015).

4.2.3 IoT-laitteiden virransaanti

Energiaa pidetään tärkeänä resurssina IoT:n älylaitteille. Suurin osa IoT-laitteista saa virransa akuista tai hyödyntävät energiankeräystekniikoita, mistä seuraa, että laitteiden vir-

ransaantiin tulee kiinnittää erityistä huomiota. Tämän takia on mm. perusteetonta lähettää tarpeetonta dataa ja täten tuhata ylimääräistä energiaa. IoT:n kestäviä vaikutuksia ajatellen laitteiston energiankulutus on otettava huomioon jo suunnitteluvaiheessa. IoT-järjestelmässä akkukäyttöisiä ja langattomia laitteita kutsutaan nimellä node eli solmu-piste. Nämä laitteet luovat omalta osaltaan järjestelmälle haasteen, sillä tuhansien tai jopa miljoonien akkujen uusiminen ei ole pitkällä tähtäimellä toimiva ratkaisu (Alissa ja muut, 2018). IoT-alaan erikoistuneet tutkijat pyrkivät hyödyntämään akkuja ja paristoja joiden käyttöikä on entistä pidempi. Akkujen ja paristojen on hinta ei olekaan pääongelma tässä tilanteessa vaan se, että laitteet eivät aina sijaitse helposti huollettavassa paikassa. Vaihtoprosessi nimittäin sisältää sen, että täytyy aina lähettää fyysinen henkilö paikalle. Lisäksi komponentin akut on hävitettävä oikeaoppisesti (Alessi, 2018).

Yleisesti IoT-järjestelmän energiatehokkuuden saavuttamiseksi voidaan hyödyntää esimerkiksi yksinkertaisia viestintäprotokollia tai pienitehoisia radiolähetinvastaanottimia (Guan ja muut, 2015). IoT-pohjaisissa toteutuksissa on myös mahdollista hyödyntää energian keruuta (engl. energy harvesting) akkujen ja paristojen vaihdon vähentämiseksi. Nämä ovat kuluvia osia, joten ne rajoittavat laitteiston huoltovapautta. IoT-laitteiden virransaanti perustuu tällä hetkellä pääosin akkuihin. Joissain tapauksissa energian keruu mahdollistaisi myös laitteiden jatkuvan itsenäisen toiminnan. Kyseinen toimintatapa vähentäisi akkujen vaihtoon liittyviä kustannuksia, sillä kunnossapitotaakka vähenisi ja laitteiden käyttöikä olisi pidempi (Chang & Lee, 2015).

Energian keruu perustuu siihen, että hyödynnetään ympäristössä saatavilla olevia lähteitä. Lähteinä voi olla esimerkiksi sähkömagneettinen säteily tai jokin mekaaninen liike. Ympäristön lähteistä hyödynnetty teho muutetaan sähköenergiaksi. Ulkotiloissa sijaitseviin laitteisiin hyödynnetään usein aurinkosähkön keräykseen liittyvää teknologiaa. Monessa tapauksissa laitteet sijaitsevat kuitenkin sisätiloissa eivätkä ne altistu suoraan valolle. Sisätiloissa sijaitseviin laitteisiin voidaan soveltaa mm. radiotaajuisten signaalien

energian keräystä. Se perustuu siihen, että esimerkiksi radiotaajuinen (engl. radio frequency) sähkömagneettinen aaltoenergia muunnetaan sähköenergiaksi. Kyseinen toimintatapa on yleistymään päin (Jayakumar ja muut, 2016).

Energiavarastot tulevat usein mukaan toteutukseen, kun hyödynnetään energian keuruuta. Energiavarastot tuovat omalta osaltaan taas lisää kustannuksia toteutukseen. Useimmissa energiankeräystekniikoissa energia hyödynnetään siten, että se kerätään, varastoidaan ja vasta sitten syötetään itse laitteeseen. Tämän tyyppisessä toimintatavassa ongelmaksi muodostuu omalta osaltaan myös se, että toteutus vaatii jännitteenmuuntimia. Jännitettä muunnettaessa taas tapahtuu energiahäviöitä. Energianvarastointiin ja jännitteen muuntamiseen tarvitaan lisäkomponentteja, jotka taas tuovat lisähintaa toteutukselle (Chang & Lee, 2015).

Ympäristön energianlähteillä on erilaiset tehotehiheydet. Viime aikoina on esitelty monia uusiakin energiankeräystekniikoita, mutta IoT-järjestelmiin sopivat parhaiten erilaiset säteily- ja termosähköiset ratkaisut. Nykymetodeilla energian keräyslaitteet eivät riitä tuottamaan laitteiden energiantarvetta etenkin tiedonsiirtotilanteessa, jossa energiaa tarvitaan enemmän kuin valmiustilassa. Tämän takia monissa tapauksissa energian varastointi onkin edelleen välttämätön vaatimus järjestelmän toimivuuden kannalta. Ladattavia akkuja onkin alettu korvaamaan superkondensaattoreilla niiden korkean tehotehiheyden takia. Monia erilaisia akkutekniikoita IoT-järjestelmään on testattu ja testataan edelleen (Giaffreda & Somov, 2015). Taulukossa 4 on esitetty eri teknologioita IoT-laitteiden virransaantiin.

Taulukko 4. IoT-Laitteiden virransaantiteknologiat (Muokattu lähteestä, Giaffreda & Somov, 2015).

Teknologia	Edut	Haitat
Ei-ladattavat akut	Yhteensopivuus Hinta	Ekologisuus Vaihtaminen
Ladattavat akut	Uudelleen ladattavuus	Rajoitettu lataus-purku sykli Käyttökelpoinen energiankeruun avulla
Tulostettavat akut	Helppo valmistusprosessi Muokattava solu (jännite, koko, kapasiteetti) Ohut ja joustava	Voi vahingoittaa 40-50 °C:n lämpötilassa Ei riittävän kehittynyt teknologia
Puolijohdeakku	Helppo integrointi mikropiiriin Helppo rakentaa pienoiskoossa Ohut ja joustava	Pieni tehotiheys Ei riittävän kehittynyt teknologia
Superkondensaattorit	"Rajaton" lataus-purku sykli	Itsepurkautuminen
Energian keruu	Täydentää jatkuvasti energiavaroja	Ympäristön lämpötilasta riippuvainen (joissain tilanteissa) Vaatii ylimääräistä laitteistoa ja tehonsäätöä Ei riittävän kehittynyt teknologia

Taulukosta 4 havaitaan, että siinä mainitut IoT-laitteiden virransaantiteknologiat keskittyvät tällä hetkellä pitkälti eri tyyppisten akkuteknologioiden hyödyntämiseen. Taulukossa on esitetty myös eri teknologioiden edut ja haitat. Laadukkainta teknologiaa ei voi suoraan mainita, sillä toteutuksella on suuri merkitys esimerkiksi siihen, mikä lopulta on kannattavin.

4.2.4 IoT ja tiedonsiirtotekniikka

Lähetysväline tarkoittaa fyysistä reittiä, joka kuljettaa tiedot lähettäjältä vastaanottajalle. IoT-verkot hyödyntävät useita tiedonsiirtotekniikoita lähettää ja vastaanottaa dataa, esimerkiksi radiotaajuinen etätunnistus (engl. radio frequency identification, RFID), Bluetooth eli langaton tiedonsiirtotekniikka ja Sigfox, joka on esineiden internetiä varten kehitetty verkko. Lähetysvälineiden perinteiset ongelmat, esimerkiksi kaistanleveyden riittämättömyys ja korkea virhesuhde, esiintyvät myös IoT:ssa. Eri lähetystekniikat vaativat eri ominaisuuksia. Optimoitu tiedonsiirtotekniikka on haasteellista saavuttaa, mutta auttaa ylläpitämään ja pidentämään verkkojen ja siihen liitettyjen laitteiden käyttöikä (Alissa ja muut, 2018).

4.2.5 IoT-järjestelmän turvallisuus

Internetin kehittyessä turvallisuusongelmat ovat olleet aina vahvasti esillä ja niin myös IoT:ssa yksityisyys, turvallisuus ja luotettavuus ovat järjestelmän toimivuuden kannalta välttämättömiä. Monet IoT-laitteet ovat rajoitettuja ja toimivat pienellä teholla. Tämä tarkoittaa, että aiemmin sovelletut turvallisuusratkaisut eivät ole suoraan hyödynnettävissä IoT-järjestelmässä. IoT:ssa, kuten uuden luomisessa yleensäkin keskitytään usein vain siihen, että saadaan järjestelmä toimimaan. Tällöin unohdetaan, että vaikka tavoiteltu toiminnallisuus on saavutettu, on turvallisuusvaatimukset unohdettu. Kyseinen toimintatapa lisää järjestelmän haavoittuvuutta ja altistaa hakkerointi- ja hyökkäysyrityksille. Tulevaisuuden IoT järjestelmä sisältää paljon dataa ja onkin vaarana, että salaiseksi tarkoitettuja tietoja varastetaan tai palveluun kohdistetaan esimerkiksi palvelunestohyökkäys (engl. distributed denial of service, DDoS) (Alissa ja muut, 2018).

Tärkeimmät IoT:n turvallisuushaasteet ovat Alissan ja muiden (2018) tutkimuksen perusteella:

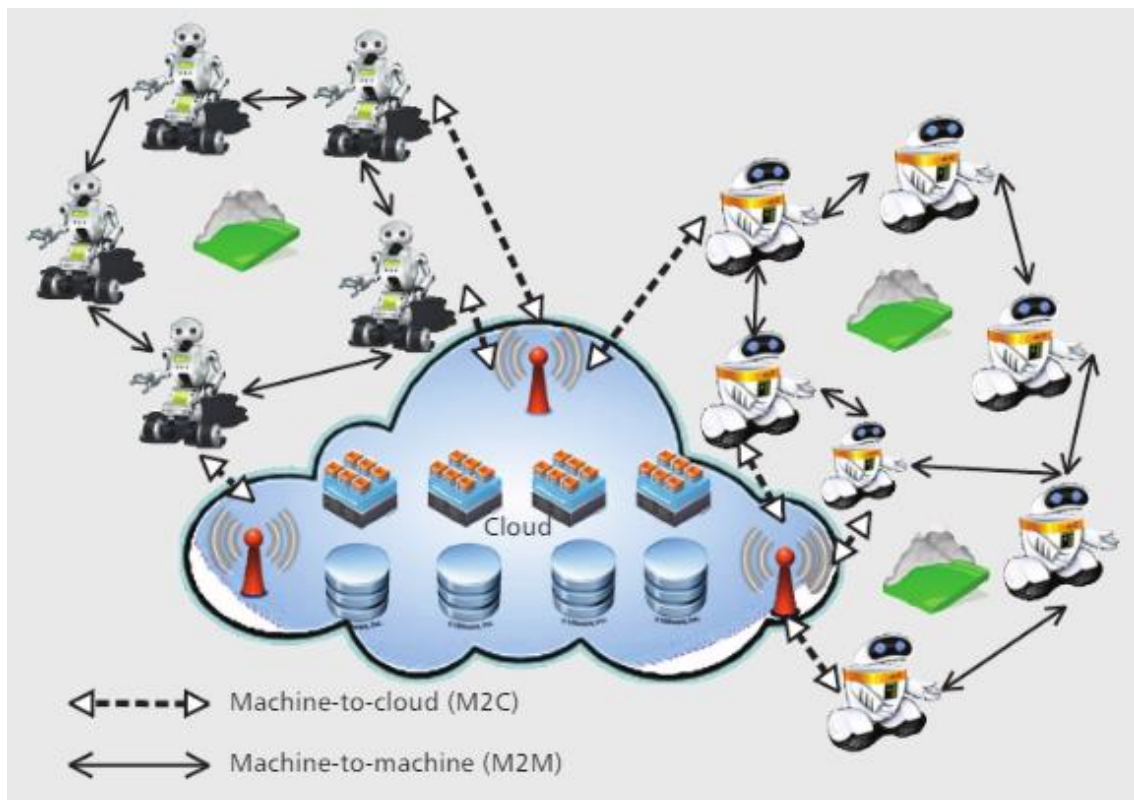
- Tiedon suojaus ja yksityisyys. Tarvitaanko uusi laki suojaamaan ja kontrolloimaan esimerkiksi sovellusten keräämää arkaluontoista dataa. Tämän takia yksilölliset osoitteet ja automaattinen kommunikointi nousevat tärkeinä tekijöinä esiin yksityisyyskysymyksissä.
- Luotettavuus, jokainen IoT-laite yhdistetään internetiin ja se tarkoittaa, että käytännössä ne ovat kaikki haavoittuvaisia. Mahdollisia riskejä on siis järjestelmässä paljon. Voidaanko mitenkään varmistaa, että kokonaisuus on aina luotettava? Tietojen validointi ja todentaminen ovat tärkeitä tekijöitä, sillä data ei saa muuttua matkalla päätepisteeseensä (Alissa ja muut, 2018).

4.2.6 Pilvirobotiikan hyödyntäminen robottijärjestelmässä

Pilvirobotiikan tavoitteena on pystyä yksinkertaistamaan esimerkiksi laskenta-, tallennus- ja viestintäresursseja siirtämällä kerättyä dataa pilveen ja näin vähentää yksittäisten

robottien kuormitusta samalla pidentäen sen käyttöikä. Näillä toimenpiteillä saadaan pilviarkkitehtuurista joustavampi. Itse pilvirobotiikassa pilvi on järjestelmän aivot. Tulokset ja data saadaan mm. verkkoteknologiaa hyödyntäen, mutta tehtävät käsitellään edelleen erikseen (Li ja muut, 2016).

