



INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**VANADE ALAJAAMADE KAUGHALLATAVATEKS
MUUTMISE VÕIMALUSED SILPOWER 6/0,4 KV
ALAJAAMADE NÄITEL**

**THE REMOTE CONTROL IMPLEMENTATION
POSSIBILITIES FOR OLD SUBSTATIONS ON THE
EXAMPLE OF SILPOWER 6/0,4 KV SUBSTATIONS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Ija Ivanova

Üliõpilaskood: 204149AAVM

Juhendajad: professor Jako Kilter,
doktorant Marko Tealane

Tallinn 2022

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneriplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

21.12.2022

Autor: */allkirjastatud digitaalselt/*

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja: */allkirjastatud digitaalselt/*

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."20.....

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Ija Ivanova (*autori nimi*)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
VANADE ALAJAAMADE KAUGHALLATAVATEKS MUUTMISE VÕIMALUSED SILPOWER
6/0,4 KV ALAJAAMADE NÄITEL,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendajad on professor Jako Kilter ja doktorant Marko Tealane,

(juhendaja nimi)

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

21.12.2022 (*kuupäev*)

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Ija Ivanova

Lõputöö liik: Magistritöö

Töö pealkiri: Vanade alajaamade kaughallatavateks muutmise võimalused Silpower 6/0,4 kV alajaamade näitel

Kuupäev:
12.12.2022

61 lk (*lõputöö lehekülgede arv koos lisadega*)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): professor Jako Kilter, doktorant Marko Tealane

Töö konsultant (konsultandid): Silpower AS elektripaigaldiste osakonna juht Sergei Aksjonov

Sisu kirjeldus:

Tänapäeval töötavad ühes võrgus uued kaasaegsed alajaamad paralleelselt vanade alajaamadega, mis ei ole nii efektiivsed ja töökindlad. See mõjutab oluliselt elektrivõrkude tööd ja kvaliteeti. See probleem on väga aktuaalne ka Silpower AS-i elektrivõrgu jaoks. Antud magistritöö eesmärgiks on Silpower AS-i elektrivõrgu arendamisega jätkamine ning töökindluse parendamine alajaamade renoveerimise kaudu kasutades kaasaegseid ja jätkusuutlikke lahendusi.

Töö käigus on välja selgitatud ja analüüsitud Silpoweri viie alajaama renoveerimise ja kaughallatavateks muutmise võimalused, võrreldud võimalikud lahendused PLC ja RTU baasil, nende efektiivsus ja maksumus, valitud sobiv lahendus. Valik on teostatud kolme variandi vahel: Siemens SICAM A8000 RTU, Hitachi Energy RTU530 ja Siemens SIMATIC S7 PLC. Kõikide kriteeriumite järgi kõige optimaalsem osutus Hitachi Energy lahendus, mis tagab vajalikku töökindlust ning ei nõua suuri kulusid. Praktilise osa käigus on koostatud alajaama sekundaarosa projekt, kus on määratud vajalikud täiendused alajaama sekundaarseadmete osas, alajaamadest SCADA-sse edastatavate signaalide loetelu koos kõikide vajalike aadresside ja parameetritega, väljatöötatud andmeside lahendus alajaamade ja juhtimiskeskuse vahel.

Antud töö on rakenduslik ning suunatud etteantud eesmärki saavutamisele lahendada konkreetse ettevõtte probleemi. Aga samas võib see töö olla kasutatud ka näidiseks teistele ettevõtetele sarnaste probleemide lahendamisel. Samuti võivad seda kasutada tudengid ja noored telemaatika spetsialistid, kes alles alustavad oma töötegevust ning neil ei ole töö iseloomust selget ettekujutust.

Märksõnad: alajaamad, kaugjuhtimine, RTU, SCADA, telemaatika, magistritöö.

ABSTRACT

<i>Author:</i> Ija Ivanova	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> The remote control implementation possibilities for old substations on the example of Silpower 6/0,4 kV substations	
<i>Date:</i> 21.12.2022	61 pages (the number of thesis pages including appendices)
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> professor Jako Kilter, doctoral candidate Marko Tealane	
<i>Consultant(s):</i> Silpower AS Head of the Electrical Installations Department Sergei Aksjonov	
<i>Abstract:</i> <p>Nowadays new substations are connected to the same network as the old ones. The problem is that old substations are less powerful but many of them are still in use and impact greatly on electrical grid performance and quality. This is the case of Silpower AS power station and the aim of this thesis is to improve its electrical grid by adopting modern and long-term solutions when renewing substations.</p> <p>The thesis analyses different options of upgrading Silpower substations with remote control, compares possible solutions using PLC and RTU, their efficiency and costs, and describes adopted solution. A choice has been made between three devices: Siemens SICAM A8000 RTU, Hitachi Energy RTU530 and Siemens SIMATIC S7 PLC. By all the criteria, Hitachi Energy solution proves to be the most appropriate as it ensures stable operation and allows to avoid high expenses. As part of practical work, the project of the substations secondary part has been prepared, where all necessary adjustments regarding substations secondary equipment have been determined, the list of signals transmitted from the substations to the SCADA with all the necessary addresses and parameters has been conceived, the solution of the communication between the substations and the control center has been developed.</p> <p>This master's thesis is practical and aimed at addressing this particular company's needs, but at the same time it can serve as an example for other companies who may have to deal with similar issues. It can also be helpful for students and young telematics specialists who are just starting their activity and don't have a clear idea of the nature of the work.</p>	
<i>Keywords:</i> substations, remote control, RTU, SCADA, telematics, master thesis.	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Vanade alajaamade kaughallatavateks muutmise võimalused Silpower 6/0,4 kV alajaamade näitel**

Lõputöö teema inglise keeles: **The remote control implementation possibilities for old substations on the example of Silpower 6/0,4 kV substations**

Üliõpilane: **Ija Ivanova, 204149AAVM**

Eriala: **elektroenergeetika**

Lõputöö liik: **magistritöö**

Lõputöö juhendaja: **professor Jako Kilter,**

Lõputöö kaasjuhendaja: **doktorant Marko Tealane**
(ettevõtte, amet ja kontakt)

Lõputöö ülesande kehtivusaeg: 2022/2023 2022/2023 Sügis
(kehtivusaja annab juhendaja)

Lõputöö esitamise tähtaeg: **15.12.2022**

/allkirjastatud digitaalselt/

Üliõpilane (allkiri)

/allkirjastatud digitaalselt/

Juhendaja (allkiri)

/allkirjastatud digitaalselt/

Õppekava juht (allkiri)

/allkirjastatud digitaalselt/

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Teema on väga oluline ja aktuaalne Silpower AS-i jaoks. Antud töö on mingil määral rakenduskõrghariduse lõputöö edasiarendus, kuna selle töö raames jätkatakse Silpoweri elektrivõrgu töökindluse parendamise ja SCADA arendamisega.

Nagu rakenduskõrghariduse lõputöös on öeldud, paljud Silpoweri alajaamad on „pimedad“, nende juhtimine on võimalik ainult kohapeal, dispetšer saab teada avariide tekkimisest tarbijatelt saadud telefonikõnede kaudu ning avariide korral avarii põhjuste väljaselgitamiseks ja likvideerimiseks ning ümberlülituste teostamiseks personal peab kohale tulema.

Käesolevas töös läbivaadatavad 6/0,4 kV alajaamad asuvad päris kaugel ning situatsioonidele reageerimine võtab palju aega. Kaugjuhtimine võimaldaks parendada töökindlust, ennetada avariid, vähendada oluliselt reageerimisaega, muuta personali tööd efektiivsemaks.

