



Teollisuusautomaation I/O-hajautuksen tuotekorvattavuusanalyysi

Topi Kotti

OPINNÄYTETYÖ
Joulukuu 2023

Talotekniikan tutkinto-ohjelma
Sähköinen talotekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Talotekniikan tutkinto-ohjelma
Sähköinen talotekniikka

KOTTI, TOPI:

Teollisuusautomaation I/O-hajautuksen tuotekorvattavuusanalyysi

Opinnäytetyö 34 sivua
Joulukuu 2023

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia Siemensin valmistaman SIMATIC ET 200SP I/O-hajautusyksikön korvattavuutta teollisuusautomaatiojärjestelmissä. Työn tavoitteena oli selvittää, onko tuote korvattavissa jollakin kolmannen osapuolen tuotteella ja mitä vaikutuksia korvaamisella tulisi olemaan kokonaisuuden kannalta.

Työssä tehdyssä tuotevertailussa on tutkittu vaihtoehtoisten tuotteiden ominaisuuksia sekä hintoja. Laitetestauksella on testattu yhden vaihtoehtoisen hajautusyksikön yhteensopivuutta Siemensin S7-1500 -sarjan ohjelmoitaviin logiikoihin. Testit suoritettiin laitevalmistajien koelaitteilla, Siemensin TIA Portal -ohjelmointiympäristön avulla. Lisäksi työssä tehtiin laitesuunnittelu vaihtoehtoisilla tuotteilla toimeksiantajan automaatiokeskukseen.

Tuotevertailun ja laitetestauksen perusteella voitiin todeta, että Siemensin hajautusyksikkö on korvattavissa ainakin toisella työssä tutkitulla vaihtoehtoisella tuotteella. Yleisesti vertaillut tuotteet vastasivat teknisiltä ominaisuuksiltaan Siemensiä ja täyttivät niille määritetyt tuotevaatimukset. Laitetestauksessa todettiin potentiaalisemman vaihtoehdon yhteensopivuus Siemensin logiikkaohjaimiin ja järjestelmiin.

Lopputuloksena kuitenkin todettiin, että Siemens-pohjaisissa teollisuusautomaatiojärjestelmissä kannattaa lähtökohtaisesti käyttää sen omia I/O-komponentteja.

Opinnäytetyö on tehty Insta Automation Oy:n toimeksiannosta. Yritys on osa Insta Group Oy -konsernia, joka on teollisuusautomaation, teollisen digitalisointin, kyberturvan ja puolustusteknologian asiantuntijaorganisaatio, joka auttaa asiakkaitaan kehittämään ja varmistamaan toimintansa suorituskykyä ja tuloksia.

Asiasanat: I/O-hajautus, I/O-moduuli, ohjelmoitava logiikkaohjain

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Building Services Engineering
Electrical Systems

KOTTI, TOPI:
Analysis of Replacing a Distributed I/O System

Bachelor's thesis 34 pages
December 2023

The purpose of the thesis was to investigate the replaceability of the Siemens SIMATIC ET 200SP distributed I/O system in industrial automation. The aim of the work was to assess whether the product could be replaced with an alternative product and what impact such a replacement would have on the overall system.

The features and prices of alternative products were investigated in the product comparison. The compatibility of one alternative product with Siemens S7-1500 series programmable logic controllers was tested through hardware testing. The tests were executed using the equipment provided by the manufacturers and Siemens TIA Portal programming environment. In addition, hardware design was carried out for the automation cabinet using alternative products.

Based on the product comparison and equipment testing, it was determined that the Siemens distributed I/O system could be replaced with at least one of the alternative products examined. In general, the compared products matched Siemens in terms of technical specifications and met the product requirements set for them. The hardware testing confirmed the compatibility of one of the alternatives with Siemens PLC.

The final conclusion was that in Siemens-based industrial automation systems, it was generally advisable to use Siemens own I/O components.

The thesis was commissioned by Insta Automation Ltd, a subsidiary of the Insta Group Ltd conglomerate. Insta Group Ltd is an expert organization specializing in industrial automation, industrial digitalization, cybersecurity, and defense technology. They assist their clients in enhancing and ensuring the performance and results of their operations.

Key words: distributed I/O system, I/O module, programmable logic controller

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	AUTOMAATIO OSANA PROSESSIA	7
3	HAJAUTETTU I/O-JÄRJESTELMÄ	9
	3.1 Järjestelmän rakenne.....	11
	3.2 Tiedonsiirto Profinet-verkossa	12
	3.3 Turva-automaatio osana järjestelmiä	14
	3.3.1 Turva I/O-komponentit	14
	3.3.2 Standardit ja säädökset.....	17
4	TUOTEVERTAILU	18
	4.1 Tuotevaatimukset.....	18
	4.2 Tekniset ominaisuudet	19
	4.3 Kustannusvertailu.....	21
5	HW-SUUNNITTELU.....	22
6	LAITETESTAUS	25
	6.1 Laiteparametrointi	26
	6.2 Testit ja tulokset	28
7	LOPPUTULOS.....	30
8	KORVATTAVUUDEN ANALYSOINTI.....	31
	LÄHTEET.....	33

ERITYISSANASTO

CPU	Central Processing Unit, tietokoneen prosessori
GSD	General Station Description, laitteen konfigurointi- ja parametrintiedot sisältävä tiedostotyyppi
HMI	Human to Machine Interface, käyttöliittymä
HW-suunnittelu	hardware design, laitesuunnittelu
I/O	Input/Output, tulo/lähtö
I/O-hajautus	laitekokonaisuus kenttälaitteiden I/O-signaaleita varten
IP-osoite	Internet Protocol, laitteen yksilöivä osoite verkossa
ISA	International Society of Automation
LLDP	Link Layer Discovery Protocol, protokolla verkon laitteiden tunnistamiseen
MRP	Media Redundancy Protocol, rengasverkon kahdenusominaisuus
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture, tiedonsiirtoprotokolla
PLC	Programmable Logic Controller, ohjelmoitava logiikkaohjain
Profinet	teollisuus-Ethernet-tyyppi / -standardi
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition, valvomo-ohjelmisto
SIL	Safety Integrity Level, turvallisuuden eheystaso
TIA Portal	Totally Integrated Automation, Siemensin kehittämä ohjelmointiympäristö
toimilohko	valmis logiikkaohjelman osa, tietyn toiminnon suorittamiseen

1 JOHDANTO

Modernit automaatiojärjestelmät sisältävät tulo- ja lähtöpiirejä, jotka on viety sessiaseman luota lähemmäksi ohjauskohdetta. Tällä tavalla toteutettua ratkaisua kutsutaan hajautetuksi I/O-järjestelmäksi. Järjestelmän yksi oleellisin osa on I/O-hajautusyksikkö, joka välittää kenttälaitteiden tulo- ja lähtösignaalit ohjelmotavalle logiikalle.

Tässä työssä on keskitytty tutkimaan Siemensin I/O-hajautusyksikön (Simatic ET 200SP:n) korvattavuutta teollisuusautomaatiojärjestelmissä. Työssä tehdyn tuotevertailun ja laitetestauksen tavoitteena on ollut selvittää kyseisen laitteen korvattavuusmahdollisuuksia kolmannen osapuolen tuotteilla. Korvattavuutta on lähdetty tarkastelemaan tuotevaatimusten pohjalta, erityisesti turva-automaatio-ominaisuuksien näkökulmasta.

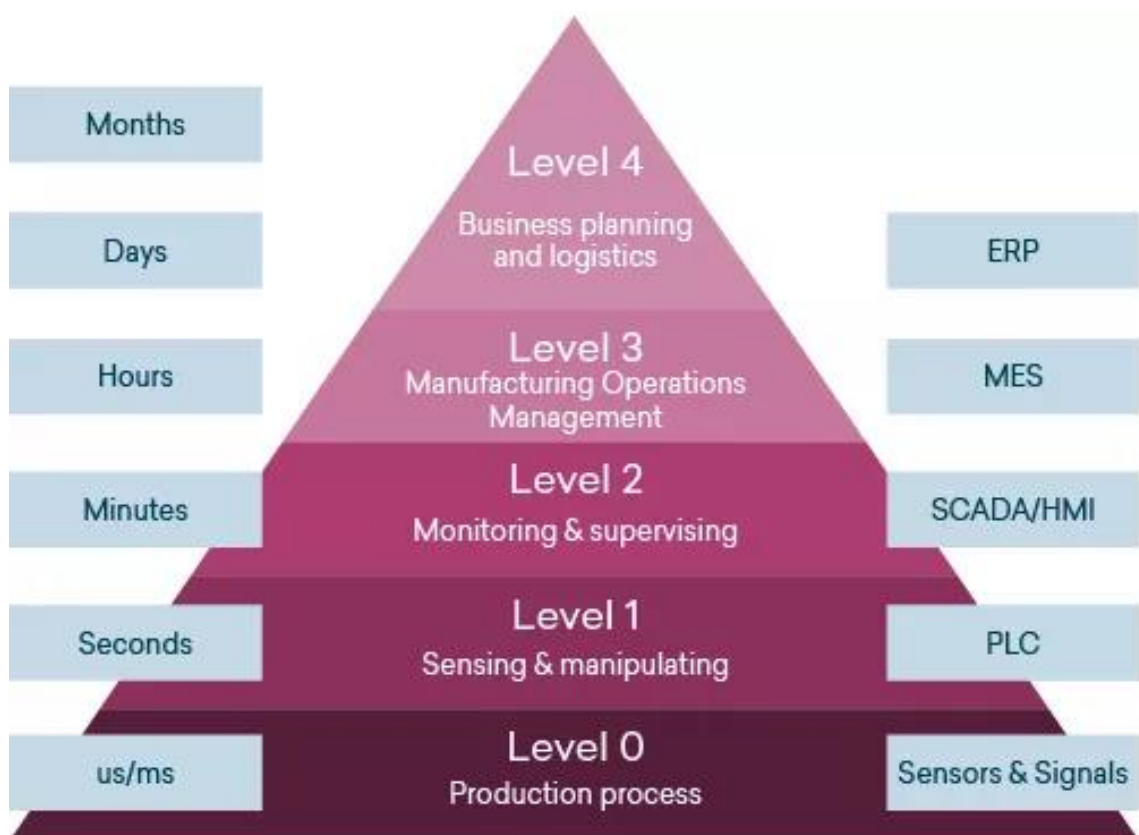
Globaalin komponenttipulan vaikutukset tulivat selkeiksi ja laajalti huomatuiksi vuoden 2021 aikana, kun monet yritykset ilmoittivat toimitusviivästyksistä, komponenttien hinnannoususta ja tuotanto-ongelmista. Nämä ongelmat komponentiteollisuudessa ovat vaikuttaneet merkittävästi myös teollisuusautomaatiotuotteiden saatavuuteen. Epävarmat ja pitkittyneet toimitusajat ovat ajaneet useat yritykset pohtimaan kriittisten järjestelmäkomponenttien korvattavuutta. Mitä olisi tehtävissä, jos tietyn komponentin puute uhkasi vesittää vaikkapa kokonaisen projektin?