Pilvirobotiikka ja usean robotin järjestelmät hyödyntävät langatonta viestintäteknologiaa ja muodostavat yhteistoiminnallisen verkon. Kyseisen verkon avulla on mahdollista kerätä tietoa ja dynaamisesti jakaa resursseja aseteltujen työvaatimusten perusteella. Tietojenvaihdon vuoksi robottien ja laitteiden päätökset ovat yhä yhtenäisemmät. Normaalissa järjestelmässä tiedonpuute voi johtaa esimerkiksi tuotannon viiveisiin, mutta pilvirobotijärjestelmää hyödyntäen nodet pystyvät siirtämään tehtäviä laitteelta laitteelle. Kyseisen toimintatavan avulla robottien ja laitteiden suorittamat työtehtävät ovat tehokkaampia (Li ja muut, 2016). Kuvassa 14 on esitetty pilvirobotiikan keskeinen ajatus.



Kuva 14. Pilvirobotiikan periaate (Hu, Tay & Wen, 2012).

Kuvasta 14 havaitaan, että robotit kommunikoivat siis keskenään M2M-tekniikkaa hyödyntäen ja lisäksi niillä on mahdollisuus jakaa tietoa pilveen (machine to cloud, M2C) kommunikaation avulla. Kyseinen järjestelmä on hyödyllinen toteutuksissa, joissa robottien on tarpeellista keskustella keskenään ja robotit ovat toisistaan kommunikaatioetäisyydellä. Kaikissa sovelluksissa robotit eivät hyödy toiselta robotilta saamallaan tiedolla. Silloin ne toimivat itsenäisesti ja suorittavat toimenpidettä, joka on toisista roboteista riippumaton. Esimerkiksi Cimcorpin portaalirobotit eivät kommunikoi toisten, automaatiojärjestelmään liitettyjen robottien kanssa.

Nykyisen pilvipohjaisen järjestelmän keskeiset ongelmat ja haasteet ovat eri laitteiden ja robottien tiedonvaihto keskenään. Erityisesti datan vieminen pilveen lisää järjestelmälle asetettavia vaatimuksia pilven turvallisuuden näkökulmasta (Li ja muut, 2016).

4.2.7 Laitteiston huollon tarpeen ennakointi ja kunnonvalvonta

IoT mahdollistaa laitteiden kunnonvalvonnan seurauksen etänä. Kehittyneen teknologian avulla on mahdollista seurata laitteiden tilaa, esimerkiksi ennalta asetettujen kynnyksarvojen perusteella. IoT:ta hyödyntäen on mahdollista valvoa mm. toimivatko järjestelmän laitteet niille tarkoitetulla tavalla ja lisäksi tuottaa tietoa niiden huollontarpeesta. Laitteiden luotettavuus on myös otettu huomioon IoT-järjestelmässä. Tässä yhteydessä puhutaan luotettavuussovelluksista, jotka seuraavat järjestelmää kokonaisuutena ja havaitsevat esimerkiksi normaalista poikkeavat energiahäviöt (Boudreaux, Nixon & Wang, 2019).

Monissa järjestelmissä on laitteita, jotka ovat alttiita esimerkiksi konerikolle. Tällaisen tilanteen tapahduttua on siitä usein seurauksena tuotannon katkeaminen, kasvavat kulut ja mahdollisesti muodostuneet vaaratilanteet. Toimiva IoT-järjestelmä antaa varoituksen ajoissa, jos se havaitsee järjestelmässä jotain tavallisesta poikkeavaa. Ongelmaan pystytään näin reagoimaan ennen kuin laitteistoon syntyy vakavaa vauriota. Katkoksien väheneminen tarkoittaa samalla käyttöajan lisääntymistä. Teollisuudessa se siis tehostaa ja sitä myötä kasvattaa koko tuotantojärjestelmän tehokkuutta. Ennakoiva huollontarve on

myös yksittäisten laitteiden arvon kannalta tärkeä kehittämiskohde, koska myös laitteiden käyttöikä kasvaa sen myötä (Kranz, 2016). Koneerikkoa ennustetaan esimerkiksi hyödyntäen analyttiseen malliin perustuvia menetelmiä, jotka sisältävät eri tyyppisiä fyysikan lakeihin perustuvia yhtälöitä. Edellä mainittu menetelmä on mallipohjainen ja sen avulla on mahdollista tunnistaa mm. koneiden ja niiden osien halkeilua ja kulumista. Ennustavia kunnonvalvontamenetelmiä on olemassa monia muitakin, mm. dataan perustuva. Siinä esimerkiksi antureiden laitteista tuottaman tiedon perusteella pysytään tarkastelemaan järjestelmän ja sen sisältävien laitteiden kuntoa (Medhajer, Tobon-Mejia, Tripot & Zerhouni, 2012).

IoT:n tuomat etäpalvelut ja tuki lisäävät myös järjestelmän tehokkuutta ja vähentävät kuluja, sillä ongelmatilanteissa ei esimerkiksi tarvitse lähettää huoltomiestä paikalle, vaan tilanteita pystytään ratkaisemaan monissa tapauksissa internetin välityksellä etänä. Näin vähennetään mm. matkustamisen, olosuhteiden ja mahdollisten loukkautumisten kustannuksia. Kyseinen malli ei rajoitu pelkästään laitteisiin, vaan sitä voidaan hyödyntää myös laajemmin teollisuudessa esimerkiksi robotteihin ja ohjaimiin. Tilanteiden ratkaisut vaativat laajasti eri toimenpiteitä, joten tapaukset ovat aina ongelmakohtaisia (Kranz, 2016).

IoT:n myötä siis laitteista kerätty data auttaa kehittämään sitä hyödyntävän yrityksen sekä asiakkaan järjestelmää ja sen myötä myös laajentamaan ja luomaan uusia tarjottavia palveluita. Nämä ominaisuudet taas mahdollisesti vetävät puoleensa uusia kiinnostuneita asiakkaita. Myytävän tuotteen ei tarvitse aina olla fyysinen esine, vaan se voi olla esimerkiksi siihen liittyvä lisäpalvelu. Tieto ja data jo itsessään luovat yritykselle arvoa, sillä yhteistyökumppanit ja asiakkaat näkevät nämä usein palveluna ja ovat täten valmiita maksamaan asiaankuuluvasta ja reaaliaikaisesta tiedosta (Kranz, 2016).

4.3 IoT Cimcorpissa

Tässä alaluvussa perehdytään siihen, mikä on IoT:n nykytilanne Cimcorpilla ja miten sitä voitaisiin laajemmin hyödyntää tulevaisuudessa yrityksen toteutuksissa.

4.3.1 Datan keruu nykyisin Cimcorpilla

Esineiden internetin laajamittainen hyödyntäminen Cimcorpilla vaatii tulevaisuuden suhteen ratkaisujen miettimistä, sillä erityisesti rengasteollisuudessa asiakkaat kokevat datan viennin ja analysoinnin pilvipalveluun liian riskialttiina. Osa tiedoista on hyvinkin arkaluontoista, eivätkä tällaiset parametrit saa joutua väärin käsiin. IoT:n merkitys on kuitenkin tiedossa ja töitä tehdään sen eteen, että dataa pystyttäisiin hyödyntämään paremmin. Yrityksestä löytyy jo tiedon jakamiseen ja hyödyntämiseen tarvittava osaaminen, mutta ratkaisu, joka olisi mahdollinen useassa erilaisessa toteutuksessa, on vielä selvitysvaiheessa.

Asiakkaita on toisaalta paljon erityyppisiä ja esimerkiksi rengasteollisuuden ja elintarviketeollisuuden asiakkaat suhtautuvat hyvinkin erilaisesti mahdollisuuteen kerätä ja hyödyntää dataa heidän järjestelmistään. Asiakkaan mukaan siis datan arkaluontoisuus vaihtelee ja tästä päästäänkin siihen, että toisten asiakasyritysten mielestä olisi jopa ihan suotavaa, että tietoa olisi mahdollista tallentaa pilveen. Ratkaisun olisi kuitenkin hyvä olla jollain tasolla vakioitu sen sijaan, että jokaista asiakasta kohden olisi mietittävä, miten datan kerääminen ja sen jälkeen hyödyntäminen pystytään toteuttamaan.

Tällä hetkellä asiakkaan toteutuksen tarkastelu on suoritettava VPN-yhteyden avulla (ks. kuva 1) ja sen avulla pystytään tarkastelemaan nykytilannetta. Historiadataa on mahdollista lukea, mutta datan määrä on rajattua. Kuitenkin esimerkiksi servojen tiloja on mahdollista tarkastella (Latva-Pukkila, 2019).

4.3.2 IoT:n mahdollisuudet tulevaisuudessa Cimcorpilla

Tulevaisuudessa ihanteellinen tilanne on, että asiakkaasta riippumatta Cimcorpilla olisi mahdollista analysoida ja hyödyntää dataa nykyistä laajemmin. Cimcorpilla tätä on jo alustavasti kartoitettu ja kuten edellä on mainittu, asiakkaat karttavat ainakin vielä tällä

hetkellä sitä ajatusta, että dataa siirrettäisiin pilveen. Todennäköisempää onkin, että tulevaisuuden ratkaisu tulee olemaan enemmän reunatasolla (engl. edge computing) eli dataa käsiteltäisiin ennen sen vientiä pilvipalveluun. Tiedon tallennusta varten olisi siis olemassa esimerkiksi oma paikallinen serveri ja pilvipalvelun sijaan datan käsittely hoidettaisiin siellä. Tämä ratkaisu olisi mahdollinen myös asiakkaille, jotka eivät pidä mahdollisena pilvipalvelun liittämistä osana järjestelmään datan keräämistä varten. Reunalaskennan etuja pilvipalveluun verrattuna on myös pienempi latenssi, eli nopeampi tiedonsiirtonopeus.

Ennen IoT-muotoiseen datan tallennukseen siirtymistä seuraava askel on siis hyödyntää ja kerätä dataa paikallisesti. Tämä mahdollistaisi jo robottisolujen historiallisen datan tarkastelun pitäen sisällään esimerkiksi energiankulutuksen ja muiden tarkasteltavien suureiden kehittymisen. Lisäksi mm. ongelmatilanteiden arviointi helpottuisi. Paikallisessa datan tallennustoteutuksessa etäyhteys muodostettaisiin edelleen VPN-yhteydellä. Ongelmaksi muodostuu, että tarkasteltava data sijaitsee asiakkaalla itsellään. Ei päästä siis vertailemaan eri tehtaiden välistä dataa ja mahdollista kehitystä (Latva-Pukkila, 2019).

Rengasteollisuudessa tuotanto on käytännössä aina käynnissä ja tämä tarkoittaa, että lyhyetkin tuotannon keskeytykset vaikuttavat suuresti siihen, paljonko valmista tavaraa lähtee tehtaasta. Isossa rengastehtaassa on lisäksi paljon eri toimijoita ja myös eri valmistajien laitteiden tulisi kommunikoida keskenään, jotta kyseinen laaja järjestelmä olisi yhtenäinen ja kommunikaatio toimiva.

Esineiden internetin yksi suurimmista hyödyistä yritykselle ja erityisesti rengasteollisuuden järjestelmiin olisi ennustava toiminnallisuus eli kunnonvalvonta. Laitteista kerättyä dataa analysoimalla olisi mahdollista havaita ajoissa esimerkiksi servo-ohjattujen toimilaitteiden virran poikkeavuudet ja täten pystyä ajoissa reagoimaan ja välttämään mahdollisilta haittavaikutuksilta. Tallennettu data auttaisi ennakoivan huollontarpeen arviointiin ja esimerkiksi harvinaisetkin järjestelmän mekaniikan vikaantumiset olisi mahdollista poistaa.

Kuvassa 1 esiteltiin katkoviivoilla esimerkki, miten tulevaisuudessa dataa voitaisiin kerätä keskitetysti. Useamman tehtaan datan ollessa samassa paikassa mahdollistuisi yrityksen data-analyysin kehittyminen. Laitteiston vikoihin olisi täten helpompi reagoida. Keskitetty datankeräys olisi tärkeä, koska samoja vikoja esiintyy eri asiakkailta ja datan perusteella pystyisi tarkastelemaan mm. ovatko viat aiheutuneet asiakkaan omasta toiminnasta.

Hyvä datan hyödyntämisen esimerkki tulevaisuuden Cimcorpin asiakastoteutuksessa on portaalirobotin vakiotyökierron tarkastelu ja se, että pystyttäisiin havaitsemaan, vaikka tarttujan virtojen nousun tapahtuvan aina tietyllä kuormalla ja ajohetkellä. Tällaisiin järjestelmän ongelmiin olisi huomattavasti helpompi reagoida, jos olisi saatavilla konkreettista dataa, minkä perusteella olisi mahdollista selvittää vikatilanteiden syyt.

J. Anttosen (2019) mukaan datan analysointi loisi mahdollisuuksia tuottaa asiakkaille lisäarvoa reagoimalla ja tiedostamalla näitä ongelmia ja lisäksi muodostamalla uusia tarjottavia palveluita. Palveluiden kehittäminen vaatii kuitenkin tulevaisuudessa taustatyötä, jotta osattaisiin kartoittaa oikeat palvelut, joita asiakkaat todella haluavat ja tarvitsevat. Asiakas muodostaa tällaisessa tilanteessa ensin Cimcorpille tarvevaatimuksensa ja yrityksen tehtävänä on vastata tarjottuihin haasteisiin ja pyrkiä myös toteuttamaan niitä. Tavoitteena olisi siis muodostaa analytiikasta asiakkaille myytävä tuote, josta molemmat osapuolet todella hyötyisivät

Parhaiten tämä pystyttäisiin toteuttamaan tiedostamalla ensin koko prosessin pullonkaula ja lähtemällä sen perusteella dataa hyödyntäen luomaan asiakkaalle palveluita tuotannon optimoimiseksi. Esimerkiksi rengasteollisuudessa pullonkaulana voidaan pitää tiettyä rengastuotantoa hidastavaa kohtaa järjestelmässä, jota parantelemalla myös asiakkaan tuottavuus kasvaisi. Parannuksien havaitsemiseen ja niihin reagoimiseen hyödynnettäisiin järjestelmästä kerättyä tietoa. Vaikka puhutaan automatisoidusta tuotan-

nosta, on järjestelmässä yleensä myös täysin manuaalisia ihmisten suorittamia työvaiheita. Parhaan lopputuloksen saamiseksi dataa olisi siis jollain tapaa pystyttävä keräämään myös manuaalisista prosessin vaiheista.