Alajaamad on vanad ning nende kaughalduse võimalused on piiratud, kuna antud alajaamade projekteerimisel ei olnud kaugjuhtimisega arvestatud, seega väga oluline on läbi vaadata erinevaid variante ja leida optimaalse lahenduse nii majanduslikku, kui ka töökindluse seisukohast. Selleks analüüstitakse nii standardne lahendus RTU baasil, kui ka lahendus PLC baasil, mis võimaldab ühes seadmes koondama nii relee (kohtterminal/IED), kui ka RTU (kaugterminal) funktsioone.

Kuna vanu alajaamu on veel kasutusel päris palju, välja töötatud lahendus oleks kasulik ka teistele ettevõtetele, kellel on sarnased probleemid.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on vanade alajaamade kaugjuhitavateks muutmise võimaluste analüüsimine ning parima lahenduse väljaselgitamine ja elluviimine.

Töö praktilise osa tulemuseks on Silpower AS-i elektrivõrgu töökindluse parendamine läbi vanade olemasolevate alajaamade kaughallatavateks muutmise ja olemasoleva SCADA laiendamise.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Silpoweri vanade alajaamade kaugjuhitavaks muutmine on võimalik näiteks RTU või programmeeritavate kontrollrite (PLC) abil. Töö raames parima lahenduse leidmiseks teostatakse:

- võimalike lahenduste töökindluse analüüs – analüüsitakse lahenduste eelised ja puudused, töökindluse tagamise võimalused ja peamised probleemid;

- võimalike lahenduste majanduslik analüüs – analüüsitakse, mis lahendus, kas RTU baasil või PLC baasil on majanduslikult otstarbekam. Analüüsitakse nii seadmete maksumus, kui ka programmeerimise ja seadistamise kulud;
- teostatud analüüside alusel optimaalse lahenduse valimine, arvestades majanduslike, töökindluse ja projekti teostamise ajalisi piiranguid;
- valitud lahenduse elluviimine.

4. Lähteandmed

Püstitatud eesmärkide saavutamiseks on plaanis lähteandmeteks kasutada ettevõtte andmeid, kirjandust ja teadusartikleid, antud ala spetsialistide arvamusi. Majandusliku analüüsi teostamiseks kasutatakse sh erinevatest allikatest leitud informatsiooni (näiteks seadmete maksumus tootjate kodulehtedelt) ning võimalusel ka erinevate ettevõtete hinnapakumisi.

5. Uurimismeetodid

Tulemusteni jõudmiseks plaanitakse analüüsida ja võrrelda kaks lahendust, mille jaoks kasutatakse peamiselt kvalitatiivseid meetodeid – kirjandusest ja internetist andmete kogumine ja nende analüüs. Majandusliku analüüsi teostamiseks kasutatakse sh ka tabelarvutused Excelis.

6. Graafiline osa

Graafiline osa on peamiselt töö põhiosas, vajadusel lisadesse läheb kilpide projekt.

7. Töö struktuur

1. Teoreetiline osa:
 - 1.1. Alajaamade kaugjuhtimise põhimõtted
 - 1.2. Vanade alajaamade kaugjuhitavateks muutmise võimalused
 - 1.3. Silpoweri alajaamade kaugjuhitavateks muutmise võimalikud lahendused
 - 1.4. Lahenduste töökindluse analüüs
 - 1.5. Lahenduste majanduslik analüüs
 - 1.6. Optimaalse lahenduse valimine ja põhjendused
2. Praktiline osa:
 - 2.1. Projekteerimine
 - 2.2. Seadmete programmeerimine ja seadistamine
 - 2.3. Paigaldatud süsteemi testimine
 - 2.4. Valmis lahenduse töösse viimine.

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Interneti allikad:

IEEE Xplore digital library - <https://ieeexplore.ieee.org>

Electrical Engineering Portal - <https://electrical-engineering-portal.com/>

Tootjate (Siemens, ABB jm) kodulehed ja andmebaasid

Õpikud:

M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt ja J. Kilter, Jaotusvõrgud, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2007.

M. Meldorf, T. Tikk ja J. Kilter, Elektrivõrgu operatiivjuhtimissüsteem, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2010.

9. Lõputöö konsultandid

Silpower AS-i elektripaigaldiste osakonna juht Sergei Aksjonov.

10. Töö etapid ja ajakava

- kirjanduse läbitöötamine ja lähteandmete kogumine (juuli 2021);
- teoreetilise osa kirjutamine (juuli- 20.12.2021);
- teoreetilise osa alusel lahenduse valik (20.12.2021-15.05.2022);
- praktilise osa teostamine (15.05.2022 - 01.08.2022);
- tulemuste kirjeldamine (01.08.2022 - 25.09.2022);
- kokkuvõtte koostamine (25.09.2021 – 15.10.2022);
- töö esimene versioon valmis (15.10.2022);
- juhendajale läbilugemiseks saatmine (15.10.2022);
- paranduste sisseviimine (29.10.2022 – 15.11.2022);
- juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine (15.11.2022);
- töö lõplik versioon valmis (15.12.2022)

SISUKORD

EESSÕNA	11
Lühendite ja tähiste loetelu	12
SISSEJUHATUS	13
1 ALAJAAMA ANDMESIDE SÜSTEEM	15
1.1 Alajaamade kaughaldus	15
1.2 Andmeedastus SGAM-i elektrivõrgu mudeli baasil.	18
1.3 Alajaama andmeside eripärad	20
1.4 Alajaama infovahetuse automatiseerimine	22
1.5 Alajaamade tüübid ning kaughalduse võimalikkus	24
1.6 Alajaamade telemaatika lahendused	28
2 SILPOWERI ALAJAAMAD	33
2.1 SEJ alajaamade kirjeldus	33
2.2 Seadmete valik	35
2.3 Seadmete konfiguratsioon	37
2.4 Side alajaamade vahel	40
2.5 Lahenduste võrdlus	41
2.6 Töökindluse analüüs	47
2.7 Majanduslik analüüs	48
2.8 Optimaalse lahenduse valimine	49
3 LAHENDUSE VÄLJATÖÖTAMINE JA RAKENDAMINE	51
3.1 Projekteerimine	51
3.2 Süsteemi konfigureerimine	54
3.3 Süsteemi testimine	56
3.4 Peamised alajaama renoveerimise probleemid	57
KOKKUVÕTE	58
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	59

EESSÕNA

Käesolev lõputöö teema sündis autori ettepanekul pärast konsulteerimist ja arutamist ettevõtte konsultandiga ning lähtudes olukorrast antud ettevõttes. Sellel teemal on rakenduslik tähtsus, kuna see võimaldab ettevõttel oluliselt parendada osutatava teenuse kvaliteeti. Põhilised algandmed töö teostamise eest olid esitatud Silpower AS-i poolt. Tööde teostamise jaoks vajalikud teadmised olid saadud sealhulgas suheldes valdkonna spetsialistidega. Lõputöö kirjutamise käigus saadud teadmisi ja kogemust rakendatakse edaspidi tööülesannete täitmisel.

Autor soovib avaldada tänu antud lõputöö konsultandile Silpower AS-i elektripaigaldise osakonna juhatajale Sergei Aksjonovile antud töö teostamise võimaldamise eest, Siemens Energy OY Eesti filiaali insenerile Alari Ehanurmele, Hitachi Energy Estonia AS-i inseneridele Riho-Hannes Põllule ja Aleksandr Sekirinile tehnilise toe ja innustamise eest.

Täna ülikoolipoolseid juhendajaid Jako Kilter ja Marko Tealane, kes motiveerisid mind antud töö lõpuni viima.

Märksõnad: alajaamad, kaugjuhtimine, SCADA, telemaatika, magistritöö.