Tästä syystä on syntynyt tarve selvittää ja tutkia, voidaanko ennestään käytetyt laitteet korvata tarvittaessa kolmannen osapuolen tuotteilla. Vaihtoehtoisten ratkaisujen kartoittaminen on koettu tärkeäksi, sillä se parantaisi toimeksiantajayrityksen toimitusvarmuutta merkittävästi.

2 AUTOMAATIO OSANA PROSESSIA

Teollisuudessa automaatiolla tarkoitetaan erilaisten tuotantoprosessien hallintaa tietokoneiden avulla. Keskeiset hyödyt automaatiojärjestelmien käytöstä tuotannossa ovat prosessin nopeuden, toistettavuuden ja säädettävyyden paraneminen. Tämän kaltaiset hyödyt ovat tehneet teollisesta automatisoinnista suosittua, sillä se usein johtaa tuotannon tehostumiseen ja kasvuun (Valmistajat).

Yhdysvaltalainen International Society of Automation (ISA), on luonut useita eri standardeja automaatioalalle. ISA-95 on standardi, joka määrittelee rajapinnan automaation ohjaustoimintojen ja yrityksen hallintajärjestelmien (eng. enterprise control systems) välille tuotanto- ja prosessiympäristöissä. ISA-95 -standardin hierarkkinen malli (kuva 1), kuvastaa näiden järjestelmien integraatiota ja tiedonsiirron vasteaikoja. Se käsittää koko prosessin, aina automaatiotason kenttälaitteista, tuotannonohjaukseen ja yrityksen strategiseen johtoon asti (International Society of Automation 2023).



KUVA 1. ISA-95 -mallin 5 eri tasoa (Brightly Software 2021).

Mallin alimmat tasot muodostavat järjestelmien fyysisen kokonaisuuden, kun taas ylemmät tasot ovat suurimmaksi osaksi digitaalisia ja pilvipalvelupohjaisia ratkaisuja. Erilaiset kenttälaitteet ja tässä työssä käsiteltävät I/O-hajautukset, sekä näitä ohjaavat logiikkaohjaimet, kuuluvat ISA-95 -mallissa tasoille 0 ja 1. Näiden tasojen välinen kommunikointi on usein reaaliaikaista, jolloin välitettävän tiedon tulee päivittyä ennalta määrätysti ja oikea-aikaisesti. I/O-järjestelmien ohjaus tapahtuu käyttöliittymän kautta valvomotasolla 2. Tämä on yleensä toteutettu valvonta-, ohjaus-, ja tiedonhankintajärjestelmän (SCADA) avulla. SCADA-järjestelmän tarkoitus on toimia käyttäjälle rajapintana fyysisten laitteiden käyttö- ja valvontatehtäviin. Taso 3 käsittää laajan joukon toimintoja, jotka sijaitsevat fyysisten ja digitaalisten järjestelmien rajapinnalla. Näitä ovat mm. tuotannon johtamisen järjestelmät MES (eng. Manufacturing Execution Systems), aikataulutus ja optimointi. Mallin ylin taso 4, pitää sisällään korkeamman tason yritys- ja logistiikka-suunnittelun. Yrityksen resurssien- ja toimitusketjujen hallinta ovat tämän tason ydintoimintoja. Yleisesti tiedetään, että hyvä tiedon välitys alemmilta tasoilta mahdollistaa hyvän päätöksenteon ylimmällä tasolla (Brightly Software 2021).

Kyseisestä mallista ilmenee hyvin, millaista suorituskkyä automaatiotason laitteilta vaaditaan, jotta kyseisiin tiedonsiirron vasteaikoihin päästään. Esimerkiksi automaatiotasolla mikrosekuntien vasteajat saattavat olla minimivaatimuksena prosessin onnistumisen takaamiseksi.

3 HAJAUTETTU I/O-JÄRJESTELMÄ

Ohjelmoitavan logiikan keksimisen jälkeen 1960-luvun loppupuolella, yleistyivät myös I/O:t (eng. input/output) automaatiojärjestelmissä. Tätä ennen järjestelmät toteutettiin pitkälti releohjauksien avulla. Tällaiset ohjausjärjestelmät olivat suuria, monimutkaisia ja vaikeahuoltoisia verrattuna moderneihin PLC-ohjattuihin automaatiojärjestelmiin (Heikki Laakso).

Hajautettu I/O-järjestelmä on automaatioissa yleisesti käytetty ratkaisu, jolla ohjataan ja valvotaan järjestelmän toimintoja ja tilaa. Kyseisiä järjestelmiä käytetään nykyään laajasti mm. teollisuus-, prosessi-, ja rakennusautomaatioissa. Järjestelmät koostuvat pääosin ohjelmoitavasta logiikkaohjaimesta ja I/O-hajautusyksiköistä, sekä niihin kuuluvista analogisista ja digitaalisista tulo- ja lähtömoduuleista. Järjestelmiin liittyy myös valvomotason käyttöliittymä, sekä laitteiden välisen kommunikoinnin mahdollistava tiedonsiirtoprotokolla.

Siemensin S7-1500 -sarjan ohjelmoitavia logiikkoita esitetty alla (kuva 2). Kuvassa tuotemallit 1515F-2 PN CPU (vasemmalla) ja 1517F-3 PN/DP CPU (oikealla).

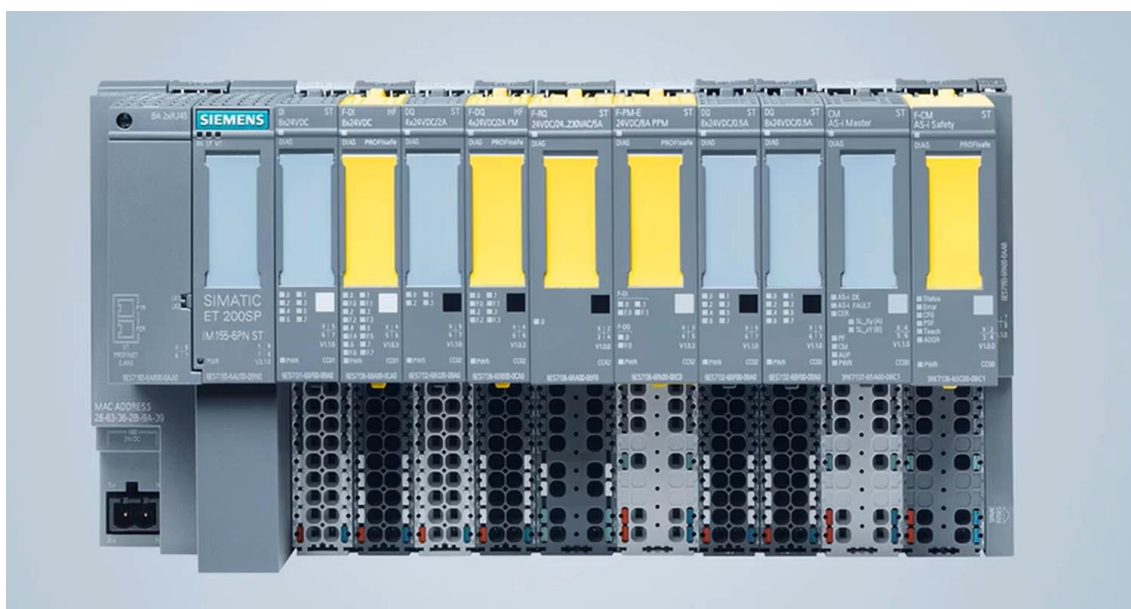


KUVA 2. Siemensin ohjelmoitavia logiikkaohjaimia (Siemens Industry Mall 2022a/b).

Ohjelmoitava logiikkaohjain eli PLC (eng. programmable logic controller) on I/O-järjestelmän äly-yksikkö. Sen sisällä oleva mikroprosessori CPU (eng. central

processing unit) suorittaa sille ladatun tietokoneohjelman mukaisia käskyjä ja toimintoja (Valmistajat).

I/O-hajautus eli -hajautusyksikkö (eng. distributed I/O system) koostuu kommunikointimoduulista / väyläkopleerista (eng. interface module / bus coupler) ja siihen liitetyistä erityyppisistä I/O-moduuleista. Kommunikointimoduuli toimii rajapintana tiedonsiirtoverkon ja moduulien välissä, välittäen moduuleihin kytkettyjen laitteiden tilatiedot logiikalle. Tuotemallikohtaisesti kommunikointimoduuliin voidaan lisäksi liittää mm. moottorikäynnistimiä ja energiamittareita. Alla (kuva 3) Siemensin hajautusyksikkö ET 200SP -kommunikointimoduulilla, johon on liitettyä tulo- ja lähtömoduuleita.