Pelkkä datan keruu ei tarjoa yritykselle itsessään hyötyä, vaan dataa on myös analysoidava. Analysoinnin perusteella taas tehdään asioita tai tiedetään mistä jokin aiheutui. Toimenpiteet, joita tehdään datan perusteella, muuttavat kerätyn tiedon konkreettisesti hyödyksi. IoT:n hyödyntäminen Cimcorpilla vaatisi myös sen, että useamman tehtaan dataa olisi saatavilla samalta alustalta, jolloin pystyttäisiin hyödyntämään sitä huomattavasti paremmin. Pelkästään tilanteesta, jossa vain yksi tai muutama tehdas tuottaisi dataa pilveen, ei saavuteta vielä merkittävää hyötyä. V. Latva-Pukkilan (2019) mukaan keskitetty datankeruu useammasta tehtaasta mahdollistaisi esimerkiksi yrityksen kehittää data-analyysiä ja sen myötä mm. auttaa kartoittamaan, minkä tyyppiset muutokset portaalirobotijärjestelmässä aiheuttavat laitteiston vikoja. Näin saavutettaisiin esimerkiksi tieto siitä, mitä vikoja on esiintynyt useammalla asiakkaalla ja mitkä viat ovat olleet yksilöllisiä. Tämä auttaisi mm. siinä, että pystyttäisiin kerätyn datan perusteella päättämään, onko kyseessä oman laitteiston vika vai asiakkaan omasta toiminnasta aiheutunut häiriö. Asiakkaille taas keskitetty datan keruu mahdollistaisi eri tehtaiden välisen vertailun mm. tuotanto- ja prosessitiedoista. Kokonaisuudessaan useammasta tehtaasta samaan paikkaan kerätty data loisi siis yritykselle näin mahdollisuuden arvioida paremmin, mitä ja miksi asiakkaan toteutuksessa on tapahtunut.

5 PORTAALIROBOTTIJÄRJESTELMÄN MITTAUKSET

Tässä luvussa esitellään sähkön laatu- ja energiamittauksissa käytettävä laitteisto ja ohjelmisto. Lisäksi kerrotaan, miten ja missä mittaukset toteutetaan.

Diplomityössä suoritettavat energiamittaukset pohjautuvat vuonna 2017 Cimcorpilla tehtyyn tutkimukseen kaksisuuntaiseen energiamittaukseen liittyen. Kaksisuuntaisella energiamittauksella tarkoitetaan robotin kuluttaman sähköenergian lisäksi robotin verkkoon takaisin syöttämää sähköenergiaa. Aiheeseen perehtymisen taustalla oli asiakkaiden halu tietää kohdeyrityksen laitteiden kuluttama energiankulutus järjestelmässä. Itse tutkimuksessa selviteltiin eri valmistajien mahdollisia sähköenergian mittaussvaihtoehtoja. Tuloksena oli, että monet mittarit ovat oikeastaan analysointilaitteita. Isossa tuotantojärjestelmässä Cimcorpin osuus koko toteutuksen energiankulutuksesta on suhteellisen pieni.

5.1 Mittausten tavoitteet ja toteutus

Sähköenergiamittaukset suoritettiin Cimcorp oy:n testirobottisolulla. Mittauskomponentit asennettiin robottisolun lattiakaapin päälähtöön ja lisäksi kahteen identtiseen robottilähtöön (ks. kuva 2, sivu 15). Ideana tässä on, että on mahdollista tarkastella robottisolun molempien robottien energiankulutusta erikseen. Robottisoluja toimitetaan myös vain yhdellä robotilla varustettuna, joten on mahdollisuus saada tietoa kyseisen solutyypin energiankulutuksesta.

Mittaustoteutuksen ominaisuus- ja kriteerivaatimukset olivat riittävä tarkkuus, sopiva hinta, kaksisuuntainen sähköenergian mittaussvaihtoehtojen ja helppo asennettavuus sähkökeskukseen. Testisoluun ei koettu tarpeelliseksi luoda erillistä ehtoa sille, että samalla laitteistolla pystyttäisiin mittaamaan myös sähkön laatua. Tulevaisuudessa tämä ominaisuus voisi kuitenkin olla tarpeellinen, esimerkiksi Intian kohteissa.

Diplomityötä varten oli tehty esiselvitystä eri valmistajien energiamittauslaitteiden tarjonnasta. Lopulta päädyttiin suoraan keskuksen asennettavaan Schneider Electricin energiamittauslaitteistoon. Laitteisto on helppo liittää yrityksen vakiokeskukseen ja lisäksi se on mahdollista yhdistää myös jo olemassa olevien projektien keskuksiin. Tämä on tärkeä ominaisuus, jos ja kun energianmittauksista muodostuu projektin mukana toimitettava optio. Energiamittauslaitteet eivät vie paljon tilaa sähkökeskuksessa ja kyseisiä mittauskomponentteja käytettäessä ei tarvita esimerkiksi erillisiä virtamuuntajia. Mittaus asennetaan kahteen eri testisolun, joissa molemmissa ajetaan Cimcorpin robottia MBR800+.

Tulevaisuuden suunnitelmana on siis laajentaa energiamittauslaitteisto mahdollisena lisäominaisuutena asiakasprojekteihin. Tiedossa on, että tällaisessa mittauksessa on kyse pelkästään Cimcorpin laitteiden sähköenergiankulutuksesta. Tämä tarkoittaa sitä, että tässä diplomityössä, eikä myöskään tulevaisuudessa Cimcorpin puolesta oteta kantaa muuhun tehtaan tuotannossa energiaa kuluttavaan osaan.

Yhtenä tavoitteena testisolun energiamittausten jälkeen on pystyä tarjoamaan kirjallinen dokumentti asiakkaille siitä, mikä on Cimcorpin portaalirobotin energiakulutus tietyllä työkierrolla ja esimerkiksi tietyllä elintarvikekuormalla. Näin saataisiin siis konkreettista mittausdataa energiankulutuksesta tukemaan robotin teknisiä tietoja ja asiakkaat saisivat tarkemman tiedon siitä, mitä voivat olettaa Cimcorpin portaalirobottien kuluttavan energiaa tietyllä ajanjaksolla.

Tämä diplomityö luo vain pohjan energianmittausten laajemmalle hyödyntämiselle Cimcorpilla. Tulevaisuudessa on mahdollista hyödyntää ja vertailla testisolulla saatuja tuloksia aitoihin, itse projektista paikanpäältä saatuihin tuloksiin. Pelkästään testisolussa tehtyjen mittausten perusteella saadaan jo hyödyllistä tietoa portaalirobottien energiakulutuksesta.

Sähkönlaadun mittaus

Cimcorpille on hiljattain hankittu Fluke 435 II-sarjan sähkönlaatuanalysointilaitteisto, jota haluttiin hyödyntää tässä diplomityössä. Sähkönlaadun mittaus päätettiin toteuttaa asiakkaan kohteessa, koska sieltä todennäköisemmin löytyisi enemmän laadullista poikkeamaa, kuin esimerkiksi Cimcorpin omasta testisolusta. Sähkön laatua mitattaessa on mittausajan oltava riittävän pitkä. Tässä työssä sähkön laatua mitataan standardin SFS-EN-50160:n suosittelema aika eli viikko.

5.2 Energiamittausjärjestelmän esittely

Cimcorpin testisolun energiamittaus toteutetaan Schneider Electricin energiamittauskomponenteilla. Mittauslaitteet saadaan kätevästi liitettyä jo keskuksessa olevaan kompaktikatkaisijaan sekä moottorinsuojakatkaisijoihin. Lisäksi toteutus edellyttää molempiin keskuksiin smartlink-keskittimen. Edellä mainittujen komponenttien lisäksi tarvitaan vielä yksi teollisuus-PC, joka hoitaa mm. datan käsittelyn ja tiedonsiirron pilvipalveluun.

5.2.1 Päälähdön energiamittaus

Pääkytkin eli kompaktikatkaisija varustetaan tässä tapauksessa energiamittauksen sisältävällä suojarielellä. Valmiina olevaan runkoon lisätään nyt uusi suojariele lisävarusteeksi. Näin ei myöskään ole tarvetta erilliselle virtamittaroinnille, koska energiamittarointi tulee suoraan katkaisijalta. PowerTag-NSX on langaton energiamittaus sensori ja se kommunikoi Zigbee-protokollan avulla keskittimelle. Suojarielellä saadaan mitattua päto- ja loisenergia ja lisäksi mm. loisteho, jännite ja virta. Päälähdöstä saadaan mitattua erikseen robottisolun kuluttama ja verkkoon takaisin syötetty energia. Lisäominaisuutena laitteella on hälytykset jännitehäviöistä ja ylivirrasta (Schneider Electric, 2019). Kuvassa 15 on esitetty käytössä oleva kompaktikatkaisija ja sen alapuolelle kiinnitettävä, energiamittauksella varustettu suojariele.



Kuva 15. Compact NSX NA kompaktikatkaisija ja PowerTag-suojarele (Ramapathi, 2019).

5.2.2 Robottilähtöjen energiamittaukset

Molempiin keskuksen moottorinsuojakatkaisijoihin liitetään langattomat Acti 9 Power-Tag -energiamittarit. Laitteessa on kuormituksen valvonta eli tieto kuormitushälytyksistä ja tieto jännitteen puuttumisesta. Laitteella on mahdollista mitata pätöenergia ja lisäksi mm. pätöteho, tehokerroin ja virrat vaiheittain (Schneider Electric, 2019a). Kuvassa 16 on esitetty edellä mainittu energiamittari.



Kuva 16. Acti 9 -energiamittari (Schneider Electric, 2019a).

Kuvassa 17 nähdään, miltä edellä esitellyt komponentit näyttävät sähkökeskuksessa. Ne eivät vie lisätilaa keskuksessa ja kytkentä jo asennettuna olevaan pääkytkimeen tai moottorinsuojakatkaisijaan on yksinkertaista.



Kuva 17. Energiamittauskomponentit asennettuna sähkökeskukseen.

5.2.3 Smartlink-keskitin

Energiamittauskomponenttien lisäksi lattiakaappiin on tiedonsiirtoa varten lisättävä langaton keskitin. Toteutukseen valittiin Acti 9 Smartlink SI D -keskitin. Modbus TCP/IP-protokollaa hyödyntäen saadaan kerätty data lähetettyä eteenpäin kenttä-PC:lle. Kuvassa 18 on esitetty testisolun keskukseen asennettava keskitin.



Kuva 18. Acti 9 Smartlink SI D (Schneider Electric, 2019b).

5.2.4 Teollisuus-PC

Toteutuksessa Ilot edge box -PC (ks. kuva 19) mahdollistaa sen, että data saadaan kulkemaan tietoturvallisesti pilveen. Laite mahdollistaa olemassa olevan koneen, esimerkiksi kolmannen osapuolen PLC-laitteiston, liittämisen pilveen. IoT gateway -ratkaisussa on "edge-kyvykkyys", eli ratkaisussa pystytään käsittelemään suurta määrää dataa ja siirtämään se jalostettuna eteenpäin. Tämä mahdollistaa vain tarpeellisen datan siirron, eli tiedon määrä pysyy kohtuullisena ja vain haluttu data siirretään. Laitteelle voidaan määritellä muuttujien lähetysväli ja arvot, esimerkiksi minimi- ja maksimiarvot. Näin saadaan kuitenkin muodostettua riittävä informaatioarvo datan tarkasteluun ja samalla pidettyä datan määrä maltillisena (Rantanen, 2019).

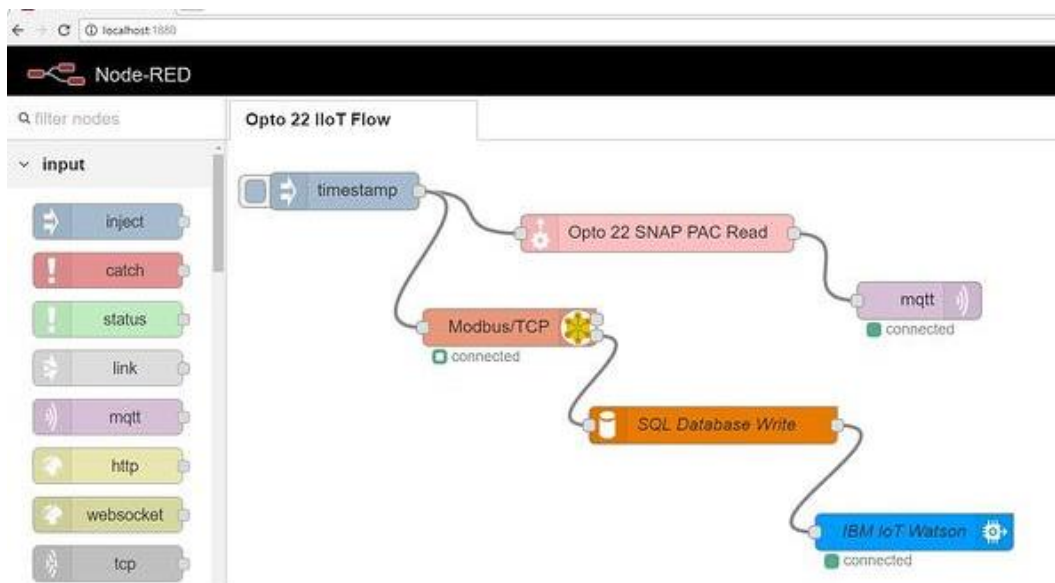


Kuva 19. Modulaarinen box-PC, Windows käyttöjärjestelmällä (Schneider Electric, 2019c).