Lühendite ja tähiste loetelu

AJ – alajaam

ATL – automaatne taaslülitamine

HMI – *Human Machine Interface*

EMS – *Energy Management System*

GPS - *Global Positioning System*

IED – kohtterminal (*Intelligent Electronic Device*)

I/O – *Input/Output*

LL – lahkülüiti

ML – maanduslüliti

PLC - *Programmable Logic Controller*

RLA – reservilülitusautomaat

RTOS – *Real Time Operating System*

RTU – kaugterminal (*Remonte Terminal Unit*)

SCADA – *Supervisory Control And Data Acquisition*

SGAM – *Smart Grid Architecture Model*

SNTP – *Simple Network Time Protocol*

SVL – sektsioonivõimsuslüliti

VL – võimsuslüliti

VLAN - *virtual local area network*

SISSEJUHATUS

Alajaamad mängivad tähtsat rolli elektrienergia edastamisel tootjatelt tarbijatele. Mida kaasaegsem on alajaam, seda tõhusam on elektrivõrkude haldamise ja juhtimise protsess. Kaasaegsed alajaamad on digitaliseeritud ja täielikult automatiseeritud, mis võimaldab efektiivselt korraldada vajalikke kaitsefunktsioone ning tagab töökindlust. Tänapäeval töötavad uued kaasaegsed alajaamad ühes võrgus paralleelselt vanade alajaamadega, mis ei ole nii efektiivsed ja töökindlad. Oluliseks probleemiks on see, et vanu alajaamu on veel kasutusel päris palju ning see mõjutab oluliselt elektrivõrkude tööd ja kvaliteeti.

Ressursside piiratuse tõttu ei ole tihti võimalik asendada vanu alajaamu uute alajaamadega ning probleemi lahendamiseks renoveeritakse neid ja parendatakse kasutades kaasaegseid lahendusi ja tehnoloogiaid. Antud probleem on aktuaalne ka Silpower AS-i elektrivõrgu jaoks ning lõputöö eesmärgiks on ettevõtte elektrivõrgu töökindluse parendamine läbi kaasaegsete lahenduste kasutamise alajaamade renoveerimisel.

Silpower AS on eraettevõtte, kes varustab Sillamäe soojuselektrijaamas toodetud soojusenergiaga soojusvõrkude kaudu Sillamäe linna ja tootmistsooni piirkonda ning elektrienergiaga elektrivõrkude kaudu tootmistsoonis asuvaid ettevõtteid, samuti kasutatakse toodetud elektrienergia Silpoweri soojuselektrijaamade omatarbeks. Silpower AS-i klientide hulgas on tootmisettevõtted, kellele on tootmisprotsessi katkestamatu iseloomu tõttu isegi lühiajalised energia ja eriti elektrienergia edastamise häired või katkestused väga kriitilised ning teatud juhtudel võivad tekitada ka keskkonna saastamise ohtu. Sellest tulenevalt peavad Silpoweri alajaamad olema renoveeritud ja moderniseeritud tagades tarbijatele katkestamatu energia edastamist. Silpower alustas antud töödega mitu aastat tagasi ning kavatses nendega jätkata arendades oma elektrivõrku.

Esimest Silpoweri alajaama renoveerimise projekti teostas antud magistritöö autor Silpoweri elektritsehhi juhataja juhendamisel. Selle projekti tulemusena on samuti kirjutatud ja edukalt kaitstud lõputöö „Silpower alajaamade kaugjuhtimissüsteemi laiendamine“. Lõputöö teostamise käigus on uuritud ettevõtte SCADA laiendamise võimalused ning töö praktilises osas on tehtud vana alajaama moderniseerimine telemaatika osas ja SCADA laiendamine.

Antud magistritöö eesmärgiks on jätkata Silpoweri elektrivõrgu arendamist kasutades kaasaegseid ja jätkusuutlikke lahendusi. Peamiseks erinevuseks eelmisest tööst on see, et eelmises töös oli analüüsitud ja kirjeldatud ühe konkreetse alajaama moderniseerimine, antud töös aga püütakse analüüsida erinevat tüüpi alajaamade

renoveerimise võimalusi ning praktilise töö osas ettevõtte viie ühetüübilise alajaama moderniseerides lahendada töökindluse tagamise probleemi. Töö teostamisel tuleb arvestada mitte ainult igaühe alajaama tüübiga, vaid ka nende paiknemisega sidevõrgu korraldamise ja signaalide edastamise seisukohast.

Töö käigus on analüüsitud ja võrreldud võimalikud lahendused PLC ja RTU baasil, nende efektiivsus ja maksumus, on valitud sobiv lahendus. Kuna antud tööga lahendatakse konkreetse ettevõtte probleemi, on see töö rakenduslik ning suunatud konkreetse eesmärgi saavutamisele. Aga samas võib see töö olla kasutatud ka näidiseks teistele ettevõtetele sarnaste probleemide lahendamisel. Samuti võivad seda kasutada tudengid ja noored telemaatika spetsialistid, kes alles alustavad oma töötegevust ning neil ei ole töö iseloomust selget ettekujutust.

Magistritöö kirjutamise käigus on autori poolt teostatud järgmised tööd:

- vanade alajaamade telemaatika osas renoveerimise võimaluste väljaselgitamine;
- Silpoweri alajaamade kaughallatavateks muutmise võimaluste analüüsimine ja parima lahenduse valimine;
- tehnilise projekti koostamine;
- seadmete konfiguratsioonide väljatöötamine.

Lõputöö esimeses osas on toodud tehnoloogiate üldised teoreetilised kirjeldused ja valdkonna ülevaade. Teises osas on kirjeldatud lõputöö objektid – renoveerimist vajavad alajaamad, hetkeseis ning vajalikud meetmed probleemi lahendamiseks. Lõputöö viimases osas käsitletakse lahenduse väljatöötamine ja rakendamine. Magistritöö praktilise osa teostamise käigus väljatöötatud materjalid (näiteks kilpide projektid, võrguskeemid) avalikustatakse ainult osaliselt arvestades ettevõtte nõudmisi.

Antud töö realiseerimiseks vajalik arvutitarkvara on järgmine:

- Engineering Base - RTU kilbi projekteerimine;
- RTUtil500 – RTU konfiguratsiooni koostamine;
- RTU500 HMI Editor – HMI liidese täiendamine;
- RTU530 Web server – RTU konfigureerimine.

1 ALAJAAMA ANDMESIDE SÜSTEEM

Tänapäeval alajaam ei ole ainult elektriseadmete kogum elektrienergia edastamiseks tarbijateni, vaid ka keeruline infotehnoloogiline süsteem, mis peab tagama elektrienergia ülekandmise kvaliteeti, töökindlust ja ohutust. IT-süsteemi abil realiseeritakse alajaama automaatika ja kaitsefunktsioonid, korraldatakse alajaama kaughaldus.

Uue alajaama projekteerimisel ja ehitamisel luuakse andmeside süsteem, mille abil teostatakse andmevahetus alajaama ja juhtimiskeskuse vahel. Andmeside süsteem peab vastama kõikidele nõudmistele, olema turvaline ja töökindel. Alajaama kaughalduse põhimõtted ja andmeside eripärad on läbivaadatud antud magistr töö osas.

1.1 Alajaamade kaughaldus

Alajaama kaughalduse eesmärgiks on alajaama juhtimise ja monitooringu teostamine kaugelt. Tavaliselt teostatakse kaughaldus juhtimiskeskuse dispetšerite poolt. Kaughalduse eeliseks on elektrivõrgu kõikide alajaamade korraga monitooring ja vajadusel juhtimine. See võimaldab pidevalt olukorda analüüsida ja kiiresti kriitilistele muutustele reageerida. Vajalikke ümberlülitusi teostatakse palju kiiremini, kuna personal ei pea kohale minema. See võimaldab oluliselt vähendada reageerimisaega ja muuta personali tööd efektiivsemaks ning seega parendada elektrivõrgu töökindlust, ennetada avariid. Alajaama kaughalduse korraldamiseks peavad alajaamas olema kasutatud vastavad seadmed ja tehnoloogiad.