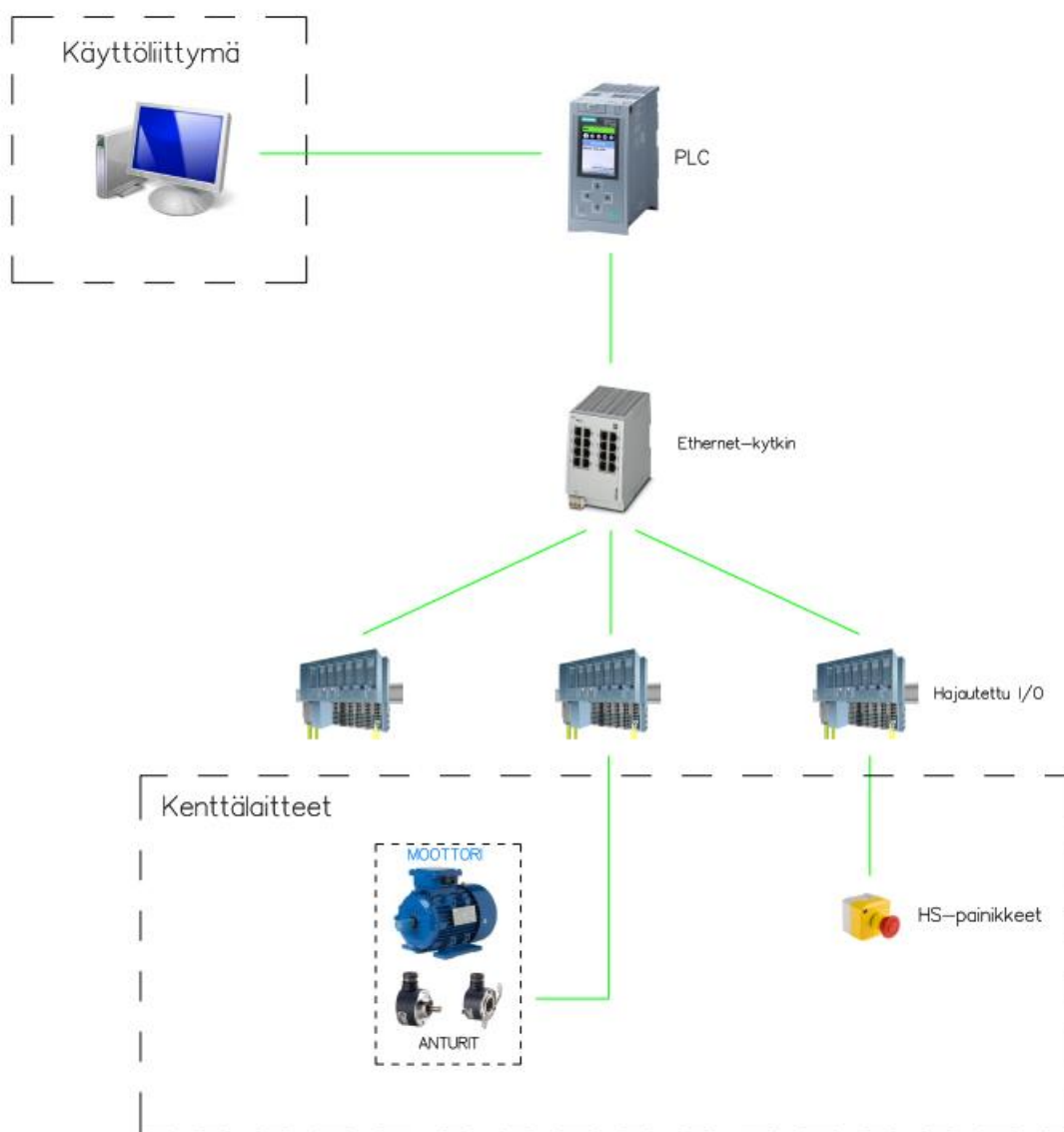
KUVA 3. Siemens ET 200SP I/O-hajautusyksikkö (Siemens 2023).

I/O-moduuli on laite, joka koostuu tietyistä määrästä I/O-pisteistä. Niiden kautta järjestelmän logiikka on yhteydessä kenttälaitteisiin. Niitä käytetään erilaisten toimintojen suorittamiseen automaatiojärjestelmissä. Toiminto voi olla esimerkiksi sähkömoottorikäyttö, jonka lämpötilan, nopeuden ja kuormituksen tilaa valvotaan ja ohjataan I/O:n kautta. Tyypillisesti tarvitaan sekä analogisia että digitaalisia tulo- ja lähtömoduuleita kenttälaitteen (esim. anturin) välittämän viestisignaali perusteella. Moduuleista käytetään yleisesti lyhenteitä DI, DO, AI ja AO (esim. DO=Digital Output / AI=Analog Input).

3.1 Järjestelmän rakenne

Hajautetun I/O-järjestelmän konsepti muodostuu lähinnä järjestelmärakenteesta. Perinteisessä I/O:ssa tulo- ja lähtömoduulit ovat suoraan logiikassa kiinni, kun taas hajautetussa järjestelmässä I/O:t sijaitsevat kentällä, fyysisesti mahdollisimman lähellä ohjattavaa kohdetta. Näin ollen yksittäisten kenttälaitteiden kaapelointietäisyydet pysyvät mahdollisimman lyhyinä. Hajautetussa järjestelmässä logiikka on sijoitettu keskitettyyn ohjauspaikkaan, esimerkiksi automaatiokeskukseen. Keskeisenä erona järjestelmien välillä on, että hajautetussa I/O:ssa tarvitaan jokin tiedonsiirtoyhteys logiikan ja hajautusyksikön välille.

Hajautetun I/O-järjestelmän rakennetta voidaan kuvata alla olevan kaavion mukaisesti (kuva 4).



KUVA 4. Esimerkki hajautetun I/O-järjestelmän rakenteesta.

Hajautusyksikkö on suoraan yhteydessä kenttälaitteisiin I/O-moduulien kautta. Sen tehtävänä on välittää kenttälaitteiden tilatiedot eteenpäin logiikalle. Järjestelmässä logiikkaohjain käsittelee ja välittää automaatiotason kenttälaitteiden tiedot ja signaalit valvomotasolle, josta järjestelmää hallitaan käyttöliittymän (SCADA/HMI) avulla. Hajautusten ja moduulien toiminnallisuus määräytyy järjestelmän ohjaimen CPU:lle ladatun tietokoneohjelman mukaisesti.

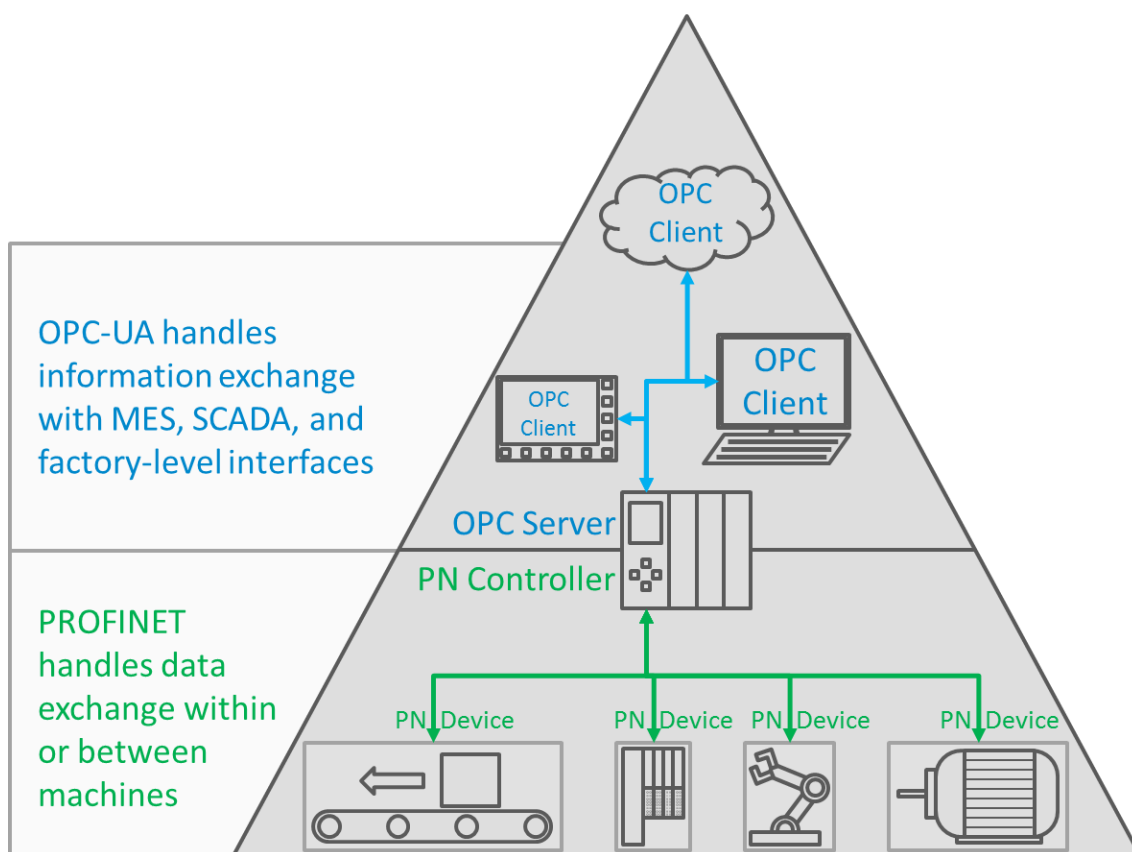
Järjestelmän automaatiotasolla kenttälaitteet jakautuvat yleisesti antureihin ja toimilaitteisiin. Anturit mittaavat prosessin tilaa, kun taas toimilaitteilla vaikutetaan siihen. Tämä toteutuu esimerkiksi silloin, kun valvomo-ohjelmisto saa I/O:n kautta lämpötila-anturin tiedon prosessin ylikuumenemisesta. Tilanteeseen reagoidaan ohjelmallisesti, säätämällä jäähdytysjärjestelmän toimilaitteita.

3.2 Tiedonsiirto Profinet-verkossa

Kommunikointi eri laitteiden ja järjestelmätasojen välillä tapahtuu tiedonsiirtoprotokollien avulla. Profinet ja OPC UA ovat kaksi yleistä, toisistaan eroavaa tiedonsiirtoprotokollaa, joita käytetään integroituna automaatio- ja prosessinohjausjärjestelmissä.

Profinet on yksi standardoitu teollisuus-Ethernet-tyyppi, jota tässäkin työssä testatut laitteet tukevat. Profinet-verkkoa käytetään reaaliaikaiseen tiedonsiirtoon kenttälaitteiden ja ohjaimien (esim. PLC) välillä. Käytännössä ohjain kysyy verkon laitteilta näiden tilatietoja, ohjelmallisesti määritetyn syklin mukaisesti. Nämä tiedot pitävät sisällään laitteen statuksen ja ohjaus- ja hälytystiedot, jotka ohjain välittää eteenpäin valvomotasolle.

OPC UA -protokollaa puolestaan hyödynnetään ohjainten ja korkeamman tason järjestelmien (SCADA ja MES) väliseen tiedonsiirtoon. Kaaviolla (kuva 5) on esitetty Profinet- ja OPC UA -protokollien rajapinnan muodostumista automaatiojärjestelmissä. Samainen rajapinta sijoittuu ISA-95 -mallin tasojen 1 ja 2 väliin (Profinet University 2023).



KUVA 5. Profinet- ja OPC UA -rajapinta teollisuus-Ethernetissä (Profinet University 2023).

OPC UA -verkko koostuu asiakkaista (eng. client) ja palvelimista (eng. server) käsittäen ISA-95-mallin ylimmät tasot 2-4. Verkossa palvelimet tuottavat dataa järjestelmästä, jota asiakkaat hyödyntävät toimintoihinsa. Profinet-verkko puolestaan koostuu järjestelmäkohtaisesti erilaisista ohjaimista ja kenttälaitteista, muodostaen mallin alimmat tasot 0 ja 1 (Profinet University 2023).