Kyseinen teollisuus-PC lisätään testisolussa vain toiseen lattiakaappiin, koska saman laitteen avulla on mahdollista siirtää molempien keskuksien mittausdataa pilveen.

Node-RED

Teollisuus-PC:llä on mahdollista hyödyntää Node-RED ohjelmointiympäristöä. Node-RED taas mahdollistaa informaatioteknologian (engl. information technology, IT) ja toimintateknologian (engl. operational technology, OT) välisen liitännän, ilman olemassa olevan systeemin muokkaamista. Yleensä näillä järjestelmillä on erilliset sovelluksensa ja ohjelmointikielensä. Node-RED pitää sisällään selainpohjaisen visualisointityökalun, jolla saadaan tarkkailtua ja ohjattua yhdistettyjä JavaScript-pohjaisia funktioita eli nodeja. Node-RED:in käsitettä ”node” ei pidä sekoittaa internetiin yhdistetyn sähkölaitteen kanssa, josta käytetään myös samaa nimitystä. Järjestelmässä on useita yhteisön luomia nodeja, joita kaikki voivat hyödyntää. Ohjelmointiympäristö on helppokäyttöinen eikä vaadi aiempaa ohjelmointiosaamista. Node-REDiä voidaan pitää myös IoT:n suunnittelu-työkaluna (Schneider Electric, 2017). Kuvassa 20 on esitetty Node-RED visualisointityökalun selainnäkyä.



Kuva 20. Esimerkki Node-RED näkymästä (Newton, 2017).

Ohjelmointityökaluun on mahdollista lisätä valmiista kirjastosta halutut nodet ja yhdistellä niitä keskenään muodostaen ”flown”. Helpon käytettävyyden lisäksi käyttäjä välttyy itse koodin kirjoittamisen vaivalta.

5.2.5 Ecostruxure Machine Advisor -palvelualusta

Machine Advisor on Schneider Electricin, kone- ja laitevalmistajien tarpeisiin luotu pilvipalvelualusta. Pilvipalveluna se on helposti käyttöönotettava eikä vaadi erikoisempaa IT-osaamista. Järjestelmä on kehittynyt ja sitä on testattu monissa eri sovelluksissa. Käyttäjä voi itse räätälöidä siinä olevia näkymiä. Alusta mahdollistaa laitteiden etäseurannan, eli tässä tapauksessa Cimcorpin robottisolun keskuksissa olevien energianmittauskomponenttien. Tämän lisäksi on mahdollista seurata esimerkiksi laitteiden kuntoa ja hälytyksiä. Seurantaan soveltuu mikä tahansa tietokone tai vaikka tabletti. Hälytysten lisäksi on mahdollista kerätä suoritusdataa talteen. Tällä ominaisuudella on suuri hyöty, koska nähdään, miten konetta tai Cimcorpin tapauksessa robottia on todellisuudessa ajettu. Esimerkiksi takuukysymyksissä toiminto on käytännöllinen. Näkymiä on mahdollista räätälöidä siten, että asiakas näkee tietyt, ennalta määritellyt näkymät (Rantanen, 2019).

Edge Boxin kautta data saadaan siirrettyä itsenäisesti pilvialustalle, hyödyntäen push-tekniikkaa. Tämä tarkoittaa, että palvelin hoitaa itse datan lähettämisen, eikä siihen vaadita fyysistä käyttäjää. Kyseisen tyyppinen tiedonsiirto on paljon skaalautuvampi laajemmalle IIoT laitteistolle, verrattuna esimerkiksi SCADA-alustaan (engl. supervisory control and data acquisition). Tämä mahdollistaa esimerkiksi sähköposti-ilmoitukset. Pilvialustan havaitessa Cimcorpin tapauksessa robottisolussa jotain poikkeavaa toimintaa, lähettää se siitä tiedon sähköpostiin. Laitteiden tarkkailun hoitaa taustalla pyörivä raportointijärjestelmä (Rantanen, 2019).

5.3 Käytetty sähkönlaatu- ja energia-analysointilaitteisto

Sähkön laatua mitataan Fluke 435 II -sarjan sähkönlaatu- ja energia-analysointilaitteella. Laitteella pystytään mittaamaan kaikissa kolmessa vaiheessa ja nollassa perussuureiden lisäksi mm. harmonisia yliaaltoja ja välkyntää. SystemMonitor -toiminnon avulla on mahdollista tarkistaa, onko järjestelmä standardin mukainen (Fluke, 2019b). Tässä työssä mitaria hyödynnetään sähkönlaadun tarkastelun lisäksi myös portaalirobotin sähköenergiamittaukseen. Kuvassa 21 on esitetty kyseinen analysointilaitteisto.



Kuva 21. Fluken 435 II-sarjan sähkönlaatu- ja energia-analysointilaitteisto (Fluke, 2019b).

6 MITTAUSTEN KÄYTTÖÖNOTTO, TULOKSET JA HYÖDYNTÄMINEN

Tässä luvussa tarkastellaan diplomityön aikana Cimcorpin robottisolussa suoritettua energianmittauksen ja asiakkaan kohteessa suoritettua sähkönlaadun mittauksen tuloksia. Lisäksi luvussa käydään läpi mm. energianmittaukseen liittyvä mittalaitteiden käyttöönotto ja saatujen tulosten hyödyntäminen.

Yleisesti robotit kuluttavat energiaa paitsi liikkeessaan, niin myös ollessaan paikallaan eli valmiustilassa. Robotin paikallaoloaika riippuu suoritettavasta työtehtävästä. Robotin energiankulutukseen voidaan vaikuttaa esimerkiksi nopeuden ja kiihtyvyyden säätelyillä. On suositeltavaa, että robotin joutokäyntiaika olisi mahdollisimman pieni. Merkittävä osa teollisuusroboteista suorittaa vain nosta ja laske -tyyppisiä pystyliikkeitä. Tällaisessa tilanteessa on mahdollista hyödyntää kappaleen omaa liike-energiaa (Arm, Bastan, Benesl, Bradac & Kaczmarzyk, 2018).

Energiaoptimoitu robotti tuottaa myös vähemmän päästöjä. Energian optimointi liittyy neljännen teollisen vallankumouksen (engl. industry 4.0) konseptiin, jossa mm. mittausdataa pyritään hyödyntämään järjestelmän kokonaisvaltaiseen tehostamiseen. Pääongelmaksi yleensä tässä ajatuksessa muodostuu se, että tehtailla ei ole tarvittavaa tai riittävää dataa järjestelmän kuluttamasta sähköenergiasta. Energiankulutuksen vähentämiseen liittyy usein ajatuksia takaisinmaksuajasta, sillä yleensä toteuttaminen vaatii uusia laitehankintoja, ohjelmistoja ja aikaa. Nämä ovat kaikki tekijöitä, jotka lisäävät kustannuksia (Arm ja muut, 2018).

6.1 Energianmittauksen käyttöönotto

Energianmittauksien mittauslaitteita ja kerättävää dataa varten luotiin turvallisyysyistä täysin oma verkkonsa, jonka kautta data kulkee pilveen. Itse energianmittauslaitteiden

käyttöönotto aloitettiin yhdistämällä smartlink-keskitin verkkoon. Tietokoneen IP-osoitteen jakamista varten tarkoitettua verkkoprotokollaa (engl. dynamic host configuration protocol, DHCP) ollessa päällä ilmestyy PowerTag Link -keskitin näkyviin tietokoneen laitteissa (kuva 22).






Kuva 22. PowerTagLink-FD59 valmiina käyttöönottoon.

PowerTag -keskittimen asetuksiin määriteltiin manuaalisesti IP-osoite, aliverkko ja oletusyhdyskäytävä. Lisäksi asetuksista aktivoitiin käytettäväksi protokollaksi ethernet-pohjainen Modbus/TCP.

Asetusten määrittelyn jälkeen EcoStruxure Power commission -työkalulla päästiin konfiguroimaan PowerTag Linkin langattomasti löytämät laitteet, eli tässä tapauksessa pääkytkimeen ja robottilähtöihin asennetut energiamittarit. Konfiguroinnin voi suorittaa myös suoraan keskittimen asetuksista, mutta edellä mainitun ohjelman avulla näkee lisäksi, onko laitteessa viimeisin päivitys ladattuna. Laitteiden yksilöllinen nimeäminen tapahtuu kuvassa 23 esitettyssä näkymässä. Oikean laitteen löytämistä varten on ohjelmassa toiminto, jonka avulla tietty mittari saadaan vilkkumaan sähkökeskuksessa. Tämä helpottaa laitteiden nimeämisessä esimerkiksi tässä tilanteessa, missä keskuksessa sijaitsee kaksi samanlaista energiamittaria. Koska molemmissa keskuksissa on omat komponenttinsa, täytyy ne nimetä aina keskuksen mukaan, jotta tiedetään, minkä keskuksen laitteet ovat kyseessä. Esimerkiksi kuvassa 23 olevat mittauslaitteet on nimetty etuliitteellä C30, joka viittaa sähkökeskukseen, jossa kyseiset komponentit sijaitsevat.

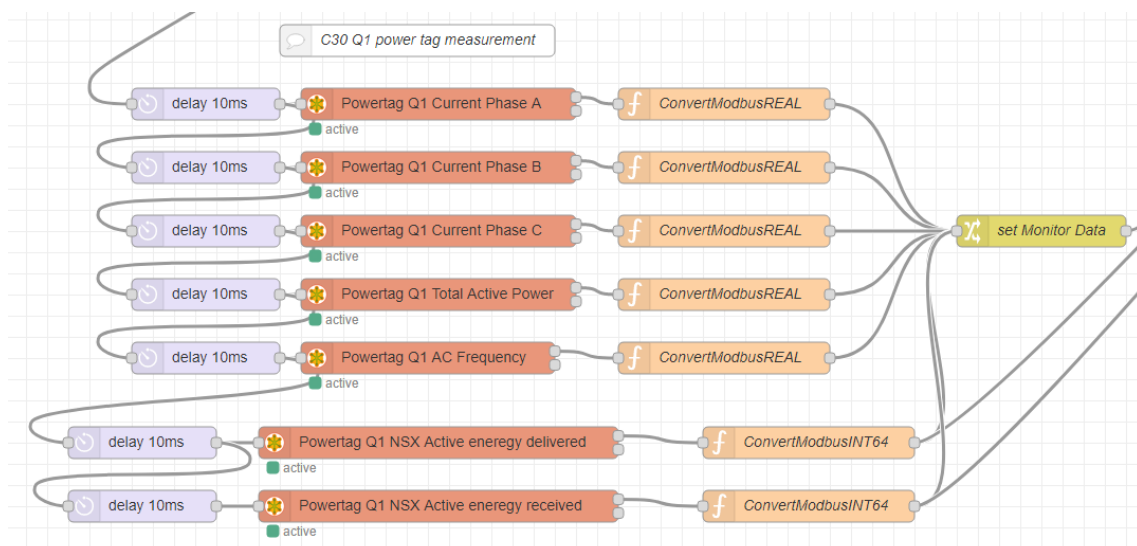
← Acti9 PowerTag Link D
Acti9 - PowerTag Link | RN191712179

WIRELESS METERS (3) SENSORS (0) IOs (0)

		LABEL *	USAGE	DEVICE ADDRESS ↑
1		C30Q4	Lighting ▼	6
2		C30Q3	Lighting ▼	3
3		C30Q1	Lighting ▼	1

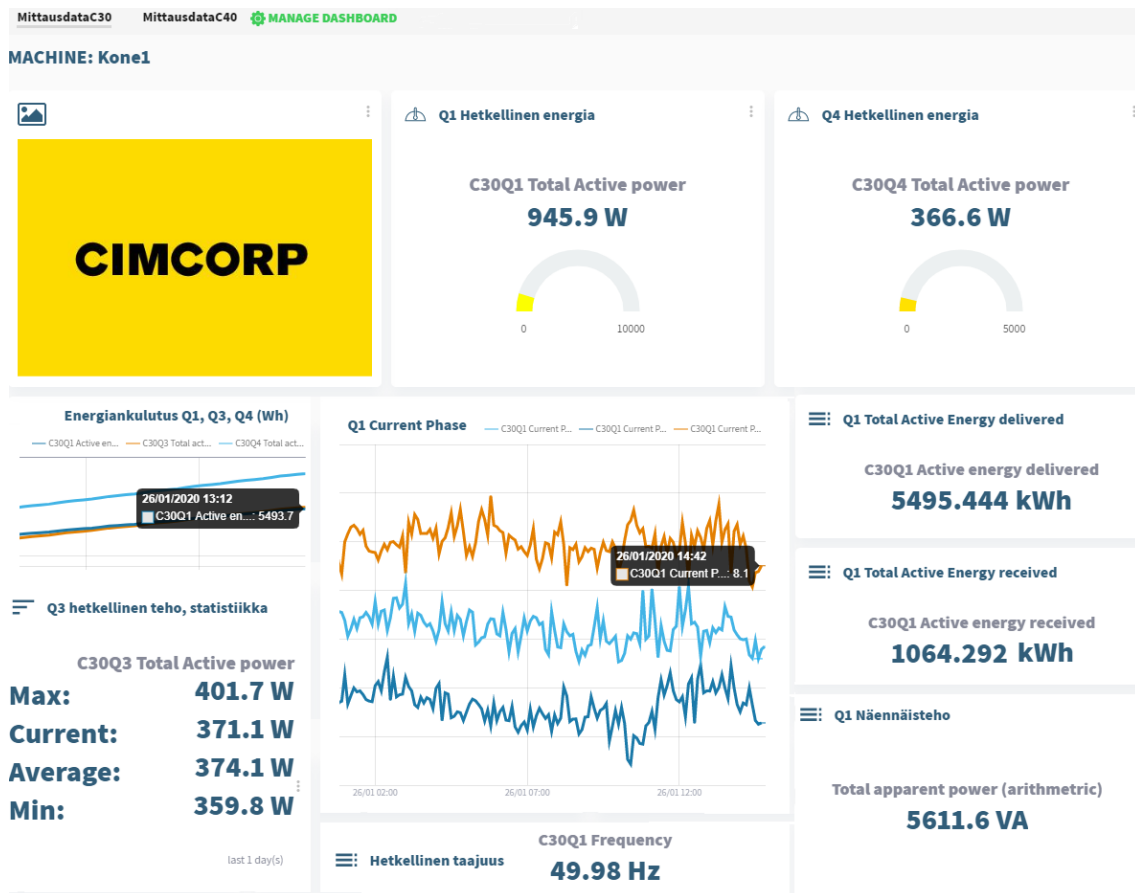
Kuva 23. Acti9 Powertag Link D:n näkymä laitteista.