Alajaamade primaar- ja sekundaarosad

Alajaam koosneb primaar- ja sekundaarosadest. Primaarosa seadmed on kõik seadmed, mis osalevad energia ülekandmises ja muundamises, nagu liinid, trafod, latistus, lülitid jne [1] Sekundaarseadmeteks on releed, *remote terminal unit* (RTU), konverterid jne, mida kasutatakse alajaama kaitse ning lokaal- ja kaugjuhtimise korraldamiseks, andmete edastamiseks SCADA-sse ning vajadusel ka teistele alajaamadele. Antud töö eesmärgi seisukohast on tähtis just alajaama sekundaarosa, kuna selle osa seadmete abil tagatakse ja teostatakse alajaama kaugjuhtimine ja monitooring.

Võrreldes vanemate alajaamadega üksnes elektriliste sidemetega, kus sekundaarosa seadmeteks kasutati elektromehaanilisi releesid, koosneb kaasaegsete alajaamade sekundaarosa omavahel ühendatud automaatika-, juhtimis-, mõõte- ja

kaitseseadmetest, mille vahel toimub pidev digitaalsignaalide vahetamine. Andmevahetus on korraldatud võrguseadmete, kanalite ja tehnoloogiate kasutamise abil.

Alajaama releekaitse ja automaatika funktsioonid on tavaliselt ühendatud ühes kohtterminalis (IED). Kohtterminali peamisteks ülesanneteks on lokaalne juhtimine, kaitse, mõõtmine, side ja andmevahetus [1]. Tänapäeval kasutatakse mikroprotsessoritel põhinevaid releesid (*Intelligent Electronic Device* – IED), mis täidavad erinevaid eesmärke. Kõik selliste seadmete signaalid on digitaalsed ning seega on lihtne korraldada alajaama andmeside ja signaalide edastamist süsteemide vahel. Tänu sellele täidavad releed nii kaitse- ja automaatjuhtimist kui ka andmehõive ja andmeedastuse funktsioone, mis võimaldab alajaama täielikult digitaliseerida.

Kohtterminali tarkvaraks on reaalaaja operatsioonisüsteem (*Real Time Operating System* – RTOS), mis koosneb järgnevatest osadest [2]:

- süsteemne osa - draiverid relee riistvaraga suhtlemiseks;
- *Human Machine Interface* (HMI) - esipaneeli ekraani pilt; mille kaudu on võimalik relee seadistamine või seisundi vaatamine;
- rakenduslik osa – kaitsete sätestamine, loogika programmeerimine;
- lisafunktsioonid - muud funktsioonid, näiteks kohtterminali tarkvara uuendamise funktsioon, kommunikatsiooni funktsioon, enesetestimise funktsioonid (*self-diagnostics*) [2]

Kohtterminaale on võimalik kasutada lokaalselt, tagades alajaama töökindlust ilma signaalide edastamiseta SCADA-sse, aga see ei ole kooskõlas kaughallatava alajaama kontseptsiooniga, kuna antud juhul on monitooringu teostamine võimalik ainult kohapeal ning vajalikke ümberlülitusi tegemiseks või kaitse rakendamisel tekkinud probleemi väljaselgitamiseks peab personal kohale tulema. Seega on peamiselt kõik alajaama sekundaarosa seadmed, nagu kohtterminalid, mõõturid, muud kaitseseadmed ühendatud kohtvõrku, mis omakorda edastab signaale juhtimiskeskusse.

Kaughallatava alajaama võrguseadmed

Alajaama kaughalduse korraldamiseks peab olema loodud andmeside süsteem, mille abil edastatakse signaale alajaama ja juhtimiskeskuse vahel. Andmeside süsteem on andmesidevõrkude kogum, mille abil toimub andmevahetus. Andmesidevõrgud koosnevad omakorda võrguseadmetest ja andmeedastuse kanalitest.

Kaughallatava alajaama andmesidevõrgu konfiguratsioon sõltub sh alajaama suurusest ja tähtsusest. Mida suurem on alajaam, seda keerulisem on alajaama andmesidevõrk. Võtmealajaamade puhul peab olema tagatud sealhulgas ka tähtsamate alajaama sõlmede reserveerimine. Andmesidekanalid kujutavad ennast nii füüsilist meediat, näiteks keerdpaarkaabel või optiline kiud, kui ka kõrgema taseme protokolle ja tehnoloogiaid, mis tagavad andmete edastamise turvalisust ja töökindlust.

Andmesidevõrgu loomine ei ole tänapäeval võimalik ilma kohtvõrgu kommutaatoriteta ehk *switch*'ideta, mille abil ühendatakse kõiki kohtvõrgu seadmeid. Kaasaegsetel alajaamadel kasutatakse *switch*'e nii Ethernet- kui ka optika portidega. Lähtudes eesmärkidest kasutatakse lihtsaid mittehallatavaid *switch*'e, mis on ette nähtud ainult seadmete ühendamiseks või hallatavaid (manageeritavaid) *switch*'e, mis võimaldavad luua keerulisi võrkude konfiguratsioone, tagades nii töökindlust kui ka võrgu turvalisust. Enamlevinud on selliste *switch*'ide kasutamine nagu Siemens Ruggedcom [3] või Cisco [4], mis arvestavad alajaamade signaalide edastamise eripärasid.

Tähtis on tagada signaalide edastamist alajaama kohtvõrgust juhtimiskeskusse, kus dispetšer saab alajaama jälgida, juhtida, teha vajalikke ümberlülitusi jm. Signaalide edastamiseks alajaama ja juhtimiskeskuse vahel kasutatakse tavaliselt RTU, aga on olemas ka teised seadmed ja tehnoloogiad, nagu näiteks Siemens SICAM PAS, mis töötab arvuti baasil.

Alajaama kohtvõrk ja juhtimiskeskuse võrk on tavaliselt erinevad võrgud. RTU kasutatakse lüüsina (*gateway*) signaalide edastamiseks ühest võrgust teise. Keerulisemate võrgu konfiguratsioonide puhul kasutatakse ka ruutereid, mis on ette nähtud andmete edastamiseks erinevate võrkude vahel. RTU-sse võivad saabuda erinevat tüüpi signaale, näiteks Ethernet ja järjestikliidese signaalid. Selleks on RTU-s ettenähtud ka erinevat tüüpi pordid ning on tagatud erinevate andmeedastuse protokollide tugi. RTU konfigureerimiseks kasutatakse spetsiaalset tarkvara. Reeglina on olemas ka veebiliides, mille kaudu on võimalik vaadata RTU konfiguratsiooni ja süsteemi staatust, jälgida kõike signaale, mis RTU kaudu liiguvad, testida juhtimist.