Yleisesti Profinet- ja OPC UA -protokollilla toteutettu tiedonsiirtojärjestelmä on vain yksi mahdollinen ratkaisu monien muiden joukossa. Muita teollisuudessa käytettyjä Ethernet-verkkoja ovat mm. Modbus/TCP, EtherCAT ja Ethernet/IP (Harrico PTE Oy 2023). Järjestelmää rakentaessa tulee automaatiolaitteiden suorituskky sekä yhteensopivuus käytössä olevaan tiedonsiirtoprotokollaan varmistaa. Tämä on olennaista tuotekorvattavuuden kannalta, sillä saman valmistajan komponenttia voi löytyä useaa eri mallia, eronaan vain niiden tukema tiedonsiirtoprotokolla. Näitä protokollia säätelevät standardit itsessään määrittelevät omat suorituskky- ja ominaisuusvaatimuksensa kyseisille laitteille.

3.3 Turva-automaatio osana järjestelmiä

Turva-automaatio on keskeinen osa moderneja teollisuusautomaatiojärjestelmiä. Turva-automaatiotoiminnot (eng. safety instrumented functions) ovat suojaustoimintoja, jotka toteutetaan turva-automaatiojärjestelmässä. Niiden tarkoituksena on tunnistaa vaarallinen tapahtuma ja estää häiriön eteneminen onnettomuudeksi. Tällöin järjestelmä pysäyttää prosessin toiminnan nopeasti ja hallitusti, sekä ohjaa järjestelmän turvalliseen tilaan. Turvatoiminto voi olla esimerkiksi nostinlaitteen hätäpysäytys tai säiliön ylitäytön esto. Viimekädessä turvatoiminnoilla suojataan ihmisiä, koneita ja ympäristöä potentiaalisilta vaaratilanteilta. Turva-automaatio on toiminnallisuutensa osalta yleensä toteutettu käyttöautomaatiosta erotettuna järjestelmänä. Tämä mahdollistaa turvaominaisuuksien toimimisen käyttöautomaation vikaatilanteista huolimatta (Tukes 2021, Metropolia 2017, IEC 61511-0:2018, 6 s.).

3.3.1 Turva I/O-komponentit

I/O-järjestelmissä turva-automaatio toteutetaan sekä komponenttien että ohjelmiston integraationa. Turvaominaisuuksien toimimisen kannalta on tärkeää molempien osakokonaisuuksien tarkoituksenmukainen toiminta.

Turva-automaatiokomponentit eroavat tavallisista verrokeistaan suorituskyvyn, ominaisuuksien ja luotettavuuden osalta. Niiden valmistuksessa on keskitytty erityoten turvalliseen vikaantumiseen liittyviin tekijöihin. Standardisarjassa IEC 61511 turva-automaatiokomponenttien vaatimuksista kerrotaan seuraavasti:

Turva-automaatiojärjestelmän vikaantumisten minimoimiseksi

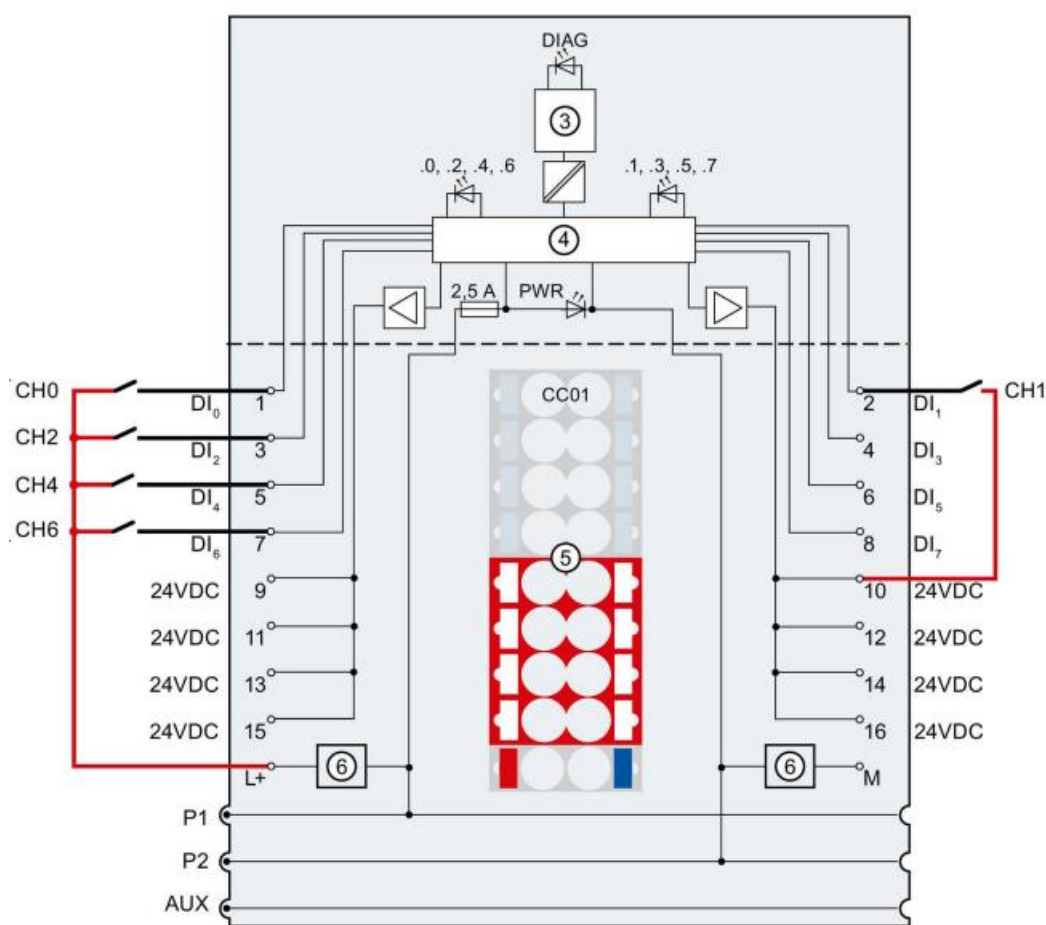
a) valitut turva-automaatiokomponentit ovat luotettavia ja soveltuvia tehtäväänsä ja käyttöympäristöönsä

b) käytössä on hallintajärjestelmä, joka varmistaa, että systemaattiset vikaantumiset minimoidaan turva-automaatiojärjestelmän koko elinkaaren ajan (IEC 61511-0:2018, 7 s.).

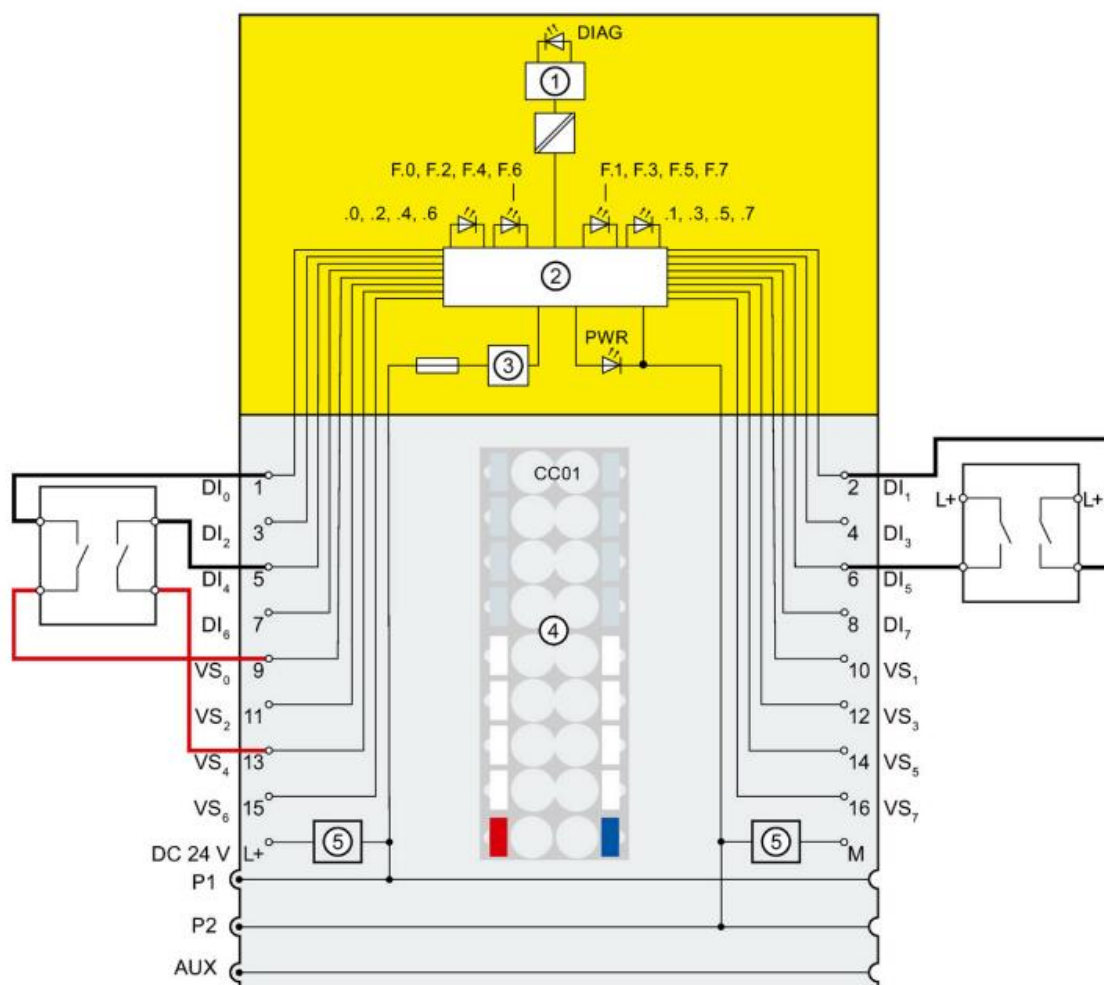
Esimerkiksi turvalogiikkaohjaimissa (eng. safety PLC) ominaisuuksia ovat mm. ohjelmoinnin rajattu käskykanta, kahdennusominaisuudet ja ohjelman muutosten

esto salasanasuojauksella. Lisäksi ohjelman muuttaminen sen suorituksen aikana on yleensä estetty. Usein voidaan kustannussäästöjen ja integraatioetujen takia käyttää yhtä soveltuvaa ohjainta sekä käyttö- että turvalogiikkana. Tällöin järjestelmässä tarvitaan vain yksi ohjain ja tiedonsiirto turvapuolelta normaalille voidaan tehdä ohjelmallisesti kokonaisuuden sisällä. Tämän työn laitetestauksessa käytetty Siemensin 1515F-2 PN CPU -logiikka luokitellaan turvalogiikka-ohjaimeksi (Kataja-aho 2020).