Tässä vaiheessa laitteet ovat valmiina keräämään dataa ja ohjelmoitavaksi Node-REDin avulla. Mittausdatan siirtäminen pilveen vaatii Cimcorpin oman EcoStruxure Machine Advisor-sivun perustamisen. Machine Advisorin asetuksista tarvitaan kyseisen sivun yksilölliset osoitteet, joiden avulla tieto saadaan menemään Node-REDin kautta oikeaan pilveen. Node-REDiin määritellään asetuksia ja luodaan "flow", jonka perusteella laitteet siirtävät tiettyjä, itsemääriteltyjä arvoja pilveen. Kuvassa 24 havainnollistettu pääkytkimen mittausdatan siirtoa varten luotua ohjelmointia.



Kuva 24. Pääkytkimen mittausdatan Node-RED ohjelmointi.

Kuvassa 25 on havainnollistettu Cimcorpin Machine Advisor-näkymä.



Kuva 25. Cimcorpin Machine Advisor-näkymä.

Machine Advisorissa saa siis lisättyä Node-Redistä pilveen tuoduille muuttujille erilaisia näkymiä, eli widgettejä. Kuvasta 25 huomataan, että vaikka keskukseseen asennetut mittauslaitteet ovat pääasiallisessa käytössä energiankulutuksen seurantaan, on niillä kuitenkin mahdollista tarkkailla etänä yksityiskohtaisesti useita robottisolun suureita. Kuvassa 25 esitettyssä näkymässä on vain osa seurattavista muuttujista ja näkymistä, mutta se antaa hyvän käsityksen sen hyödynnettävyydestä. Machine Advisor -näkyminen on hyvin paljon valvomotyypinen, sillä esimerkiksi taajuuden, vaihevirtojen ja pätötehon kehittymistä voidaan seurata reaaliajassa sekä tarkastella dataa tietyltä ajanhetkeltä. Tämän tyyppisessä seurannassa ei ole järkeä pitää datan päivitysväliä koko ajan esimerkiksi se-

kuntitasolla, sillä se ei antaisi lisäarvoa ja loisi turhia lisäkustannuksia. Tarvittaessa päivitysväli voidaan asettaa aina mittauksen ajaksi tiheämmäksi, jos halutaan tarkastella mitausdataa tai muuttujien käyttäytymistä tarkemmin.

6.2 Energianmittaus ja tulokset

Energianmittaus suoritettiin erään asiakkaan määrittelemillä parametreilla Cimcorpin testirobotisolulla. Testiajo vastasi tyypiltään kapasiteettimittauksen yhteydessä suoritettavaa ajoa, jotta olisi mahdollista saada vertailukohtaa kapasiteetin ja sähkönkulutuksen välille. Asiakas määritteli työkierron, eli mistä robotti hakee ja mihin se vie tuotteet. Tämän lisäksi robotti kuljetti maksimikuormaa (~250 kg) ja maksimi pinonkorkeutta, eli kymmentä elintarvikelaatikkoo. Suoritetussa testiajossa ajettiin vain toista robotisolun roboteista; toisen ollessa koko ajan valmiustilassa. Liikettä suorittavaa robottia ajettiin maksiminopeudella. Mittauksen ja suoritettavan ajon kesto oli yksi tunti. Kuvassa 26 on esitetty testiajon tilanne, jossa robotti MBR800+ -robotti poimii laatikkopinoa.

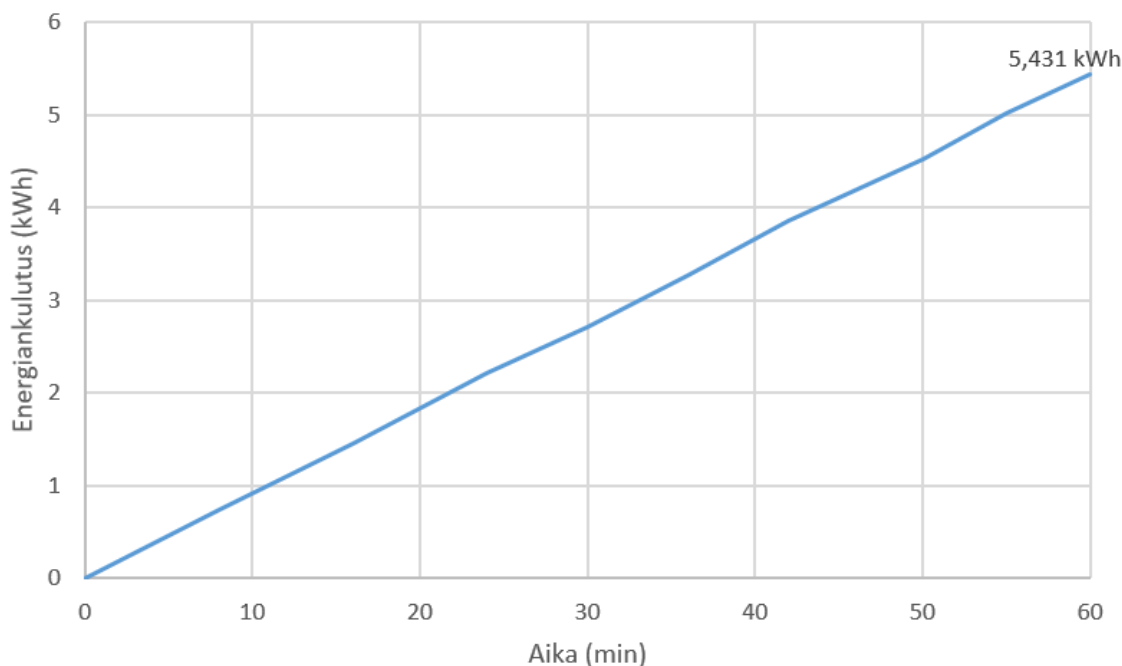


Kuva 26. Cimcorpin robotti MBR800+ suorittamassa työkiertoa

Energiankulutusta mitattiin keskuksen asennettujen Schneiderin laitteiden lisäksi aiemmin esitellyllä Fluke 435 II:lla. Näin saatiin vertailtavat arvot eri mittalaitteilla energiankulutuksesta ja takaisin sähköverkkoon syötetystä energiasta. Robottisolun sähköverkkoon takaisinsyöttämästä energiasta ei ollut aiempaa mittaustietoa saatavilla.

6.2.1 Schneiderin mittalaitteilla saadut sähköenergian mittaustulokset

Testiajon perusteella tulokset saatiin, että kulutettu sähköenergia oli yhteensä 5,431 kWh. Kuvassa 27 on tarkastellun tunnin ajalta hahmoteltu kuvaaja energiankulutuksen kehityksestä em. tilanteesta.



Kuva 27. Robottisolun energiankulutus ajan funktiona.

Verkkoon takaisin syötetty sähköenergian määrä oli samassa mittauksessa 1,074 kWh. Todellinen robottisolun energiankulutus (kWh) saadaan siis vähentämällä kulutettu ja verkkoon takaisin syötetty energia keskenään, eli $5,431 \text{ kWh} - 1,074 \text{ kWh} = 4,357 \text{ kWh}$. Mittaustuloksia tarkasteltiin myös robottilähdöistä erikseen. Mittausdatasta nähtiin, että toimenpidettä suorittava robotti kulutti tunnin testiajon aikana 3,67 kWh ja paikallaan (valmiustilassa) oleva robotti 1 kWh. Tämän mittauksen perusteella robottisolu kokonaisuudessaan syöttää takaisin verkkoon jopa noin 20 % käyttämästään sähköenergiasta. Tämä tietenkin vaihtelee aina suoritettavan ajon perusteella ja riippuu siitä, paljonko robotti jarruttaa.

6.2.2 Fluken analyysoijalla saadut sähköenergian mittaustulokset

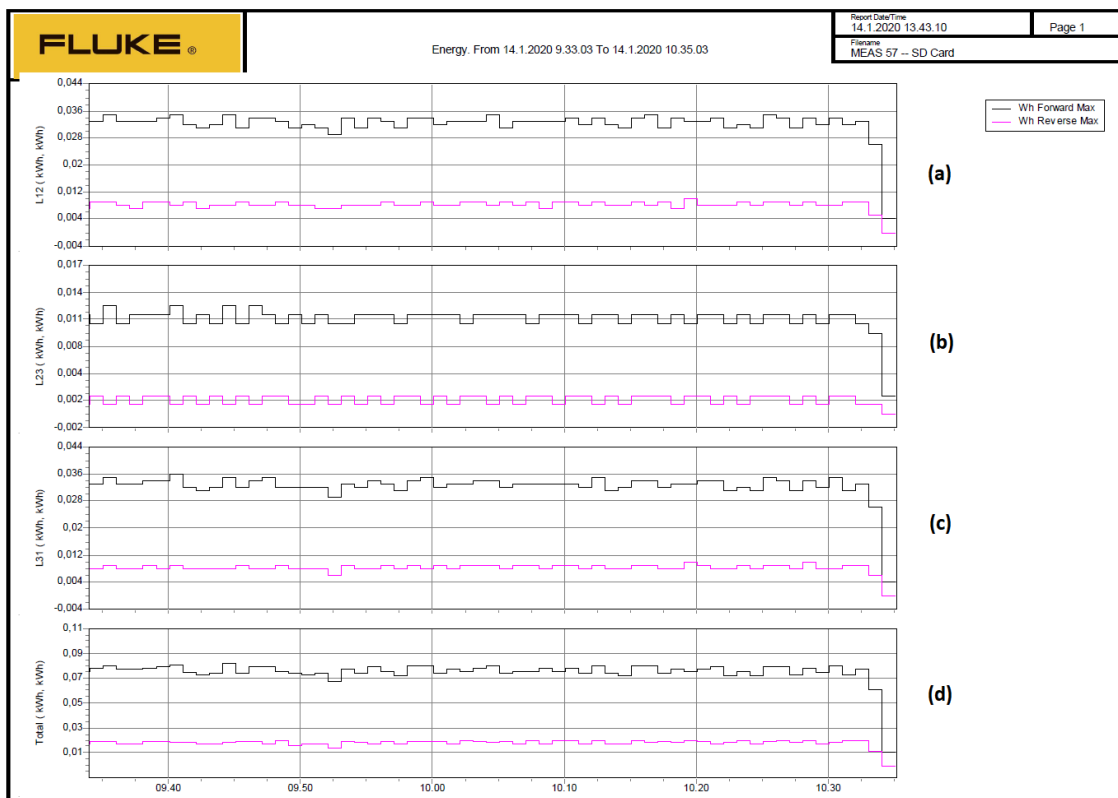
Samaan mittaukseen päätettiin kytkeä lisäksi jo aiemmin työssä esitelty Fluken sähkölaatu- ja energia-analyysoijaksi, jotta saataisiin vertailuarvoa. Kulutettu energia (kWh forward) oli tunnin aikana 4,734 kWh ja verkkoon syötetty energia (kWh reverse) 1,127 kWh. Mittauksesta nähtiin oleellisena lisätietona näennäisenergiankulutus, joka oli

9,951 kVAh testiajon aikana. Näennäisenergiaa ei mitattu Schneiderin laitteilla. Kuvassa 28 on esitetty Flukella saadut mittaustulokset.

POWER & ENERGY				
Para	1:02:18			
	L1	L2	L3	Total
kVAh	3.454	2.604	3.527	9.951
	L1	L2	L3	Total
kvarh	±1.738	±2.123	±1.818	±1.429
	L1	L2	L3	Total
kWh forw	2.033	0.665	2.041	4.734
	L1	L2	L3	Total
kWh rev	0.513	0.098	0.522	1.127
14/01/20 10:34:21 398V 50Hz 3Ø DELTA EN50160				
UP DOWN	TREND	EVENTS 0	STOP START	

Kuva 28. Kuvakaappaus sähkönlaatu- ja energia-analysaattorin näytöltä.

Kulutetussa energiassa syntyi mittausten välillä eroa, kun taas verkkoon syötetyt energiat olivat hyvin lähellä toisiaan. Keskiarvot näistä kahdesta mittauksesta ovat: kulutettu energia 5,08 kWh, verkkoon syötetty energia 1,1 kWh ja kokonaiskulutus ~ 4 kWh. Mittaustulosten erojen syynä voi olla monikin tekijä, esimerkiksi suhteellisen pienet virrat, ympäristön aiheuttamat häiriöt tai kytkentävirhe. Kuvassa 29 on esitetty kulutetun ja verkkoon takaisinsyötetyn energian käyttäytyminen testiajon aikana.



Kuva 29. Kulutetun (musta viiva) ja verkkoon takaisinsyötetyn (vaaleanpunainen viiva) sähköenergian käyttäytyminen ajan funktiona suoritetun testiajon aikana. Mittausjakso on tunti. Käyrät (a) – (c) ovat vaihekohtaisia energian arvoja (kWh) ja kuvan (d) käyrä on kokonaisenergia.

Kuvista nähdään robotin kiihdyttämisen ja jarruttamisen suhde. Kiihdyttäessä robotti kuluttaa energiaa ja jarruttaessa se näkyy verkkoon syötetyssä energiassa. Molemmat arvot pysyvät hyvin tasaisena tunnin ajan, sillä robotti suoritti samaa työkiertoa toistona tunnin ajan. Voidaankin todeta, että vaikka robotilla olisi ajettu useampi tunti, ei sen tuntiin kuluttamassa energiassa (kWh) olisi havaittu suuria vaihteluita.