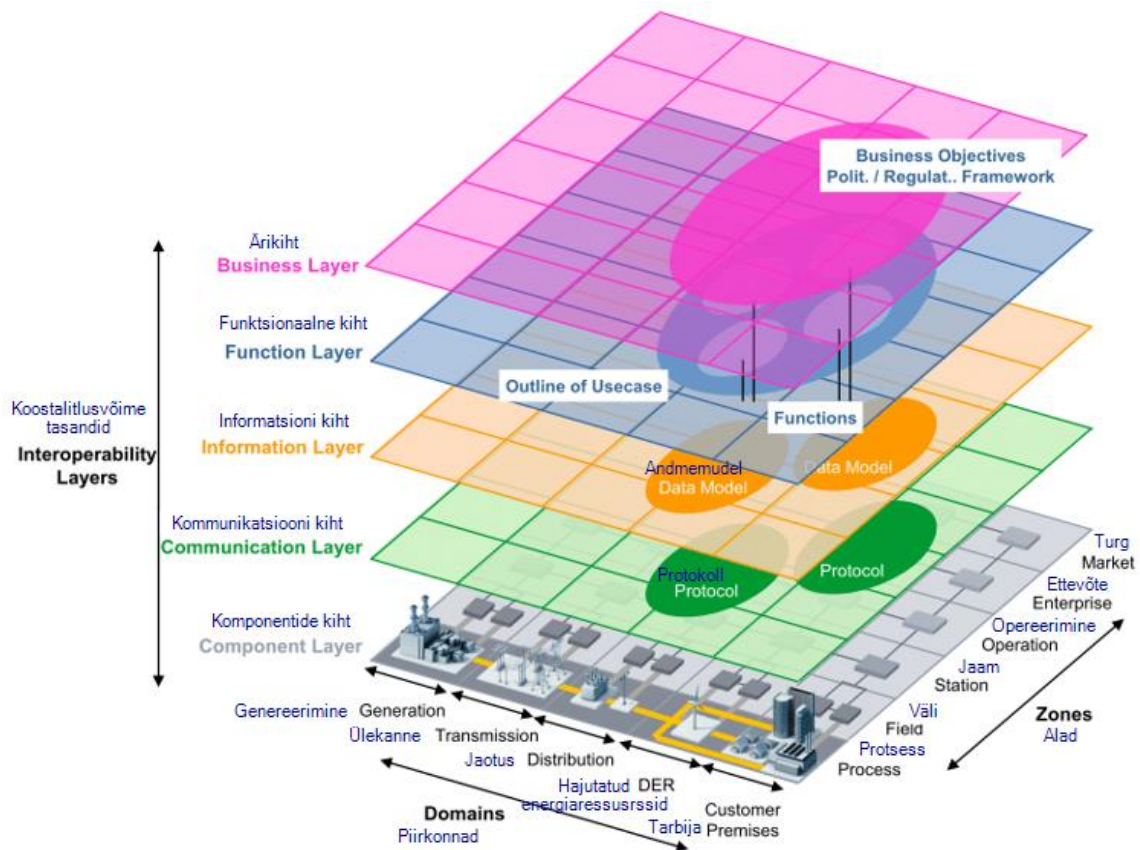
Enamasti asub juhtimiskeskus alajaamast kaugel ning ühendused juhtimiskeskusega teostatakse fiiberoptilise kaabli vahendusel. Kui RTU-s optikakaabli jaoks porti ei ole, tuleb kasutada vastavaid meediakonvertereid. Samuti võib ühendus olla teostatud optikaportidega *switch*'ide kaudu.

Alajaama juhtimine ja monitooring teostatakse reaajas. See on väga kriitiline ning kindlasti tuleb kasutada GPS-i (Global Positioning System) kaudu sünkroniseeritud kella. Selleks paigaldatakse süsteemi aja sünkroniseerimise seadmeid (GPS clock ja ajaserverid). See võib olla nii eraldi seade, näiteks Meinberg M300 [5], kui ka RTU moodul, näiteks Hitachi Energy RTU 560 moodul 560RCR01 [6].

Alajaama kohtvõrgu kaudu korraldatakse andmeside nii kohtvõrgu seadmetega kui ka teiste alajaamade ja juhtimiskeskusega, seega moodustab alajaama kohtvõrk kõikide välisühendustega andmesidevõrgu, mille kaudu toimub kogu signaalide vahetus ja edastus. Andmesidevõrgu ülesehitust ja tööpõhimõtet selgitab elektrivõrgu mudel (CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Architecture Model - SGAM) [7].

1.2 Andmeedastus SGAM-i elektrivõrgu mudeli baasil.

Alajaama kaughaldus näeb ette andmesidet ja andmevahetust süsteemide vahel, seega tegemist on tarkvõrguga (*smart grid*). Euroopa Liidu poolt on välja töötatud standardid, mis võimaldavad lihtsustada tarkvõrgu lahenduste elluviimist ja kasutusele võtmist. Standardid toetavad informatsiooni vahetamist tarkvõrgu komponentide vahel (*communication protocols and data models*). Standardite parima arusaamise eesmärgiks on väljatöötatud Smart Grid Architecture Model (SGAM). [7]

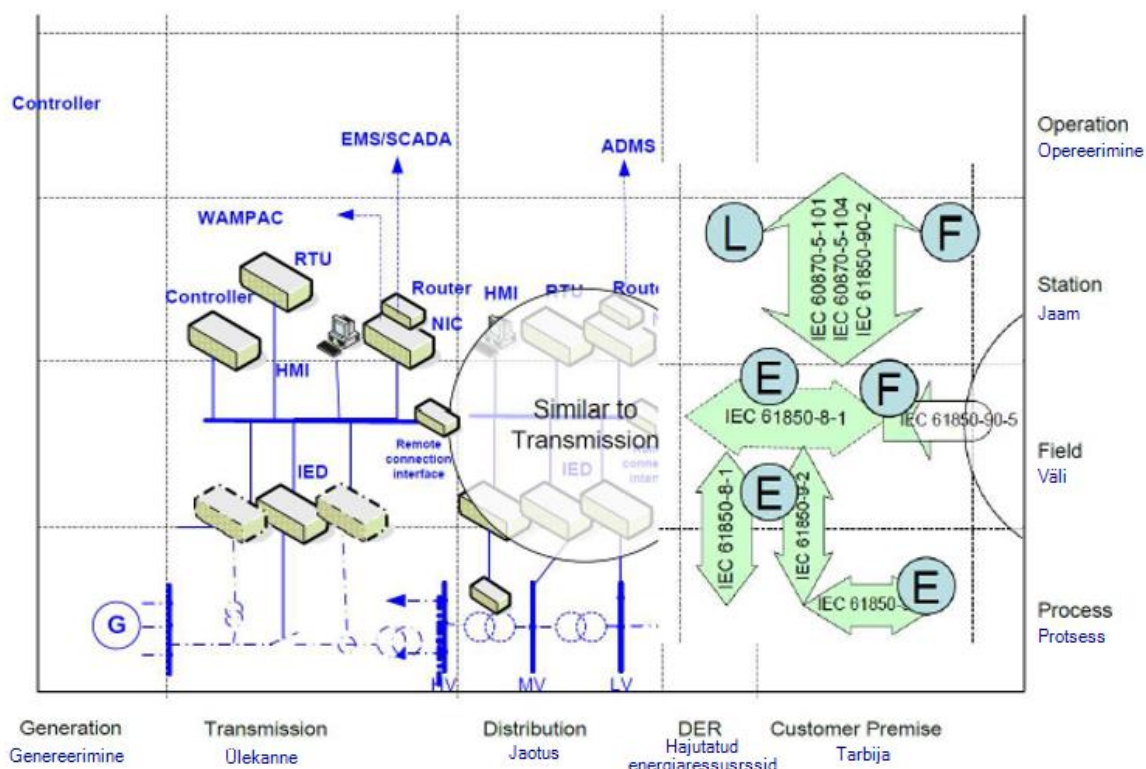


Joonis 1.1 Smart Grid Architecture Model. [7]

Antud mudeli näitel on võimalik eristada energiasüsteemide protsesside ja andmevahetuse seosed, mis on välja toodud tasandite (hierarhiliste

tsoonide/piirkondade) kujul. Alajaama automaatika komponentide arhitektuur koosneb enamasti kolmest komponentide tsoonist, mis on omavahel ühendatud juhtmete või side kaudu. [7]

Tarkvõrgu mudeli (vt Joonis 1.1) kohaselt asub alajaam ülekande (*Transmission*) ja jaotuse (*Distribution*) alal ning selle funktsioneerimine toimub *Process*- kuni *Operation*-piirkondades. Protsessi alal toimivad primaarseadmed - trafod, lülitid, kompensaatorid, mõõturid, andurid. Välja (*Field*) tsoonis asuvad alajaama sekundaarseadmed, nagu releed (IED), arvestid ja kontrollerid, mõned andurid ja mõõturid, mille alusel korraldatakse kaitset, juhtimist, loogikat. Jaama (*Station*) tsoonil teostatakse väliste süsteemidega andmesidet ning kasutatakse selliseid seadmeid nagu RTU, mediakonverterid, HMI (juhtimisarvuti) jm. Operaatori (*Operation*) alal toimub andmevahetus EMS/SCADA süsteemidega.