Turva I/O-moduuleissa suorituskyky ja ominaisuudet ovat yhteneviä turvalogiikan kanssa. Käytännössä logiikalla on kyky suorittaa moduulien tyyppikohtaisia toimintoja. Erona tavallisiin moduuleihin, turvamalleilla kyetään toteuttamaan mm. kahdennettuja I/O-pisteitä, joita käytetään esimerkiksi hätäpysäytysjärjestelmissä. Esimerkkinä Siemensin kahdeksan kanavaisen DI-moduulin ja sen turvamallin sisäiset kytkentäkaaviot (kuva 6 ja kuva 7).



KUVA 6. Siemensin DI8-moduulin sisäinen kytkentä (Siemens Manual 2019).



KUVA 7. Vastaavan F-DI8-moduulin kytkentäkaavio (Siemens Manual 2022).

Turvamoduulin kytkentäkaavioista ilmenee hyvin kahdensuuntaisuuden käyttämättömyys. Esimerkiksi laitteiston hätäpysäytyskytkin voidaan kytkeä kuvan mukaisesti moduulin kytkentäpisteisiin 1, 5, 9 ja 13. Täten kytetään ohjelmallisesti valvomaan kytkinlaitteen molempien kärkitietojen vastinarvoja. Vastaava kytkentä voidaan tehdä myös tavalliselle DI-moduulille. Oleellista on kuitenkin käytettyjen kanavien tulossignaalien ekvivalenttisuuden valvonta, mitä tavalliselle moduulille ei voida määrittää.

Turva-automaatiolaitteet eritoten I/O-moduulit, spesifioidaan yleensä keltaisella värityksellä laitevalmistajakohtaisesti. Tämä harvemmin koskee logiikkaohjaimia. Laitevalmistajilla on käytössä turva-automaatiolaitteille omia tunnuksia, esimerkiksi Siemensin laitetunnuksen yhteydessä käytetty F-kirjain (eng. Fail-safe).

3.3.2 Standardit ja säädökset

Prosessiteollisuudessa turva-automaation toiminnallisen turvallisuuden täyttymistä käsittelee kansainvälinen standardisarja SFS-EN / IEC 61511. Siinä on ohjeistettu mm. turvaohjelmistojen suunnittelua. Tätä sitoo myös sen ns. ”kattostandardi” SFS-EN / IEC 61508, joka määrittelee toiminnallisen turvallisuuden elektronisissa turvallisuuteen liittyvissä järjestelmissä. Esimerkiksi tuotanto- tai voimalaitoksen turva-automaatioon voidaan soveltaa useita EU säädöksiä ja direktiivejä. Näitä ovat edellä mainittujen lisäksi mm. pienjännitedirektiivi, konedirektiivi 2006/42/EY, EMC-direktiivi, ja ATEX-direktiivi. Kyseiset säädökset tulee ottaa huomioon turva-automaatiojärjestelmien suunnittelussa ja toteutuksessa (Tukes 2021).

Turvallisuuden eheystaso SIL (eng. Safety Integrity Level) määritellään turvatoimintokohtaisesti turva-automaatiojärjestelmissä. SIL-luokat (1-4), joissa vaatimukset nousevat luokkanumeroiden myötä, kuvaavat kyseisen turvatoiminnon vaativuutta. Vaadittava SIL-taso järjestelmälle muodostuu riskien arvioinnin myötä. Riskien arvioinnissa käytetään erilaisia riskienarviointimatriiseja, joilla riskien realisoitumista ja niiden seurauksia pyritään arvioimaan. Käytännössä mitä suurempi riski ja siitä mahdollisesti aiheutuva vahinko, sitä enemmän turva-automaation on kyettävä riskiä pienentämään. Turvallisuuden eheystaso on määritetty standardissa IEC 61509 (Tukes 2021, Metropolia 2015).

4 TUOTEVERTAILU

Tuotevertailun tavoitteena oli tutkia vaihtoehtoisten laitetoimittajien I/O-hajautusyksiköitä tuotekorvattavuuden näkökulmasta. Vertailussa tutkittiin kommunikointi- ja I/O-moduulien teknisiä ominaisuuksia datalehtien perusteella ja tehtiin kustannusvertailu hintatason määrittämiseksi. Tässä vertailussa vaihtoehtoisia laitetoimittajia Siemensille olivat Phoenix Contact ja Wago. Kyseiset valmistajat valikoituivat vertailuun niiden tarjoaman tuotetuen ja laajan tuotevalikoimansa perusteella.

4.1 Tuotevaatimukset

Tutkittaville vaihtoehtoisille tuotteille oli määritetty tarkat tekniset tuotevaatimukset. Tuotevaatimukset perustuivat pitkälti Siemensin hajautusyksikön ominaisuuksiin ja sen käyttökohteiden asettamiin erityisvaatimuksiin.

Näistä ominaisuusvaatimuksista keskeisimpänä oli laitteiden yhteensopivuus Siemensin S7-1500 -sarjan ohjelmoitavien logiikoiden kanssa. Laitteiden tuli olla myös konfiguroitavissa ja ohjelmoitavissa Siemensin TIA Portal -ohjelmointiympäristössä. Lisäksi merkittävä vaatimus oli turva-automaatiotoimintojen tukeminen ja turvallisuuden eheystason SIL3-luokan saavuttaminen järjestelmätasolla. SIL-luokituksen vaatimus muodostui laitteiden käyttökohteiden riskipitoisuuksien perusteella. Laitteiden tuli olla Profinet-yhteensopivia ja tukea MRP-protokollaa, mikä mahdollistaa rinkiäisen kahdennetun verkon käytön. LLDP-protokollan tukeminen oli edellytyksenä, sillä sen avulla logiikka kykenee tunnistamaan laitteet verkossa ja jakamaan näille IP-osoitteet automaattisesti.

Komponenttien hinnat muodostivat oman tarkasteltavan osa-alueensa. Vaatimuksena oli, että vaihtoehtoisten laitetoimittajien tuotehinnat kyseisten laitteiden osalta olisivat Siemensin kanssa kilpailukykyisiä.

4.2 Tekniset ominaisuudet

Hajautusten teknisten ominaisuuksien vertailussa tutkittiin, ovatko vaihtoehtoisten kommunikointimoduulien ominaisuudet vastaavia kuin Siemensin ET 200SP:llä. Tuotevaatimusten pohjalta, vaihtoehtoiksi kommunikointiyksiköiksi valikoituivat Phoenixin (Axioline F), ja Wagon (I/O System 750/753) Profinet I/O-väyläkoplerit (kuva 8).



KUVA 8. Phoenixin (vas.) ja Wagon (oik.) kommunikointimoduulit (Phoenix Contact / Wago 2023)

Tutkittavia ominaisuuksia oli useita, mutta niistä keskeisimpänä olivat turva-automaatio-ominaisuudet ja Profinet-yhteensopivuus. Tuotevaatimusten perusteella laadittu ominaisuusvertailu alla (taulukko 1).

TAULUKKO 1. Kommunikointimoduulien tutkitut ominaisuudet.

	SIEMENS SIMATIC ET 200SP (HF) 6ES7155-6AU01-0CN0	PHOENIX AXL F BK PN TPS 2403869	WAGO Fieldbus Coupler PROFINET IO 750-375
Paino (g)	166	177	151,5
Mitat (mm) (lev./kor./syv.)	50/117/74	45/126,1/74	61,5/100/71,9
Hot Swap	ok	-	-
I/O-moduulien max. määrä	64	63	64
PROFINET yhteensopivuus	ok	ok	ok
PROFINET system redundancy	S2	S2	S2
PROFINET transmission speed	100 Mbps	100 Mbps	100 Mbps
Turva-automaatio	ok	ok	ok
GSD-File	ok	ok	ok
MRP	ok	ok	ok
LLDP	ok	ok	ok

Teknisten ominaisuuksien osalta kommunikointimoduulit olivat verraten samantaisia, eikä tuotekorvattavuuden estäviä tekijöitä näiltä osin löytynyt. Siemensin ET 200SP -malli poikkesi Phoenixin ja Wagon laitteista merkityksellisesti ainoastaan Hot Swap -ominaisuuden osalta. Hot Swap antaa mahdollisuuden vaihtaa käynnissä olevasta järjestelmästä I/O-moduulin ilman prosessin keskeytymistä. Ominaisuuden puute ei kuitenkaan ollut kriittinen tekijä kokonaisuuden kannalta tarkasteltuna.

Lisäksi tutkittiin, onko korvaavilla valmistajilla tuotevalikoimassa kaikkia erityyppisiä I/O-moduuleita, joita toimeksiantajan järjestelmissä tarvitaan. Näiden moduulien tuli olla yhteensopivia valmistajan kommunikointimoduulin kanssa ja täyttää samat ominaisuusvaatimukset. Vaaditut I/O-moduulityypit lueteltuna alla (taulukko 2).

TAULUKKO 2. Vaaditut I/O-moduulityypit.

I/O-moduulin tyyppi
DI
DO
AI
AO
F-DI
F-DO
F-AI
Pulssi
Punnitus

Taulukossa keltaisella värillä merkittynä turva I/O-moduulit, ja viimeisenä erikoisfunktio-moduulit pulssinmittaus- ja punnitustoimintoja varten. Phoenix Contact sekä Wago kykenivät molemmat vastaamaan tarpeeseen tuotevalikoimansa puolesta.

Datalehtien perusteella turvamoduuleilla kyetään saavuttamaan SIL3-luokka turvallisuuden eheyden osalta. Moduulien ominaisuuksista lisäksi tarkasteltiin lähtömoduulien kanavakohtaisia virrankestoja, jotka osoittautuivat keskenään lähes samanarvoisiksi. Teknisten ominaisuuksien osalta I/O-moduulit olivat kommunikointiyksiköiden ohella tuotevaatimukset täyttäviä laitteita.

4.3 Kustannusvertailu

Kustannusvertailussa on tarkasteltu komponenttien hinnanmuutosta tuotekorvattavuuden kannalta. Vertailu tehtiin laitetoimittajien yrityskohtaisten listahintojen perusteella. Hintatiedoissa huomioitiin Insta Automation Oy:n vertailun aikaiset tuotealennukset.