6.3 Sähkönlaadun mittauksen tulokset

Diplomityön aikana suoritettiin sähkönlaadun mittaus asiakkaan kohteessa Cimcorpin robottiin MBR700+. Fluken 435 II -sarjan mittari kytkettiin kohteessa robotin lattiakaap-

piin ja mittariin aseteltiin viikon kestävä mittausaika. Mittauksessa tarkasteltiin sähkönlaatuun vaikuttavien suureiden käyttäytymistä. Mittausaikana robottia ajettiin täysiä työpäiviä.

Kyseisen mittauksen taustalla ei ollut asiakkaan puolesta mitään havaittua sähkönlaadusta poikkeavaa, vaan mittaus ja järjestelmän tarkastelu toteutettiin puhtaasta mielenkiinnosta Cimcorpin puolelta. Näin päästiin hyödyntämään yritykselle uutta mittaria ensimmäistä kertaa myös tämän tyyppisessä mittauksessa ja mittauksen samalla sivuten yhtä tämän diplomityön teoriaosioista. Kuten edellä mainitaan, sähkönlaadun ongelmat voivat olla piileviä ja siksi esimerkiksi tämän tyyppiset satunnaiset mittaukset eivät ole pahitteeksi, varsinkaan tässä tilanteessa, kun mittauksiin soveltuva laite löytyy jo yritykseltä. Yleensä sähkönlaatumittauksia suoritetaan kuitenkin vasta, kun järjestelmässä on havaittu vikoja. Laitteeseen on mahdollista määritellä useampi suure, kun halutaan mitata samanaikaisesti montaa asiaa. Tässä mittauksessa viikon aikana mitattiin mm. harmonisia yliaaltoja, välkyntää ja jännitteen ja taajuuden vaihtelua.

Mittauksen aikana toteutuksesta ei löytynyt mitään normaalista poikkeavaa, eli sähkönlaadun ongelmaa. Tämä onkin aina oletus, kun järjestelmä on toiminut häiriöttä. Mit-taustulokset siirrettiin tietokoneelle ja niitä tarkasteltiin PowerLog -ohjelman avulla. Sovelluksen avulla on mahdollista tarkastella kaikkea kerättyä mittausdataa ja lisäksi analysointorista sekä sovelluksesta on mahdollista nähdä tallennetut häiriöt.

Liitteen kuvassa 30 on esitetty taajuuden keskiarvo mittausjakson aikana. Taajuudessa on havaittavissa pientä vaihtelua, mutta arvot eivät ole normaalista poikkeavia ja lisäksi korkeampien vaihtelujen kesto on todella lyhyttä ja täten eivät vaikuta järjestelmän toimintaan. Viikon aikana mitattu maksimi- ja minimiarvot taajuudelle olivat 50,207 Hz ja 49,81 Hz. Taajuus on standardin SFS-EN 50160 mukaan hyvän laatuista, sillä se pysyy sen määrittelemässä rajassa, joka on $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ (ABB, 2000).

Liitteen kuvassa 31 on esitetty suoritettun jännitemittauksen viidennen harmonisen yliaallon ja kokonaissärön (engl. total harmonic distortion, THD) kuvaaja. Standardi SFS-EN 50160 määrittelee yliaalloille taulukon 5 mukaiset raja-arvot. Viidennen yliaallon mitattu keskiarvo vaihteli tässä mittauksessa eri vaiheiden välillä ja oli suuruudeltaan 3,62 – 4,35 %. Suurin sallittu arvo viidennelle harmoniselle yliaalolle on taulukkoon 5 nojaten 6 %. Järjestelmässä esiintyy siis yliaaltoja, mutta ne pysyvät standardin määrittelemissä rajoissa. Mittauksessa mitattiin lisäksi kolmatta, seitsemännettä ja yhdeksännettä yliaaltoa, mutta niitä esiintyi järjestelmässä vähemmän. Nekin pysyivät standardin määrittelemissä rajoissa. Taulukossa 5 on lueteltu kahden eri sähkönlaatustandardin määrittelemät maksiarvot jännitteen yliaalloille ja kokonaissärölle. Standardin EN-50160:n arvot koskevat alle 1000 voltin järjestelmiä ja standardin IEEE 519:n arvot on määritelty 69 kV asti.

Taulukko 5. Standardin SFS-EN50160:n ja IEEE 519:n määrittelemät harmonisten yliaaltojännitteiden ja jännitteen kokonaissärön THD:n sallitut arvot (Muokattu lähteestä, Fluke, 2015).

Parametri	IEEE519	EN50160
Jännitteen harmoninen kokonaissärö	8%	8%
3. jännitteen harmoninen yliaalto	5%	5%
5. jännitteen harmoninen yliaalto	5%	6%
7. jännitteen harmoninen yliaalto	5%	5%
9. jännitteen harmoninen yliaalto	5%	1.5%
11. jännitteen harmoninen yliaalto	5%	3.5%

Viikon aikana mitattu jännitteen kokonaissärö taas vaihteli keskiarvoltaan välillä 4,46 – 5,016 %. Suurin sallittu standardin SFS-EN-50160 määrittelemä THD:n arvo on 8 %. Kokonaissärö pysyy siis sallituissa rajoissa. Mitattu THD ja viidennen yliaaltojen määrä kertoo kuitenkin siitä, että järjestelmässä esiintyy jännitteen yliaaltoja, mutta ei niin paljon, että ne vaikuttaisivat järjestelmän toimivuuteen.

Liitteen kuvassa 32 on esitetty jännitteen keskiarvoista muodostettu kuvaaja viikon ajalta. Kuvaajasta huomataan esimerkiksi, milloin robotti on alkanut suorittamaan toimenpidettä, sillä jännite alkaa tämän seurauksena vaihdella huomattavasti enemmän. Viikon aikana havaittu jännitteen maksimiarvo oli 404 V ja jännite kävi alimmillaan 378 voltissa. Nämä ovat 400 V syöttöjännitteen järjestelmässä hyvät arvot, sillä esimerkiksi ABB:n TTT-käsikirjan mukaan jännitteen tulee pysyä 95 % ajasta ± 10 % nimellisjännitteestään. Lisäksi on mainittava, että edellä mainitut ovat mitattuja ääriarvoja ja suurimman osan ajasta jännite pysyy hyvin lähellä 400 voltia.

6.4 Energianmittauksen kehittäminen ja mittaustulosten hyödyntäminen

Diplomityössä mitattuja energiankulutusarvoja on mahdollista jo sellaisenaan hyödyntää. Asiakkaille voidaan ilmoittaa tehdyn testiajon aikana robottisolun kuluttama energiamäärä. Tällöin täytyy tietenkin mainita myös testiajon tarkemmat tiedot, eli aiemmin esitetyt kuorman suuruus, ajon kesto, yms. Saatujen tuloksien perusteella voidaan laskea oletettu sähkönkulutus pidemmältäkin aikaväliltä.

Jos diplomityössä käytetyt energianmittauskomponentit päätetään jatkossa sisällyttää ne toteutukseensa haluavien asiakkaiden robottisolun lattiakaappiin, olisi tulevaisuudessa asiakkaan kohteesta kerättyä energianmittausdataa mahdollista vertailla monella eri tavalla. Dataa voisi esimerkiksi vertailla testisolussa suoritettuja tuloksien ja asiakkaan kohteessa mitattujen arvojen kesken. Lisäksi voisi vertailla, kuinka suuria energiankulutuksen eroja samanlaisten robottisolujen välille voi muodostua. Tuloksia olisi mahdollista vertailla myös robotin teknisten tietojen perusteella laskettuihin arvoihin.

Energiankulutukseen vaikuttaa paljon, miten robottia ajetaan. Mielenkiintoista vertausdataa saisi siis siitä, kuinka lähelle päästään testisolulla suoritettulla mittauksella verrattuna tuloksiin asiakkaan kohteesta. Testisolussa tehtyjen mittausten perusteella ei voi

kuitenkaan vielä täysin yksilöllisesti vastata asiakkaalle kysymykseen, paljonko laitteenne kuluttavat energiaa vuodessa. Ennakkotietona ei Cimcorpilla ole tiedossa esimerkiksi nopeutta, millä robotteja ajetaan asiakkaan toteutuksessa ja robotin tarkkaa käyttöastetta.

Tietyn asiakkaan kohdetta tarkasteltaessa mittausaikojen tulisi olla pidempiä kuin tämän diplomityön mittauksissa. Useamman viikon kestäväällä mittauksella asiakkaan olisi mahdollista tarkastella ja havaita viikko-, päivä- ja tuntikohtaisia poikkeamia. Näin saavutetaisiin tarkempaa tietoa todellista energiankulutuksesta. Itse kohteesta mitatun energiankulutustiedon avulla asiakkaiden olisi mahdollista tarkastella takaisinmaksuaikaan vaikuttavasta yksilöllisemmin. Sähkönkulutuksen yksilöllinen informaatio auttaisi asiakasta muodostamaan käsityksen siitä, miten kulut muodostuvat ja jakautuvat tarkasteltavan aikavälin sisällä. Asiakas voisi myös tarkkailla energiankulutusta siitä näkökulmasta, että miksi se on tiettyinä päivinä ollut korkea tai matala. Sähkönkulutukseen asiakkaan kohdessa vaikuttavat esimerkiksi sesonkiajat, jolloin robotit myös kuluttavat enemmän energiaa.

T. Rajakankaan (2020) mukaan energianmittausten tuloksia voitaisiin hyödyntää myynnin ja markkinoinnin näkökulmasta erityisesti juuri takaisinmaksuaikojen laskennassa. Toimitettavalle toteutukselle luodaan usein asiakkaan toimesta takaisinmaksuaikataulu, jonka perusteella asiakas laskee automaatiojärjestelmän kannattavuutta verrattuna manuaaliseen toimintaan. Nyt tehtyjen energianmittausten perusteella asiakkaalle on mahdollista toimittaa mm. tarkempaa informaatiota robottisolun energiankulutuksesta esimerkiksi vuositasolla. Takaisinmaksuajan laskennassa vuosittaisella sähkölaskulla on suuri merkitys asiakkaalle, joten myös energiankulutuksen tiedostaminen mahdollisimman tarkkaan on oleellista. Sähkölaskun suuruutta voisi arvioida mitatun kulutuksen lisäksi asiakkaalta kysymällä ja täydentämällä ennakkotietoja, eli esimerkiksi viikoittaisen käyttöasteen ja maksimikapasiteetin perusteella. Sähkölasku vaikuttaa asiakkaan järjestelmän operatiivisen eli ns. juoksevan toiminnan (engl. operational expense, OPEX) aiheuttamiin kuluihin. Joihinkin toteutuksiin toimitetaan pelkkiä robottisoluja, joiden

energiankulutus saadaan Cimcorpin osalta laskettua kokonaan tämän diplomityön energianmittauskokonaisuuden perusteella. Suurin osa toimitettavista projekteista on kuitenkin laajempia ja tulevaisuudessa energiankulutuksesta tarvitsisi olla dataa saatavilla niin, että esimerkiksi kaikkien oheislaitteiden, kuten kuljettimien energiankulutusdata olisi mitattua. Näin pystyttäisiin arvioimaan koko toimitettavan automaatiojärjestelmän energiankulutus ja toimittamaan asiakkaalle tarkempia, mitattuun dataan pohjautuvia laskelmia.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA NÄKYMÄT

Tämän diplomityön suurin tutkimuskysymys oli tutkia ja kehittää Cimcorp oy:n robottisolun energiamittausratkaisu. Esiselvityksen jälkeen työssä päädyttiin Schneider Electricin mittauskomponentteihin niiden hinnan, käytettävyyden ja robottisolun vakioalatiakaappiin yhteensoveltuvuuden takia. Luotua energiamittausta tullaan hyödyntämään myös diplomityön jälkeen laajemmin ja tarkastelemaan eri tyyppisten ajojen energiankulutusta.

Diplomityön tekemisen ajalta voidaan tehdä mm. seuraavia johtopäätöksiä:

- Asiakaskunta suhtautuu tällä hetkellä mm. IoT:n ja erityisesti pilvipalvelun hyödyntämiseen hyvin konservatiivisesti, sillä se nähdään esimerkiksi tietoturvariskinä. Tämä luo haasteita, koska IoT yleistyy kovaa vauhtia ja Cimcorpin yrityksenä täytyy myös pysyä kehityksessä mukana. Jollakin tavalla dataa on siis pystyttävä tulevaisuudessa keräämään.
- Energiamittauksen osalta päästiin tavoitteeseen, eli luotiin toimiva robottisolun soveltuva mittauskokonaisuus ja täten hyvä pohja sen tulevaisuuden laajemmalle kehittämiselle kohdeyrityksessä.
- Mitattiin robottisolun energiankulutusta ja kohdeyritys sai hyödyllistä dataa portaalirobotin kuluttamasta sähköenergian määrästä.

Kuten edellä diplomityössä todetaan, tämä tutkimus luo vain pohjan tulevaisuuden laajemmalle energiamittausten käyttöönotolle ja laajentamiselle asiakasprojekteihin. Myöhempiä toimenpiteitä ja kehittämiskohteita tulevat diplomityön jälkeen olemaan:

- Energiamittauksen toteutus ja testaus asiakkaan kohteessa.
- Harva asiakas sallii datan tallentamisen pilveen. Näin ollen asiakkaan kohteeseen tulee toteutuksen mittausdatalle kehittää esimerkiksi oma ”mittausverkko”. Da-

tan keräämisen ja tallentamisen pitää olla asiakkaan näkökulmasta riittävän turvallinen. Kyseiseen mittausverkkoon kerättäisiin kaikki mittausdata, eli se eristetäisiin täysin asiakkaan omasta järjestelmästä.