Joonis 1.2 Alajaama automaatika komponentide arhitektuur [7]

Kogu alajaama andmevahetus teostatakse informatsiooni (*Information Layer*) ja kommunikatsiooni (*Communication Layer*) tasanditel. Informatsioonitasandil toimib peamiselt IEC 61850 andmemudel. Kommunikatsioonitasandil toimib vana IEC 60870-5-103, mis tänapäeval asendatakse IEC 61850-ga protokollid nii horisontaalsete kui ka vertikaalsete sidemete jaoks. Vertikaalsete sidemete alajaama välisühenduste teostamiseks kasutatakse IEC 60870-5-101 või 104 (vt Joonis 1.2).

Antud sidemeid kasutatakse järgmistes alajaama süsteemides:

- releekaitse – väga tähtis süsteem horisontaalsete sidemetega, mis töötab kasutades mõõtmisüsteemi andmeid (näiteks voolu ja pinge väärtused), lülitite asendite signaale, mille alusel seadistatakse kaitsete rakendamise loogika. Releed peavad omavahel suhtlema, edastades andmeid rakendunud kaitsetest, lülitite asenditest ja blokeeringutest jm;
 - juhtimissüsteemid – vertikaalse side abil dispetšerile edastatavad signaalid. SCADA-sse ja HMI-sse tulevad signaalid alajaama süsteemidest ning osaliselt kommerts-mõõtmis-süsteemist.
 - kommertsarvestus – mõõtmise süsteemid kasutavad mõõteseadmete signaale;
- [8]

1.3 Alajaama andmeside eripärad

Alajaama normaaltalitluse tagamiseks toimub pidevalt andmesidevõrgus süsteemide vahel infovahetus. Alajaama andmeside peab olema väga töökindel ja kiire, kuna sellest sõltub kaitsete korrektne rakendumine. [9] Kui andmeid edastatakse aeglaselt ning kadudega, siis on võimalik kaitsete vale rakendumine või mitterakendumine, mille tagajärjeks on seadmete rikkumine või hävimine ning raskematel juhtudel oht inimestele. [8]

Esiailgu oli alajaama horisontaalne releedevaheline side tagatud punkt-punkt ühenduse abil (sidestus otseühendustega kasutades vaskjuhtmeid ning binaarsignaale) ning andmete edastamiseks kasutati konkreetse seadmete tootja andmeside protokollid. Erinevate tootjate seadmed ei olnud omavahel ühilduvad, mis raskendas oluliselt alajaamade digitaliseerimist. Tänapäeval töökindluse parendamiseks kasutatakse ühist siini ning andmete edastamise protokollid on standardiseeritud. [8]

Kommunikatsioonivõrk mängib väga tähtsat rolli digitaalse alajaama funktsioneerimisel. Signaalid antud võrgus edastatakse erinevate protokollide abil. Kasutusel on nii tavaliste arvutivõrkude tehnoloogiad ja protokollid, näiteks Ethernet, TCP/IP, SNMP, kui ka spetsiaalselt elektrivõrkude jaoks välja töötatud lahendused nagu IEC 61850 või IEC 60870-5-104 standardite protokollid, mis arvestavad elektrivõrkude andmevahetuse eripärasid.

Digitaalalajaama andmesidevõrgu jõudlus sõltub võrgu erinevatest omadustest, sealhulgas võrgu latentsusest ja ribalaiuse kasutamisest. Seetõttu on väga oluline tagada, et kõik Etherneti võrguseadmed, mida kasutatakse andmesidevõrgu loomiseks, suudaksid lubatud edastamise/vastuvõtmise perioodil saata/vastu võtta kaitse-, seire-

ja juhtimisteateid (signaale). Etherneti tehnoloogia võimaldab tõhusalt kasutada ribalaiust ja minimeerida võimalikke viivitusi andmemahtude eraldamise ja prioriseerimise kaudu, seadistades *switch*'ide baasil virtuaalseid võrkusid (*virtual local area network* – VLAN-id. [10]

Joonisel 1.2 on E tähega näidatud alajaama andmeedastuse võrk ning antud võrgus infovahetuseks kasutatakse standardi IEC 61850 protokollid. F tähega on näidatud välisühendused teiste alajaamade või juhtimiskeskusega. Juhtimiskeskusse edastatakse signaalid standardi IEC60870 protokollide abil ning tänapäeval on see peamiselt IEC60870-5-104 protokoll.

Alajaama kõikide nii primaar- kui ka sekundaarseadmete andmed ja signaalid edastatakse reaajas vastavalt näiteks IEC 61850 standardile, kasutades antud standardis kirjeldatud protokolle. Seadmete ja süsteemide seisundi reaajas pideva juhtimise ja jälgimise teostamiseks süsteemide vahel teostatakse järgmiste parameetrite ja signaalide edastamine:

- mõõtmised;
- juhtimine;
- monitoring. [8]

Alajaama kaughalduse korraldamisel on vaja arvestada sellega, et tähtsad signaalid, näiteks mõõtmised, mille alusel rakenduvad kaitsed või lüliti asendi muutmine, peavad olema edastatud ilma viiteta, vähemtähtsaid signaale on võimalik edastada teatud viitega. Reaajas töötamise tagamiseks peab olema seadistatud aja sünkroniseerimine, mis teostatakse tavaliselt GPS-i ja ajaserveri kaudu kasutades Simple Network Time Protocol (SNTP).

Alajaama signaale on võimalik jagada kolmeks kategooriaks:

- perioodilised andmed (*periodic data*) – peamiselt telemaatika ja kommunikatsioonisignaalid, mis saadetakse normaalrežiimis. See andmemaht on suur, aga stabiilne ning peaaegu ei muutu. Andmete edastamise ajad on rangelt määratud.
- juhuslikud andmed (*random data*) – juhtimissignaalid, mis saadetakse näiteks dispetšeri poolt ümberlülitusi tegemiseks, ajasünkroniseerimine või ebatähtsate andmete edastamine, mis ei nõua reaajas edastamist. Andmemaht on ebamäärane, lühikese või pikka edastamise ajaga.
- pakettandmed (*burst data*) – avariandmed, suuremahulised. [11]

Tuleb kindlasti valida, milliseid signaale on vaja edastada. Näiteks mõned signaalid on vajalikud ainult kohapealse kaitse seadistamiseks. Sellest tuleb lähtuda RTU konfigureerimisel. Kui andmemaht on suur ja võrk on ülekoormatud, siis vajalikud

signaalid võivad hilineda või kaduda ning dispetšer ei jõua õigeaegselt muutunud olukorrale reageerida. Samuti ei tohi SCADA olla signaalidega ülekoormatud, muidu dispetšeril on väga raske signaalides orienteeruda. Seega tuleb vältida mittevajalikke signaale SCADA-sse edastamist.