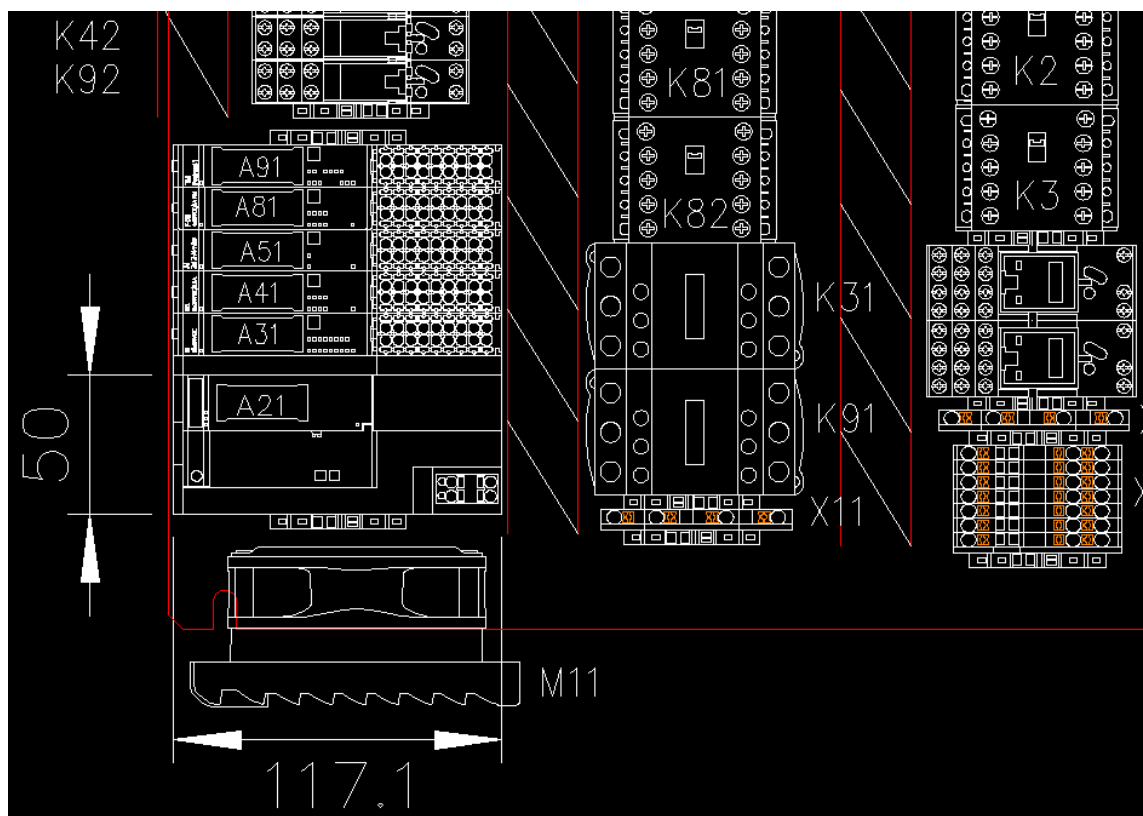
Toimeksiantajan automaatiojärjestelmän laitekokonaisuus toimi pohjana tehdyille vertailulle. Vertailussa oli mukana Siemens, sekä vaihtoehtoisten tuotteiden toimittajat Phoenix Contact ja Wago. Hinta- ja kustannusvertailu tehtiin kaikkiin hajautetun I/O:n komponentteihin, jotka olivat toimeksiantajan automaatiotarkkailussa oleellisia. Näitä olivat I/O-hajautusyksiköt, analogiset- ja digitaaliset tulo- ja lähtömoduulit, niiden turva-automaatio-mallit, erikoisfunktio-moduulit sekä tarvittavat oheiskomponentit. Hintoja tarkasteltiin komponenttitasolla, mutta lopputuloksessa keskityttiin kyseisen automaatiokokonaisuuden hajautetun I/O:n muodostamiin kustannuksiin.

Kustannusvertailun tulokset on julkaistu ainoastaan Insta Automation Oy:n sisäiseen käyttöön, eikä niitä ole käsitelty tämän opinnäytetyön julkisessa versiossa.

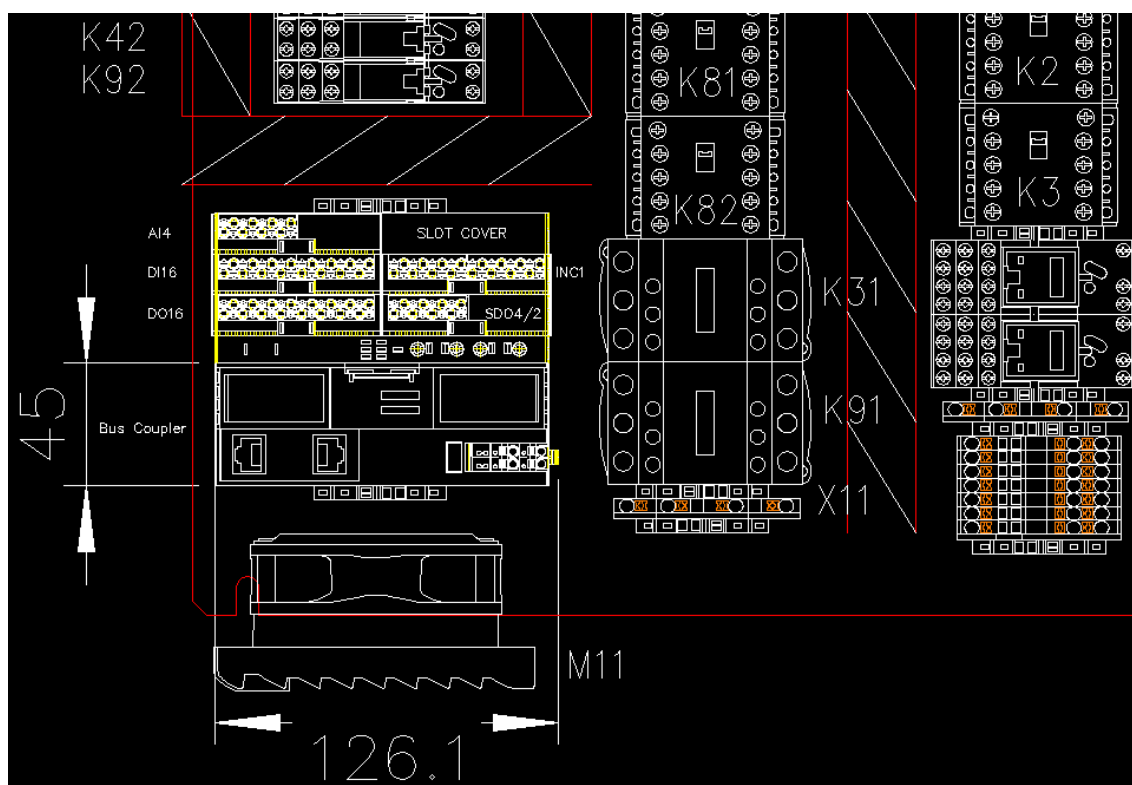
5 HW-SUUNNITTELU

Teknisten ominaisuuksien pohjalta tehtiin HW- eli laitesuunnittelu, jossa tarkasteltiin laitteiden fyysistä yhteensopivuutta toimeksiantajan järjestelmiin. Entuudestaan Siemensin I/O:lla toteutettuun moottorinohjauskeskukseen suunniteltiin vastaavat kokoonpanot, piirikaaviot ja osaluettelot vaihtoehtoisilla laitteilla. Suunnittelutyö tehtiin Cadmatic-ohjelmistolla. Tavoitteena oli laatia toteuttamiskelpoiset suunnitelmat, mikäli Siemensin I/O-laitteita jouduttaisiin tulevaisuudessa korvaamaan.

Kokoonpanon suunnittelussa keskeistä oli laitteiden fyysinen mitoitus keskukseen tilan ahtauden takia. Esimerkkinä Siemensin (kuva 9) ja Phoenixin (kuva 10) hajautusyksiköiden kokoonpanot keskuksessa.



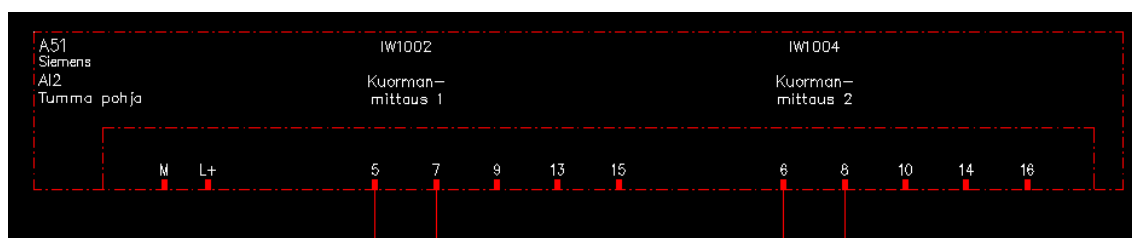
KUVA 9. Siemensin I/O-hajautusyksikkö moottorinohjauskeskuksessa.



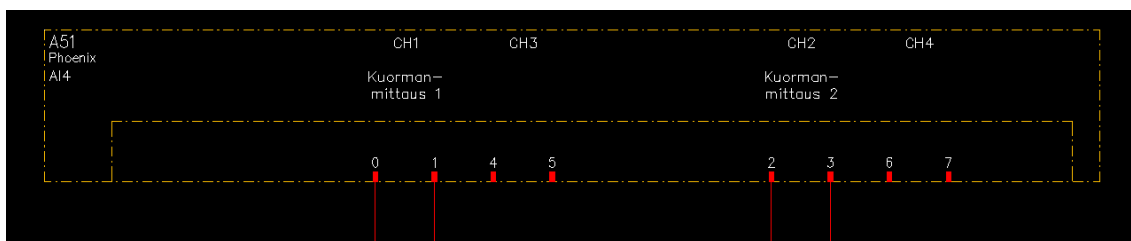
KUVA 10. Vastaava I/O-hajautus Phoenixin komponenteilla.

Laitetoimittajien laitteet olivat fyysisesti lähes samankokoisia, joten Phoenixin ja Wagon I/O-hajautukset saatiin sovitettua Siemensin paikalle keskukseen pienten muokkauksien myötä. Lopputuotoksena saatiin moottorinohjauskeskuksen valmiit kokoonpanopiirustukset.

Vastaava suunnittelu tehtiin myös keskuksen piirikaavioihin I/O:n osalta. Esimerkkinä Siemensin (kuva 11) ja Phoenixin (kuva 12) piirikaaviosivut, missä esitetty toimilaitteen kuormitusanturia valvovan AI-moduulin kytkennät.



KUVA 11. Kuormitusanturin valvonta Siemensin AI-moduulilla.



KUVA 12. Phoenixin AI-moduuli kuormitusanturin valvontaa varten.

Piirikaavioihin suunniteltiin kaikkien moduulien jännitteenjakelut ja I/O-pisteiden kytkennät valmistajakohtaisesti. Suunnitteluun vaikuttivat moduulien sisäiset kytkennät ja ominaisuudet, jotka selvitettiin datalehdistä tuotekohtaisesti.