- Datan tallennuksen vaihtoehtojen tutkiminen ja kehittäminen ilman pilvipalvelua. Pilvi mahdollistaa tulosten helpomman tarkastelun ja pitkäaikaiset mittaukset. On keksittävä varteenotettava ratkaisu, jos dataa kerätään vain paikallisesti. Dataa täytyy keräämisen lisäksi myös tarvittaessa pystyä analysoimaan ja sen on siksi oltava helposti kaikkien sitä tarvitsevien saatavilla.
- Mittausten laajentaminen myös oheislaitteisiin, eli esimerkiksi portaalirobottijärjestelmään sisältyviin kuljettimiin ja muihin kuin robottisolun robotteihin.

8 YHTEENVETO

Diplomityö tehtiin toimeksiantona Cimcorp oy:lle. Työn tarkoituksena oli tutkia kohdeyrityksen portaalirobotijärjestelmään soveltuvaa sähköenergian mittaustoteutusta. Mittauslaitteet tuli valita niin, että ne olisi mahdollista toimittaa asiakasprojekteihin vakio-komponenttina mittaamaan robotisolun energiankulutusta. Diplomityön aikana kohdeyrityksen testirobotisolulla testattiin valittujen energianmittauskomponenttien soveltuvuutta osana portaalirobotijärjestelmää. Robotisolussa suoritettiin myös asiakkaan määrittelemän työkierron sähköenergianmittaus kaksisuuntaisesti, eli robotin kuluttama ja sähköverkkoon takaisin syöttämä sähköenergia.

Diplomityön teoriaosuudessa esitellään kohdeyritys ja työhön liittyvä portaalirobotijärjestelmä yksityiskohtaisesti. Työ sisältää myös luvun, jolla pohjustetaan työssä jäljempänä suoritettavia portaalirobotijärjestelmän sähkömittauksia. Tähän liittyvässä osuudessa käydään läpi mm. energiankulutuksen ja huonon sähkönlaadun teoriaa. On tärkeä tiedostaa, mitä ongelmia huono sähkönlaatu voi aiheuttaa automaatiojärjestelmään ja pyrkiä suhtautumaan sähkönlaatuun aina mahdollisena ongelmana. Usein sähkönlaatuun aletaan kiinnittää huomiota vasta sen jo aiheutettua järjestelmään häiriöitä. Diplomityön aikana suoritettiin sähkönlaadun mittaus asiakkaan kohteessa tavanomaisessa käytössä.

Työn toisena suurena tutkimuskysymyksenä oli IoT. Diplomityön IoT-osuuden tavoitteena oli pohtia sen hyödynnettävyyttä ja mukanaan tuomia haasteita tulevaisuuden Cimcorpin automaatiojärjestelmässä. Teoriapohjustuksen jälkeen luvussa esitetään millä tasolla datan keruu kohdeyrityksessä on tällä hetkellä ja hahmotellaan, mitä se voisi olla tulevaisuudessa. IoT liittyy läheisesti myös työn pääaiheeseen, eli energianmittaukseen. Energianmittausdataa, kuten myös muuta automaatiojärjestelmän tietoa, tarvitsee tulevaisuudessa kerätä ja tallentaa asiakkaan kohteissa ja jos ja kun asiakkaat eivät salli pilvipalvelun hyödyntämistä, on tallennus toteutettava esimerkiksi paikallisesti.

Tässä diplomityössä suoritettujen energianmittausten perusteella saatiin hyödyllistä tietoa robottisolun kuluttamasta sähköenergiasta asiakkaan määrittelemällä testiajolla. Työn aikana suoritettiin yksi varsinainen testiajo, jonka tuloksia voidaan suoraan hyödyntää sellaisenaan asiakkaalle. Myös diplomityön jälkeen tullaan suorittamaan testiajoja, koska testisolussa on nyt siihen mahdollisuus. Testiajot tulevat poikkeamaan työkierron ja kuormiltaan toisistaan. Näin saadaan tietoa siitä, miten kuorma ja robotin ajonopeusprofiili vaikuttavat energiankulutukseen. Työssä käytetyn Machine Advisor -palvelualustan avulla voidaan seurata ja tutkia myös muiden kuin energiankulutuksen datan käyttäytymistä. Diplomityössä kehitettyä sähköenergianmittauskokonaisuutta voidaan tulevaisuudessa laajentaa ja kehittää. Energianmittauksia voidaan mm. laajentaa koko toimitettavaan automaatiojärjestelmään eli myös oheislaitteisiin. Lisäksi yksi kehittämisen kohde on datan kerääminen ja tallentaminen ilman pilvipalvelua, jotta kokonaisuus palvelisi myös asiakkaiden vaatimuksia ja tavoitteita nykyistä paremmin.

Lähteet

ABB TTT-käsikirja 2000-07. Luku 4: Sähkön laatu. ABB oy.

Alessi, B. (2018). Overcoming IoT's battery barrier with self-powered sensors. [Blogiteksti]. IoT Tech Expo Blog. Noudettu 2019-10-13 osoitteesta <https://www.iot-techexpo.com/2018/11/iot/overcoming-iots-battery-barrier-with-self-powered-sensors/>

Alissa, A., Absulsalam, M., Farhan, L., Kaiwartya, O., Kharel, R., & Quiroz-Castellanos, M. (2018). A Concise Review on Internet of Things (IoT): Problems, Challenges and Opportunities. Esitely konferenssissa: International Symposium on Communication System, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP), Budapest, Hungary. IEEE. doi: 10.1109/CSNDSP.2018.8471762

Al-Mashari, M., & Del Giudice, M. (2016). *Discovering the Internet of Things (IoT): technology and business process management, inside and outside the innovative firms*. Emerald Publishing Limited.

Anttonen, J. (2019). Technology director, Cimcorp oy. Henkilökohtainen keskustelu 22. syyskuuta 2019.

Arm, J., Bastan, O., Benesl, T., Bradac, Z., & Kaczmarzyk, V. (2018). *Methods to Decrease Power Consumption in Industrial Robotics*. 15th IFAC Conference on Programmable Devices and Embedded Systems, Ostrava, Czech Republic. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.07.165>

Avesand, S., Boyle, D., Fikouras, I., Holler, J., Karnouskos, S., Mulligan, C., & Tsiatsis, V. (2014). *From Machine-to-Machine to the Internet of Things: Introduction to a New Age of Intelligence*. Elsevier Science & Technology. 2014.

- Baker, J. (2017). *Internet of Everything: The IoT Market Is Projected to Expand 12x from 2017-2023*. Noudettu 2019-09-02 osoitteesta <https://hackernoon.com/internet-of-everything-the-iot-market-is-projected-to-expand-12x-from-2017-2023-175f845c2bcf>
- Bhattacharyya, S., Kling, W. L., & Myrzik, J. M. A. (2007). *Consequences of poor power quality - an overview*. 2007 42nd International Universities Power Engineering Conference, Brighton, 2007, pp. 651–656. IEEE. doi: 10.1109/UPEC.2007.4469025
- Bhattacharyya, S. (2011). Power quality requirements and responsibilities at the point of connection. [Väitöskirja, Eindhoven: Technical University of Eindhoven]. doi: 10.6100/IR712690
- Boudreaux, M., Nixon, M., & Wang, G. (2019). Toward Cloud-Assisted Industrial IoT Platform for Large-Scale Continuous Condition Monitoring. *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 6, pp. 1193–1205, June 2019. doi: 10.1109/JPROC.2019.2914021
- Brinksmeier, E., Hagendorf, O., Larek, R., Meyer, D., & Paweltta, T. (2011). A discrete-event simulation approach to predict power consumption in machining processes. *Production Engineering Research and Development*. doi: 10.1007/s11740-011-0333-y
- Buyya, R., Gubbi, J., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*. Elsevier. vol. 29, no. 7, pp. 1645-1660, September 2013. doi: 10.1016/j.future.2013.01.010

- Chang, N., & Lee, H. G. (2015). Powering the IoT: Storage-less and converter-less energy harvesting. *The 20th Asia and South Pacific Design Automation Conference, Chiba, 2015*, s. 124 - 129. IEEE. doi: 10.1109/ASPDAC.2015.7058992
- Cimcorp oy. (2017). *Technical Description of MBR700+*. Windchill-sivut [Yrityksen sisäinen dokumentti]
- Cimcorp oy. (2019). Cimcorp-konserni pähkinänkuoressa. Noudettu 2019-08-30 osoitteesta <https://www.cimcorp.com/fi/cimcorp/cimcorp-konserni>
- Desmond, P. (2014). Clearing up Confusion over 80% vs. 100%-rated Circuit Breakers. [Blogiteksti]. Schneider Electric blog. Noudettu 2019-11-12 osoitteesta <https://blog.se.com/datacenter/power-and-cooling/2014/06/12/clearing-confusion-80-vs-100-rated-circuit-breakers/>
- Dou, W., Khan, M., Wu, X., & Xu, X. (2017). *Big data challenges and opportunities in the hype of Industry 4.0*. 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC), Paris, 6s. doi: 10.1109/ICC.2017.7996801
- Doyle, A. (2018). How to Size a Circuit Breaker. *Hunker*. Noudettu 2019-11-13 osoitteesta <https://www.hunker.com/12291117/how-to-size-a-circuit-breaker>
- Electronics for You. (2019). What are the Differences Between M2M and the IoT. Noudettu 2019-09-03 osoitteesta <https://electronicsforu.com/resources/learn-electronics/difference-between-m2m-and-iot>
- Ellingwood, J. (2016). *An Introduction to Big Data Concepts and terminology*. Noudettu 2019-10-02 osoitteesta <https://www.digitalocean.com/community/tutorials/an-introduction-to-big-data-concepts-and-terminology>

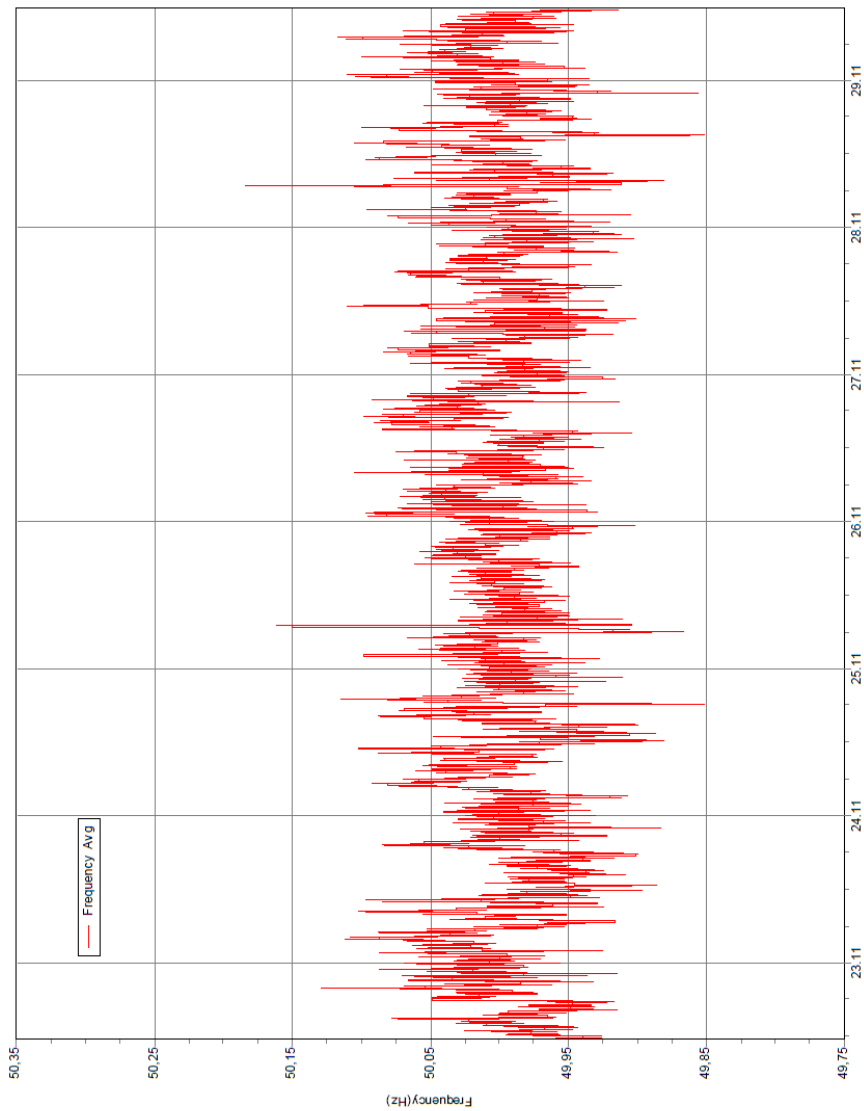
- Eurostat, (2019). Electricity price statistics. Noudettu 2020-01-18 osoitteesta https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Electricity_price_statistics#Electricity_prices_for_non-household_consumers
- Fluke. (2015). Harmonics Standards: What are they and how can you use them. [PDF-tiedosto]. Noudettu 2019-11-12 osoitteesta <https://www.instrumart.com/assets/Fluke-Harmonics-Standards.pdf>
- Fluke. (2019a). *What are voltage dips, swells and transients*. Noudettu 2019-09-04 osoitteesta <https://www.fluke.com/en-us/learn/best-practices/measurement-basics/power-quality/voltage-sags-dips-transients>
- Fluke. (2019b). Fluke 435 II -sarjan sähkönlaatu- ja energia-analysointilaite. Noudettu 2019-10-19 osoitteesta <https://www.fluke.com/fi-fi/tuote/sahkotestaus/sahkonlaatu/435-series-ii>
- Fuchs, E., & Masoum, M. (2008). *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*. Elsevier Science & Technology, 2008.
- Giaffreda, R., & Somov, A. (2015). Powering IoT Devices: Technologies and Opportunities. *IEEE IoT Newsletter*. Noudettu 2019-10-9 osoitteesta <https://iot.ieee.org/newsletter/november-2015/powering-iot-devices-technologies-and-opportunities.html>
- Gilchrist, A. (2017). *IoT Security Issues*. DEG Press.
- Guan, Y., Kamalinejad, P., Leung V., Mahapatra, C., Mirabbasi, S., & Sheng, Z. (2015). Wireless energy harvesting for the Internet of Things. *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 6, s. 102 – 108, June 2015. doi: 10.1109/MCOM.2015.7120024