Edastatavate andmete mahtu vähendamiseks on võimalik signaale grupeerida. Grupeeritakse ainult mittekriitilisi signaale. Ei tohi grupeerida kaitsete ega lülitite asendi signaale [1]. Näiteks võib grupeerida hoiatust *switch*'i või IED portide probleemide puhul. Signaalide grupeerimine on võimalik nii kohtterminaali kui ka RTU konfiguratsioonis. Enamlevinud praktikaks on signaalide grupeerimine kohtterminaali baasil. Kui aga neid ei kasutata, siis signaalide grupeerimine teostatakse RTU-s.

Väga tähtis on dispetšeri jaoks signaalide usaldusväärsus, seega kindlasti peab olema SCADA-sse edastatud siderike signaal [1]. Mõned asendid/olekud uuendatakse ainult nende muutmisel. Kui sidet ei ole, siis signaal olukorra muutmisest dispetšerile ei tule ning dispetšer näeb mitteaktuaalset olukorda. Kui aga ta näeb, et sidega on probleem, siis ta eeldab, et võib-olla on midagi muutunud. Siderikke puhul andmeid on võimalik taastada, kuna RTU ja SCADA lahendused näevad ette andmete säilitamist kas mälupuhvris või arhiivis.

Releede puhul salvestatakse ja säilitatakse tavaliselt *event record*, *disturbance record*, alarmid [12]. See võimaldab andmeid igal hetkel analüüsida ning välja selgitada, millised sündmused toimusid võrgus rikke tekkimise ajal, mis seda riket põhjustas ja mis ajal rakendused kaitses. Reeglina selliste failide lugemiseks ja analüüsimiseks kasutatakse eritarkvara näiteks Siemens SICAM PQ Analyser [13].

Edastatavad signaalid peavad olema kaitstud. Andmete kaitsmiseks ja teineteist eraldamiseks *switch*'ides kasutatakse VLAN-id, see võimaldab vähendada ka võrgu koormatust. Tähtis ei ole mitte ainult signaalide, vaid kogu andmesidevõrgu kaitsmine küberrünnakute eest. Küberrünnakud võivad põhjustada elutähtsa infrastruktuuri ja seadmete kriitilisi kahjustusi, avariisid ja elektrikatkestusi. [14] Süsteem peab olema kaitstud kõikidel tasemetel alates füüsilistest sidekanalitest kuni kõrgemate tasemete andmeedastuse protokollideni. [15]

1.4 Alajaama infovahetuse automatiseerimine

Tänu andmeside ja infovahetuse korraldamisele on võimalik alajaama täielikult automatiseerida. See võimaldab tehniliste rikete või personaali eksituse tõttu avariiolekorra tekkimise puhul vältida avarii laienemist ning oluliselt vähendada

negatiivseid tagajärgi. [16] Normaaltalitluse tagamiseks ning avariide ennetamiseks ja vältimiseks peab digitaalalajaama automaatika vastama rangetele nõuetele.

Alajaama automaatika, nagu ka kogu elektrivõrgu automaatika peab tagama:

- kaitse elektrivarustuse katkestuste eest – kõige tähtsam kaitse, mis kaitseb nii seadmeid kui ka inimesi;
- juhtimise
 - lokaaljuhtimine – teostatakse kohapeal alajaamas paigaldatud seadmete abil, näiteks releeterminaali abil, mis rakendab vajalikke kaitseid avariolukorra tekkimisel või taastab normaaltalitlust avarii likvideerimisel (näide: automaatne taaslülitamine – ATL). Inimeste sekkumine on antud juhtimisel piiratud ning inimeksituste võimalus on väga madal. Samuti lokaaljuhtimist on võimalik kasutada vajadusel kohapeal ümberlülituste teostamiseks, näiteks seadmete testimisel või kaugjuhtimise puudumisel;
 - kaugjuhtimine – teostatakse dispetšeri poolt SCADA kaudu. SCADA võimaldab teostada monitooringu, juhtimist ja ümberlülitusi ilma kohapeale välja sõitmata. Kogu süsteemi seisundi täielik ülevaade reaajas lihtsustab otsuste vastuvõtmist. Kaugjuhtimine võimaldab oluliselt vähendada reageerimise aega, mis on tähtis kriitilistes olukordades;
- mõõtmised – alajaama normaaltalitluse tagamiseks ja avariolukordade avastamiseks ja vältimiseks tuleb automaatselt mõõta elektrilisi väärtusi nagu vool, pinge, võimsus, harmoonikud kui ka teisi analoogsuurusid, näiteks temperatuur, rõhk jne;
- monitooringu – andmed alajaamas toimunud tehingute ja sündmuste kohta (näiteks lülitite asendite muutmine, kaitsete rakendamine, alarmid) saadetakse SCADA-sse seisundi ja staatuse monitooringu teostamiseks, avariide registreerimiseks;
- andmevahetuse – süsteem on terviklik, kui komponentide vahel teostatakse andmevahetus, ilma selleta süsteem toimida ei saa. [17]

Lähtudes automaatikale esitatavatest nõuetest peab alajaam vastama järgmistele kriteeriumitele:

- alajaamas teostatakse süsteemide ja seadmete parameetrite ja töörežiimide kaugmonitooring ja kaugjuhtimine reaajas;
- alajaama süsteemid ja seadmed on täielikult automatiseeritud ning kasutatakse intellektuaalseid süsteeme töörežiimide juhtimisel;
- digitaliseeritud andmete edastamine kõikide süsteemide vahel;

- andmete digitaliseerimisel on tagatud andmekaitse. [8]

1.5 Alajaamade tüübid ning kaughalduse võimalikkus

Tänapäeval kasutusel olevad alajaamad on väga erinevad. Kuigi pidevalt toimub valdkonna arendamine, ehitatakse uusi kaasaegseid energiasüsteeme, on siiani töös ka vanad aegunud alajaamad, mis on veel võimelised oma funktsioone täita, aga ei vasta kaasaegsetele nõudmistele. Mõnikord ei ole võimalik erinevatel põhjustel neid alajaamasid asendada uutega ning siis tekkitab vajadus neid moderniseerida, et parendada nende töökindlust ja efektiivsust. Antud töös on uuritud selliste alajaamade sekundaarosa moderniseerimine peamiselt juhtimise ja monitooringu osas. Alajaamade moderniseerimisel tuleb lähtuda erinevatest aspektidest, arvestades alajaama tüüpi, eluiga, tähtsust, olemasolevat funktsionaalsust jm.

Alajaama keskmine eluiga on umbes 30-35 aastat, aga tegelikkuses on primaarosa eluiga oluliselt pikem, kui sekundaarosal. Tavaliselt on alajaama primaarosa kasulik eluiga 40-50 aastat, sekundaarosa aga kuni 15 aastat. See võimaldab ühelt poolt alajaama moderniseerimisel ressursse kokku hoida, välja vahetades ainult sekundaarosa seadmeid, aga teiselt poolt vana alajaama osalisel renoveerimisel võivad tekkida ettenägematud probleemid, mille tõttu moderniseerimine osutub palju keerulisem, kui uue alajaama ehitus.

Sekundaarosa moderniseerimise seisukohast on võimalik eristada järgmiste tüüpide alajaamasid:

- vananenud alajaamad, kus kaugjuhtimine ei olnud ette nähtud;
- alajaamad, kus projekteerimisel on kaugjuhtimine ette nähtud, aga alajaama ehitamise ja seadistamise käigus ei olnud see funktsionaalsus realiseeritud;
- kaughaldusega alajaamad, kus on kasutusel vananenud seadmed;
- kaasaegsed alajaamad, mis nõuavad laiendamist või funktsionaalsuse muutmist.