6 LAITETESTAUS

Vaihtoehtoisten laitteiden yhteensopivuus Siemensin järjestelmiin varmistettiin laitetestauksella. Testit suoritettiin testilaitteiden ja Siemensin TIA Portal -ohjelmointiympäristön avulla. Tavoitteena oli testata kommunikointi Phoenixin I/O-hajautusyksikön ja Siemensin 1515F-2 PN CPU -turvalogiikkaohjaimen välillä. Toiminnallisten testien avulla varmistettiin logiikkaohjelman toiminta Phoenixin komponenteilla. Laitetestauksessa tutkittiin ainoastaan Phoenix Contactin ja Siemensin tuotteita, Wagon testilaitteiden saatavuusvaikeuksien vuoksi.

Testattu hajautusyksikkö koostui Profinet-yhteensopivasta kommunikointimoduulista ja erilaisista I/O-moduuleista. Testeissä käytetyt laitteet alla (kuva 13), missä Siemensin turvalogiikkaohjain (vas.) ja Phoenixin hajautusyksikkö (oik.).

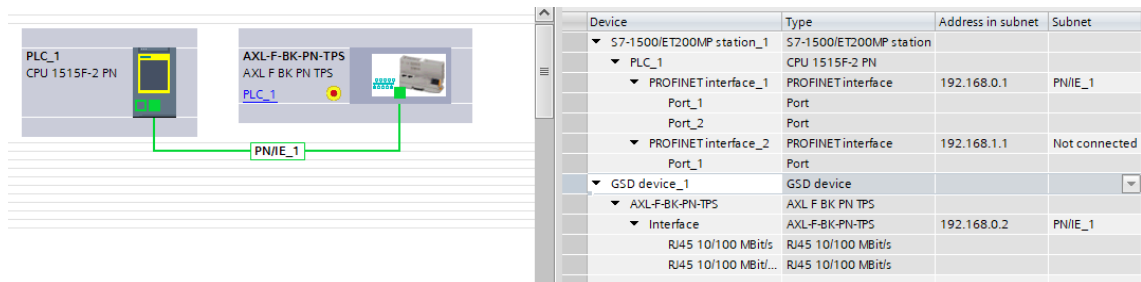


KUVA 13. Testilaitteet käyttötilassa.

Hajautukseen oli liitetty hätäpysäytyspiiri toiminnallista testausta varten. Sen avulla testattiin logiikkaan ohjelmoituja turvatoimintoja.

6.1 Laiteparametointi

Testaus aloitettiin tekemällä kyseisestä kokoonpanosta testiprojekti TIA Portaliin. Projektiin määritettiin testauksessa käytetty PLC ja hajautusyksikkö, sekä niiden välinen tiedonsiirtotopologia (kuva 14).



KUVA 14. Testilaitteiden välinen kommunikointi TIA Portalissa.

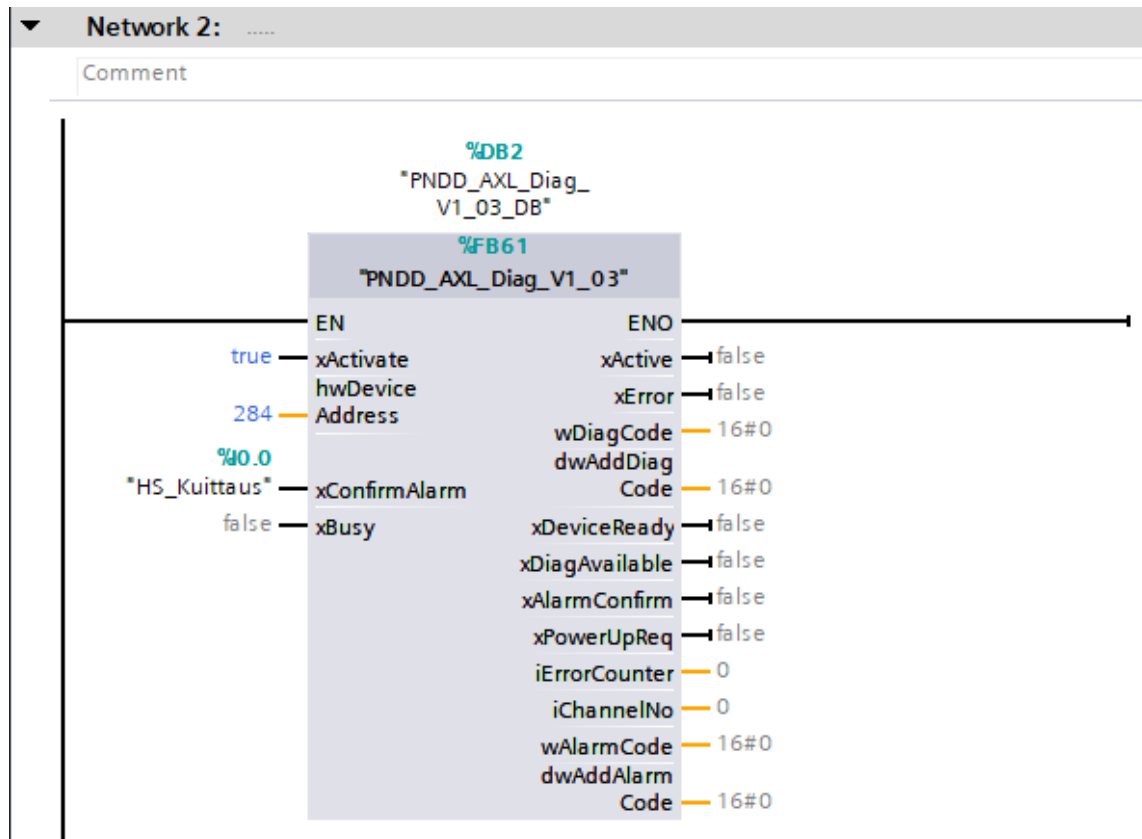
Phoenixin I/O-moduulit konfiguroitiin ja parametroidiin sovellukseen niiden GSD-tiedostojen avulla. Turvamoduuli vaati lisäksi erillisen Phoenixin parametointityökalun (iParCRC Calc) käyttöä, jotta se saatiin kommunikoidaan Siemensin S7-sarjan logiikan kanssa. Parametroidut moduulit tuotenimikkein alla (kuva 15).

Device overview				
	Module	...	Rack	Slot
	▼ AXL-F-BK-PN-TPS		0	0
	▼ Interface		0	0 X1
	RJ45 10/100 MBit/s		0	0 X1 P1
	RJ45 10/100 MBit/s_1		0	0 X1 P2
	AXL SE DO16/1_1		0	1
	AXL SE PSDI8/3 PS2.4_1		0	2
	AXL SE DI16/1_1		0	3
	AXL SE INC1 SYM_1		0	4
	AXL SE AI4 I 4-20_1		0	5
	AXL SE SC_1		0	6

KUVA 15. I/O-hajautuksen kokoonpano ohjelmointiympäristössä.

Laiteparametroidin jälkeen TIA Portaliin tehtiin kokoonpanon toimintaa vastaava logiikkaohjelma. Ohjelma tehtiin käyttämällä graafista Function Block Diagram -toimilohko-ohjelmointia. Pääohjelman lisäksi tarvittiin erillinen turvaohjelma turvamoduulin (PSDI8/3) testausta varten. Logiikkaohjelmaan sijoitettiin moduulin

laitekohtainen toimilohko (eng. function block) turvamoduulin diagnostiikkatietojen välittämiseksi logiikalle sekä vikakuittaustoiminnon suorittamista varten (kuva 16).



KUVA 16. Turvatulomoduulin toimilohko pääohjelmassa.

Phoenixilla oli saatavilla turvamoduuleilleen kokonainen toimilohkokirjasto moduuleiden ja Siemensin logiikkaohjaimien toimintojen yhteensovittamiseksi.

Laiteparametrointi oli testauksen kannalta tärkeää, jotta moduulien ominaisuudet saatiin halutulla tavalla käyttöön. Parametroinnilla samalla varmistuttiin, että testattavilla moduuleilla on valmius suorittaa tarvittavat toiminnot. Testejä varten tehyllä logiikkaohjelmalla puolestaan mahdollistettiin toiminnallisten testien suorittaminen. Logiikkaohjelmoinnilla havaittiin lisäksi Phoenixin toimilohkojen asetteluun tuomat lisävaiheet ohjelmistosuunnitteluun.

6.2 Testit ja tulokset

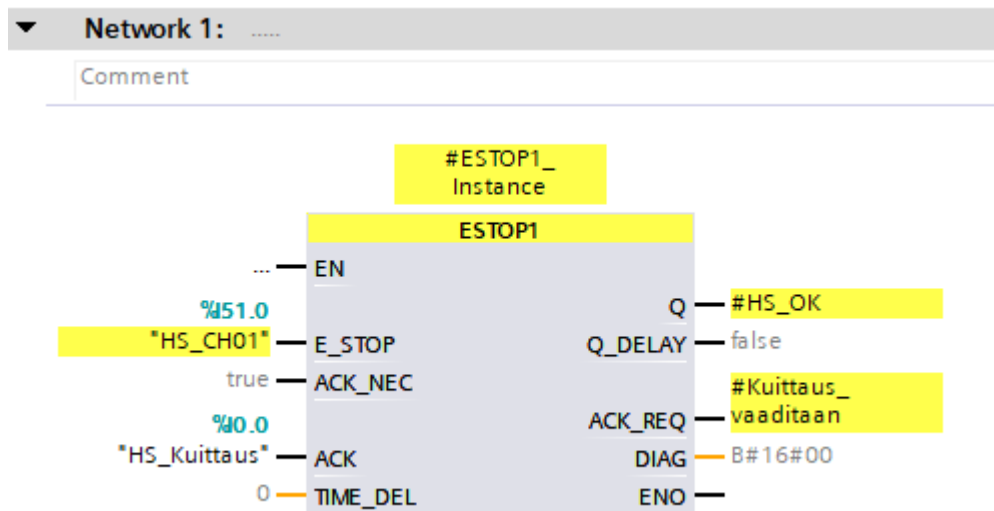
Laiteparametroinnin jälkeen valmis logiikkaohjelma ladattiin kokonaisuutena Siemensin logiikalle testausta varten. Testit aloitettiin tarkistamalla, että kaikkiin verkon laitteisiin saadaan yhteys logiikan kautta ja ne näkyvät online-tilassa aktiivisena. Laitteiden tilat parametroinnin jälkeen (kuva 17).

Device overview				
Module	...	Rack	Slot	
AXL-F-BK-PN-TPS		0	0	
Interface		0	0 X1	
RJ45 10/100 MBit/s		0	0 X1 P1	
RJ45 10/100 MBit/s_1		0	0 X1 P2	
AXL SE DO16/1_1		0	1	
AXL SE PSDI8/3 PS2.4_1		0	2	
AXL SE DI16/1_1		0	3	
AXL SE INC1 SYM_1		0	4	
AXL SE AI4 I 4-20_1		0	5	
AXL SE SC_1		0	6	

KUVA 17. I/O-moduulit yhteydessä logiikkaan.