- Harris, D., & Harris, S. (2016). 1 – From Zero to One. Digital Design and Computer Architecture. *Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800056-4.00001-7>
- Hu, G., Tay, W-P., & Wen, Y. (2012). Cloud robotics: architecture, challenges and applications. *IEEE Network*, vol. 26, no. 3, s. 21 – 28, May-June 2012. doi: 10.1109/MNET.2012.6201212
- Härmä, O. (2017). Sähkön laadun mittaus ja valvonta kantaverkossa [diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto]. Trepo. <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tty-201710202037>
- Ignatova, V. (2015). Why Poor Power Quality Costs Billions Annually and What Can Be Done About It. [Blogiteksti] Schneider Electric blog. Noudettu 2019-09-02 osoitteesta <https://blog.se.com/power-management-metering-monitoring-power-quality/2015/10/16/why-poor-power-quality-costs-billions-annually-and-what-can-be-done-about-it/>
- Jayakumar, H., Kim, Y., Lee, W. S., Raghunathan, V., Raha, A., & Sutar, S. (2016). Energy-efficient system design for IoT devices. *2016 21st Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC)*, China, Macau, 2016, s. 298 – 301. DOI: 10.1109/ASPDAC.2016.7428027
- Kranz, M. (2016). *Internet of Things: Implement New Business Models, Disrupt Competitors, Transform Your Industry*. John Wiley & Sons, Incorporated.
- Latva-Pukkila, V. (2019). Senior product engineer, Cimcorp oy. Henkilökohtainen keskustelu, 26. syyskuuta 2019.
- Li, D., Tang, S., Vasilakos, A., Wan, J., Wang, S., & Yan, H. (2016). Cloud robotics: Current status and open issues. *IEEE Access*, vol. 4, s. 2797 – 2807, 2016. doi: 10.1109/ACCESS.2016.2574979

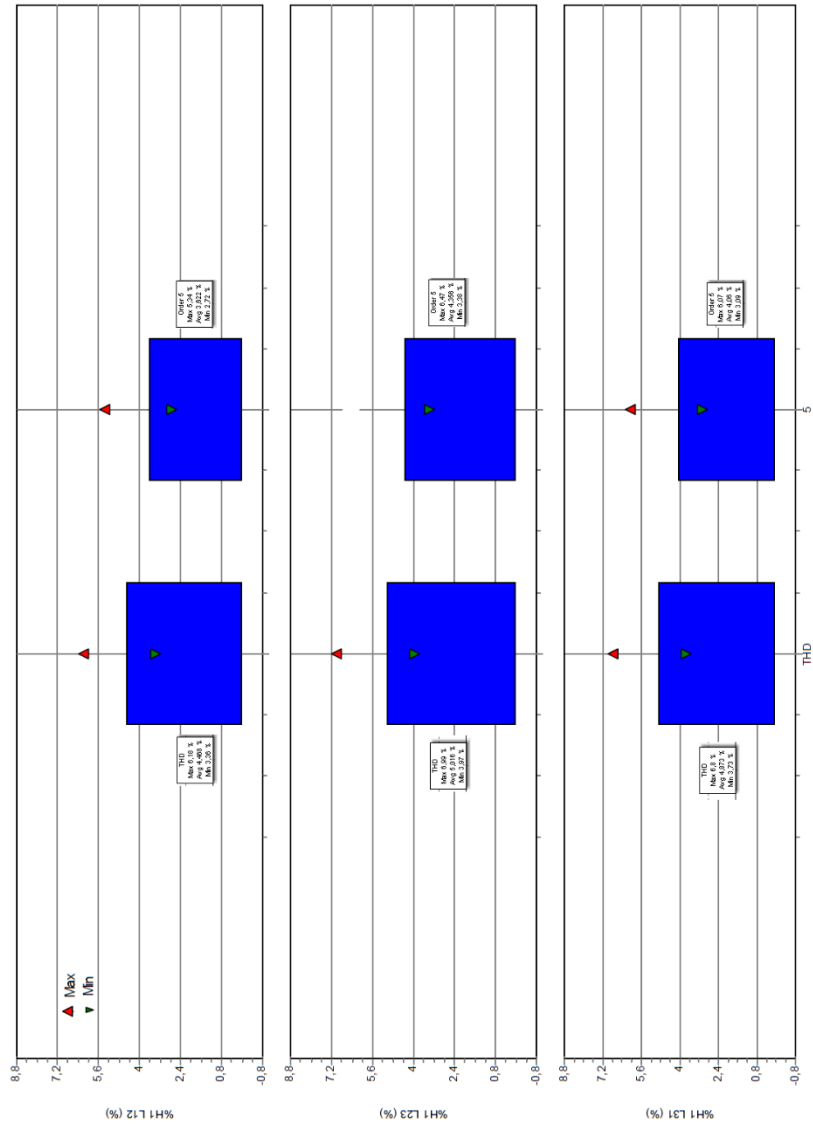
- Lueth, S. (2014). *Why the Internet of Things is called Internet of Things: Definition, history, disambiguation*. Noudettu 2019-9-11 osoitteesta <https://iot-analytics.com/internet-of-things-definition/>
- Medhajer, K., Tobon-Mejia, D. A., Tripot, G., & Zerhouni, N. (2012). A Data-Driven Failure Prognostics Method Based on Mixture of Gaussians Hidden Markov Models. *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 61, no. 2, pp. 491 – 503, June 2012. doi: 10.1109/TR.2012.2194177
- Meola, A. (2018). *The essential guide to the internet of things*. [PDF-tiedosto]. Noudettu 2019-08-30 osoitteesta https://airextreme.synology.me/wordpress/wp-content/uploads/2019/05/bii_iot101_2018.pdf
- Modarres, H. (2019). Industrial IoT and the Building Blocks for Industry 4.0. Noudettu 2020-01-16 osoitteesta <https://www.iotworldtoday.com/2019/08/05/industrial-iot-and-the-building-blocks-for-industry-4-0/>
- Mohan, N., Robbins, W., Undeland, T. (1995). *Power Electronics: Converters, Applications, and Design* 2nd edition. Luvut 3 ja 18. Wiley.
- Newton, M. (2017). Useful Node-RED Nodes for your IIoT Application. [Blogiteksti] OptoBlog. Noudettu 2019-09-17 osoitteesta <https://blog.opto22.com/optoblog/useful-node-red-nodes-for-your-iiot-application>
- Rajakangas, T. (2020). Senior advisor, Cimcorp oy. Henkilökohtainen keskustelu 7. tamikuuta 2020.
- Rantanen, P. (2019). Solution sales manager, Schneider Electric. Henkilökohtainen keskustelu 10. syyskuuta 2019.

- Ray, B. (2015). 3 Reasons Why IPv6 Is Important For the Internet Of Things. [Blogiteksti] Link Labs blog. Noudettu 2019-09-10 osoitteesta <https://www.link-labs.com/blog/why-ipv6-is-important-for-internet-of-things>
- Ross, A. (2019). Power Quality And Automation: Why Problems Arise. *Efficient Plant*. Noudettu 2019-10-25 osoitteesta <https://www.efficientplant-mag.com/2019/02/power-quality-and-automation-why-problems-arise/>
- Rouse, M. (2016). Emerging data center workloads drive new infrastructure demands – internet of things (IoT). Noudettu 2020-01-16 osoitteesta <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/Internet-of-Things-IoT>
- Schneider Electric. (2017). *Magelis iPC runs Node-RED at the edge of the IIoT to push automation boundaries*. [White paper] Schneider Electric Document. Noudettu 2019-09-16 osoitteesta https://www.schneider-electric.com/en/download/document/998-19900092_GMA/
- Schneider Electric. (2019). *Compact NSX LV434020*. Noudettu 2019-09-13 osoitteesta <https://www.schneider-electric.com/en/product/LV434020/energy-sensor%2C-powertag-nsx%2C-250-a%2C-3p/>
- Schneider Electric. (2019a). PowerTag A9MEM1573. Noudettu 2019-09-13 osoitteesta <https://www.schneider-electric.com/en/product/A9MEM1573/powertag-acti9-flex-3p-max-63a-400v-ii-energy-sensor/>
- Schneider Electric. (2019b). Acti 9 Smartlink SI D A9XMWA20. Noudettu 2019-09-14 osoitteesta <https://www.schneider-electric.com/en/product/A9XMWA20/acti-9-smartlink-si-d---wireless-to-modbus-tcp-ip-concentrator/>

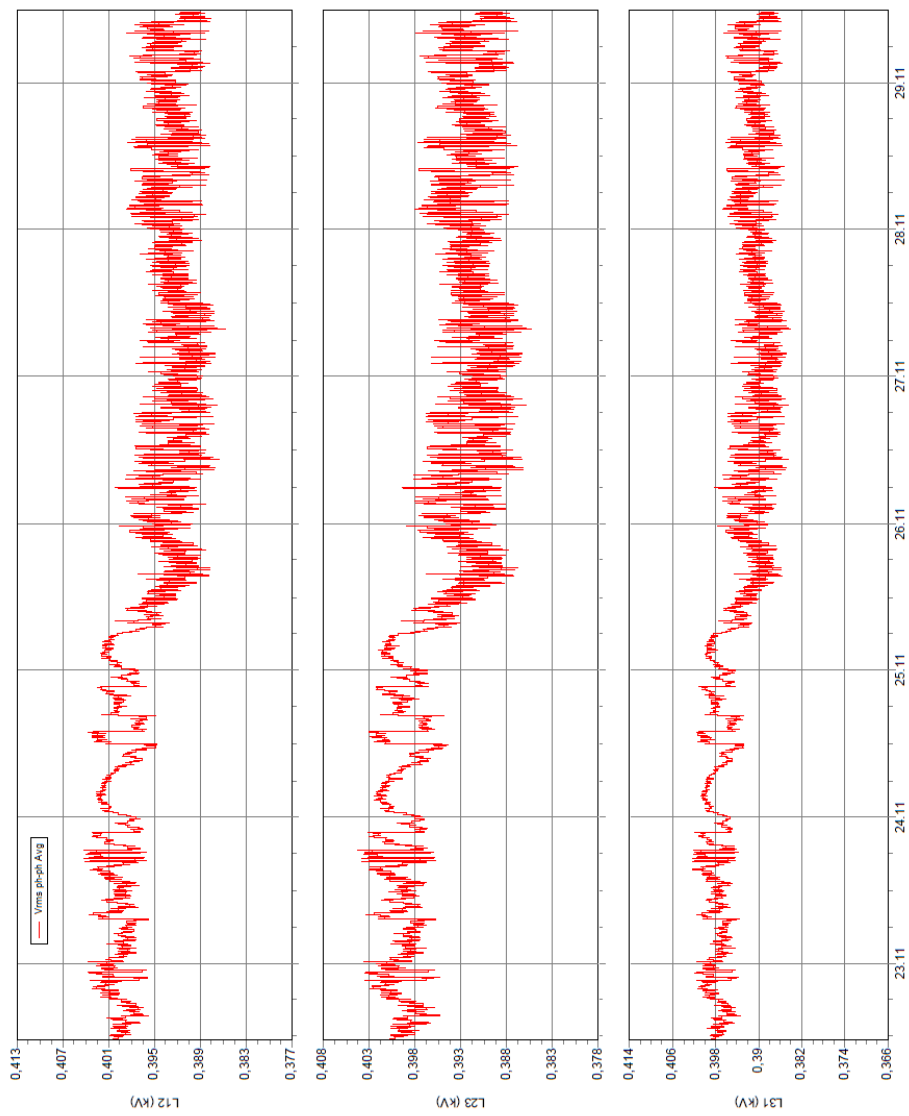
- Schneider Electric. (2019c). IIoT Edge Box Smart eMMC Dc Windows TPM HMIBMIEA5DD1E01. Noudettu 2019-09-16 osoitteesta <https://www.schneider-electric.com/en/product/HMIBMIEA5DD1E01/iiot-edge-box-smart-emmc-dc-windows-tpm/>
- Seymour, J. (2019). *The Seven Types of Power Problems*. [White paper] Schneider Electric document. Noudettu 2019-09-03 osoitteesta https://www.schneider-electric.us/en/download/document/APC_VAVR-5WKLPK_EN/
- Sharma, A., Rajpurohit, B.S., & Singh, S.N. (2018). A review on economics of power quality: Impact, assessment and mitigation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 88(2018), 363-372. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.011>
- Shishani, M. (2019). 100 % vs standard 80 % PowerPact Circuit Breakers v2. [Video]. *Schneider Electric*. Noudettu 2019-11-13 osoitteesta <http://static.schneider-electric.us/assets/products/circuit-breakers/podcasts/player.html>
- Tiainen, P. (2015). New opportunities in electrical engineering as a result of the emergence of the Internet of Things [diplomityö, Aalto-yliopisto]. Aaltodoc. Noudettu 2019-10-02 osoitteesta <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/19899>

Liite. Sähkönlaadun mittauksen kuvaajat.

Kuva 30. Asiakkaan robottisolusta mitattu taajuuden keskiarvo ajan funktiona. Mittausaika oli yksi viikko.



Kuva 31. Asiakkaan robottisolusta mitattu viides harmoninen yliaaltojännite ja jännitteen kokonaissärö THD. Kuvassa vaiheet L1–L3 erikseen. Mittausaika oli yksi viikko.



Kuva 32. Asiakkaan robottisolusta mitattu vaiheiden L1–L3 syöttöjännitteen keskiarvo ajan funktiona. Mittausaika oli yksi viikko.