Tarkastelun perusteella kyettiin toteamaan, että Phoenix I/O-laitteet kommunikoiivat reaaliajassa Siemensin logiikan kanssa. Lisäksi voitiin varmentaa Phoenixin laitteiden yhteensopivuus TIA Portal -ohjelmistoon. Mikäli laitteet olisivat olleet väärin parametroituja tai yhteensopimattomia, olisi se havaittu testien tässä vaiheessa ohjelmiston vikailmoituksen myötä. Kuvassa kommunikointimoduuli ilmoittaa vikatilastaan punaisella, mikä johtui kyseisen laitteen väärästä ohjelmistoversiosta. Tämä ei kuitenkaan estänyt järjestelmän toimintaa ja vikatila korjautui laiteohjelmistopäivityksen myötä.

I/O-moduulien toiminnalliset testit suoritettiin testaamalla hätäpysäytys- ja vika-kuittaustoiminto, samalla tarkastelemalla tilatietojen reaaliaikaista päivittymistä TIA Portalissa. Hätäpysäytystoiminto toteutettiin ohjelmassa Siemensin valmiilla ESTOP-toimilohkolla (kuva 18).



KUVA 18. Häätöpysäytyksen toimilohko turvaohjelmassa.

Häätöpysäytys toimi ohjelmassa tarkoituksen mukaisella tavalla. Toiminnallisten testien perusteella Phoenixin laitteiden todettiin toimivan logiikkaohjelman ja Siemensin toimilohkojen mukaisesti. Lisäksi fyysisten moduulien merkkivaloista pysytettiin havaitsemaan I/O-signaalien toiminta laitetasolla. Testien perusteella laitteiden keskinäinen synkronoituminen voitiin onnistuneesti varmentaa.

7 LOPPUTULOS

Lopputuloksena työssä todettiin, että Siemensin PLC:llä ja järjestelmillä toteutetuissa ratkaisuissa kannattaa ensisijaisesti käyttää sen valmistamia hajautetun I/O:n komponentteja. Tälle perusteena oli valmistajien välisten ohjelmistojen mahdolliset integrointiongelmat. Käytännössä aina, kun eri valmistajien järjestelmiä ja tuotteita käytetään ristiin, on riskinä erilaiset tekniset yhteensovitusongelmat. Tutkimuksen perusteella ei myöskään löydetty suoranaisia etuja, mitä vaihtoehtoisilla tuotteilla kyettäisiin saavuttamaan. Vaihtoehtoisten tuotteiden käyttö voisi kuitenkin tulla kyseeseen esimerkiksi tuotesaatavuusongelmien myötä.

Siemensin hajautusyksikön voitiin todeta olevan korvattavissa ainakin Phoenixin tuotteilla. Wagon tuotteiden osalta analysointia ei kyetty tekemään loppuun asti testilaitteiden puutteen takia. Molempien laitevalmistajien tuotteet olivat kuitenkin teknisten ominaisuuksiensa puolesta käyttötarkoitukseen soveltuvia laitteita. Laitetestien onnistunut tulos Phoenixin osalta puoltaa täten myös Wagon laitteiden yhteensopivuutta Siemensin järjestelmiin.

8 KORVATTAVUUDEN ANALYSOINTI

Yleisesti komponenttipulan tai muiden tuotesaatavuusongelmien ratkaiseminen tulee olemaan osa teollisuutta tulevaisuudessa. Komponenttipulat ovat luonteeltaan syklisiä ja voivat vaihdella komponenttityypin ja aikakauden mukaan. Tämän vuoksi yritystoiminnassa, saatetaan hetkellisesti toimivien toimitusketjujen perusteella sivuuttaa tulevaisuuden toimitusvarmuudelliset tekijät. Kriittisten järjestelmäkomponenttien osalta olisi kuitenkin tärkeää kartoittaa etukäteen vaihtoehtoiset tuotteet toimitusongelmien varalta.

Tutkimuksessa tehdyn tuotevertailun ja laitetestauksen perusteella on kyetty analysoida Siemensin ET 200SP I/O-hajautusyksikön korvattavuutta teollisuusautomaatiojärjestelmissä.

Tuotevaatimusten pohjalta tehdyssä teknisten ominaisuuksien vertailussa ei ilmennyt korvattavuutta estäviä tekijöitä. Laitteet olivat keskenään hyvin samanlaisia pieniä ominaisuuseroja lukuun ottamatta. Lisäksi ne olivat samoihin toimintoihin tarkoitettuja Profinet-laitteita, mikä oli yksi selittävä tekijä niiden samankaltaisuudelle.

Kustannusvertailusta voitiin todeta, että se on suuntaa antava, mutta ei ratkaiseva eikä tuotekorvattavuutta rajoittava tekijä. Kustannusvertailua vääristivät yrityskohtaiset tuotehinnat ja -alennukset. Lisäksi ajoittaiset hinnanmuutokset vaikuttivat vertailun lopputulemaan. Nämä tekijät ovat usein riippuvaisia laitetoimittajien ja yritysten välisistä sopimuksista. Tuotehinnat kuitenkin muodostavat tärkeän tarkasteltavan osa-alueen tilanteessa, jossa laitevalmistajaa I/O-komponenttien osalta vaihdettaisiin.

Laitetestauksen lopputuloksena saatiin Phoenixin I/O-laitteiden yhteensopivuus Siemensin järjestelmiin varmistettua. Testeissä oleellista oli testattujen tuotteiden kommunikoinnin ja toiminnallisuuden todentaminen Siemensin ohjelmoitavan logiikan kanssa. Lisäksi toiminnallisilla testeillä todettiin turva-automaatiomoduurien toiminta laite- ja ohjelmistotasolla. Laitevalmistajien välisen integroinnin

haasteita testeissä ei merkittävältä osin löytynyt. Kuitenkin esimerkiksi ylimääräisten toimilohkojen tarve logiikkaohjelmassa, voisi lisätä työkuormaa tulevien projektien ohjelmistosuunnittelussa.

Työssä tehdyt testaukset eivät resurssisyistä vastanneet täysin todellisen automaatiojärjestelmän laajuutta. Testituloksia voidaan pitää kokonaisuuden kannalta suuntaa antavina, mutta joukko erityisominaisuuksia jäi testien ulkopuolelle.

LÄHTEET

Brightly Software 2021. An Introduction to IoT. Verkkosivu. Luettu 28.9.2023.
<https://www.brightlysoftware.com/blog/introduction-iiot-cmms-and-isa-95-framework>

Harrico PTE Oy 2023. PROFINET ja muut teollisuus-Ethernet tekniikat. Verkkosivu. Luettu 9.10.2023.
<https://www.harrico.fi/profinet-teollisuus-ethernet-testerit>

Heikki Laakso. Ohjelmoitavat logiikat. Teknillinen korkeakoulu. Luettu 19.9.2023.
https://heikkilaakso.com/opetus/op/H_1_Ohjelmoitavat_logiikat.pdf

IEC 61511-0:2018, 6 s. Turva-automaatiotoiminnot. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 28.10.2023. Vaatii käyttöoikeuden.
<https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/IEC/ID5/6/695823.html.stx>

IEC 61511-0:2018, 7 s. Turva-automaatiokomponentit. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 28.10.2023. Vaatii käyttöoikeuden.
<https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/IEC/ID5/6/695823.html.stx>

International Society of Automation 2023. ISA95, Enterprise-Control System Integration. Verkkosivu. Luettu 12.10.2023.
<https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-standards-committees/isa95>

Kataja-aho 2020. Turva-automaation erityisvaatimukset. Tampereen yliopisto. Diplomityö. Luettu 27.10.2023.
<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/121529/Kataja-ahoJoona.pdf?sequence=2>

Metropolia 2015. Turvallisuuden ja eheystasojen määrittäminen. Verkkosivu. Luettu 28.10.2023.
<https://wiki.metropolia.fi/pages/viewpage.action?pageId=114131171>

Metropolia 2017. Turva-automaatio. Verkkosivu. Luettu 20.10.2023.
<https://wiki.metropolia.fi/display/alykas/Turva-automaatio>

Phoenix Contact. Remote I/O-systems. Verkkosivu. Luettu 28.3.2023.
<https://www.phoenixcontact.com/fi-fi/tuotteet/io-component-axl-f-bk-pn-tps-2403869>

Profinet University 2023. OPC UA and PROFINET. Verkkosivu. Luettu 5.10.2023. <https://profinetuniversity.com/industrial-automation-ethernet/opc-ua-profinet/>

Siemens 2023. SIMATIC ET 200SP. Verkkosivu. Luettu 19.9.2023.
<https://www.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/io-systems/et-200sp.html>

Siemens Manual 2019. DI 8x24VDC ST (6ES7131-6BF01-0BA0). Verkkosivu. Luettu 27.10.2023.

https://cache.industry.siemens.com/dl/files/552/59753552/att_82860/v1/et200sp_di_8x24vdc_st_manual_en-US_en-US.pdf

Siemens Manual 2022. F-DI 8x24VDC HF (6ES7136-6BA01-0CA0). Verkkosivu. Luettu 27.10.2023.

https://cache.industry.siemens.com/dl/files/402/109803402/att_1083697/v1/et200sp_f-di_8x24vdc_hf_manual_en-US_en-US.pdf

Siemens Industry Mall 2022a. SIMATIC S7-1500F, CPU 1515F-2 PN. Verkkosivu. Luettu 22.9.2023.

<https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6ES7515-2FM02-0AB0>

Siemens Industry Mall 2022b. SIMATIC S7-1500F, CPU 1517F-3 PN/DP. Verkkosivu. Luettu 22.9.2023.

<https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6ES7517-3FP00-0AB0>

Tukes 2021. Turva-automaatio prosessiteollisuudessa. Verkkosivu. Luettu 26.10.2023.

[https://tukes.fi/turva-automaatio-prosessiteollisuudessa#turvatoimintojen-turvallisuusvaatimukset---vaatimusten-maarittely-\(vaihe-3\)](https://tukes.fi/turva-automaatio-prosessiteollisuudessa#turvatoimintojen-turvallisuusvaatimukset---vaatimusten-maarittely-(vaihe-3))

Valmistajat. Yleisimmät automaatiojärjestelmät ja niiden vertailu. Verkkosivu. Luettu 12.10.2023.

<https://valmistajat.fi/menetelmat/elektroniikka/automaatio-ja-automaatiojarjestelmat>

Wago 2023. Fielbus Coupler. Luettu 22.9.2023.

<https://www.wago.com/global/i-o-systems/fieldbus-coupler-profinet-io/p/750-375>