Vananenud alajaamad

Vananenutel alajaamadel, mis on ehitatud 50-60 aastat tagasi, olid alajaama kaitse ja automaatika funktsioonid realiseeritud elektromehaaniliste releede baasil. Andmevahetust antud juhul ei toimunud, kogu signalisatsioon oli teostatud kohapeal signaaltulede ja releede abil (vt Joonis 1.3).



Joonis 1.3 Vana alajaama signalisatsioon

Juhtimine oli võimalik ainult kohapeal käsi- või mootorajamite abil. Juhiseid ümberlülitamisel tihti edastati personalile telefoni teel (vt Joonis 1.4).



Joonis 1.4 Alajaama vana „RTU“

Antud alajaamade läbivaatamine tarkvõrgu mudeli seisukohast näitab, et informatsiooni ja kommunikatsiooni tasandite funktsionaalsus puudub täielikult. Selliste alajaamade moderniseerimisel tuleb juhtimise osas arvestada sellega, kas kasutatakse käsi- või mootorajamitega lülitid, sellest sõltub edaspidine funktsionaalsus. Esimesel juhul on võimalik ainult kaugmonitooring lülitite asendite signaalidega, teisel juhul on võimalik teostada ka kaugjuhtimist.

Alajaamade moderniseerimise viisid sõltuvad ka moderniseerimise eesmärkidest. On võimalik kasutada olemasolevaid kaitseseadmeid ning edastada signaale SCADA-sse näiteks RTU binaarsisendite abil. Kui aga alajaama kaitse on tähtsad ja keerulised, olemasolevaid elektromehaanilisi releesid on võimalik välja vahetada kaasaegsete kohtterminalide vastu, mis oluliselt tõstab kaitsete töökindlust. Moderniseerimise tulemusena muutub alajaama juhtimissüsteem keerulisemaks, kuna kohtterminali kasutamisel ei edastata signaale mitte elektriliste ühenduste, vaid kommunikatsiooniprotokollide abil. Tänapäeval kasutatakse tavaliselt IEC 61850 standardi protokolle. Antud juhul moderniseerimine on oluliselt kallim ja keerulisem sh seadistamise osas.



Joonis 1.5 Vana ja uus alajaama sekundaarsüsteem

Vana alajaama releepaneelid ning tänapäeval kasutusel olevad kaasaegsed kohtterminalid, mis ühendavad endas kõike paneelis olevaid releesid, tagades alajaama töökindlust ja kaitsete õigeaegset rakendumist, on toodud joonisel (vt Joonis 1.5).

Ettenähtud kaughaldusega alajaamad

Ettenähtud kaughaldusega alajaama projekteerimisel arvestati sellega, et edaspidi rakendatakse alajaama kaughaldus. Lähtudes sellest valiti ja paigaldati võimsuslüliteid, kohtterminale ja muid seadmeid, mis võimaldavad kaugjuhtimist, aga nii kaughalduse osa (RTU ja side) projekteerimine kui ka paigaldustööd telemaatika osas jäid tegemata. Selliste alajaamade kaughaldusele üleviimine on lihtsam ja odavam kui eelmise tüüpi alajaamade puhul, kuna on juba valitud ja paigaldatud kaughalduseks sobivad nii primaar kui ka sekundaarseadmed. Moderniseerimisel aga võivad tekkida probleemid,

kuna kaughalduse korraldamiseks paigaldatud kohtterminalid on selleks ajaks juba vananenud ning ei pruugi olla kaasaegsete süsteemidega ühilduvad. Samuti on nende elutsükkel tihti juba lõppenud ja seega ei ole võimalik olemasolevate seadmete riknemise puhul leida seadmeid asendamiseks. Samuti lõpetasid tootjad tugi nendele seadmetele ning probleemide tekkimisel on väga raske leida spetsialiste, kes oskavad neid lahendada. Seetõttu, arvestades ülalmainitud asjaolusid, võivad renoveerimise kulud suurenedada.

Uute kohtterminalide eeliseks on kaasaegsete tehnoloogiate kasutamine ja seega parem töökindlus, ühilduvus teiste kasutusel olevate süsteemidega, seadmete tugi tootja poolt ja spetsialistide olemasolu, aga see lahendus on kallim, kuna kuludele lisandub uute seadmete hankimine ja paigaldus. Sel juhul peab olema tehtud otsus, kas kasutada vanu seadmeid või vahetada need uute vastu. On võimalik ka osaline vanade kohtterminalide väljavahetamine. Selle lahenduse eeliseks on madalamad kulud, aga tuleb rangelt jälgida, et vanad ja uued seadmed on omavahel ühilduvad ning nende paralleelne kasutamine tagab vajaliku töökindlust.

Kui otsustatakse vanad sekundaarseadmed välja vahetada, on vaja arvestada sellega, et tegemist on töös olevate kaitseseadmetega. Sellisel juhul tuleb välja selgitada, kas on võimalik tarbijaid täielikult välja lülitada renoveerimistööde teostamise perioodiks või tarbijate väljalülitamise aeg on piiratud tundide või päevadega. Teise situatsiooni puhul kulud võivad veelgi suurenedada, kuna antud juhul ehitatakse uus sekundaarosa vana sekundaarosa kõrval.

Telemaatika osa elluviimisel võivad tekkida ühilduvuse probleemid, kui näiteks vanad kohtterminalid töötavad vananenud protokollide põhjal. See probleem võib tekkida juhul, kui kasutatakse näiteks mõne tundmatu tootja kohtterminale. Enamlevinud RTU-del on olemas ka vanade protokollide tugi, aga see võib olla tootja spetsiifiline ebastandardne protokoll. Näidiseks on ABB SPA-bus kommunikatsiooni protokoll, mida kasutatakse näiteks SPACOM või SPAJ kohtterminalidel. See protokoll on juba vananenud ning on toetatud ainult ABB seadmete poolt. Antud juhul lahenduseks on ABB RTU kasutamine, millel on antud protokoll tugi olemas. Mõne teise tootja RTU kasutamine võib tekitada situatsiooni, kus ei ole võimalik kohtterminale ja RTU omavahel ühendada ja signaale edastada. Sellist probleemi ei tekki, kui on otsustatud vanad kohtterminalid välja vahetada uute vastu.

Vananenud seadmetega kaughaldusega alajaamad

Kaughaldus on sellistes alajaamades kohe algusest projekteeritud ning ehitamisel realiseeritud. Aga nagu on juba eelnevalt mainitud, kuna sekundaarosa seadmete eluiga

on primaarseadmete elueast väiksem ning primaarseadmed on veel töökorras ning kasutusel, võib tekkida vajadus sekundaarosa seadmeid asendada uute seadmetega. Antud juhul on situatsioon sarnane eelmisel lõigul kirjeldatud alajaamadega, kui on otsustatud välja vahetada paigaldatud sekundaarseadmed uute vastu. Peamine erinevus on selles, et alajaamas on juba telemaatika süsteem töös.

Võimalikud on lahendused, kus vahetatakse välja ainult kohtterminalid ning telemaatika süsteem jääb asendamata. Enne kohtterminalide vahetamist tuleb kindlasti kontrollida nende ühilduvust olemasoleva juhtimissüsteemiga. Kohtterminalid kinnitatakse tavaliselt lahtri uksele. Kohtterminalide vahetamisel võib tekkida probleem, et vanade ja uute seadmete mõõdud on erinevad, ning seadmete paigaldamiseks tuleb seadmete kinnitamiseks ettenähtud avad suurendada või vähendada. Kui telemaatika seadmed vahetatakse välja koos kohtterminalidega, see tähendab tihti, et tuleb korraldada telemaatika uute ja vanade seadmete paralleelset tööd ning tagada signaalide edastamist SCADA-sse mõlemast võrgust. Ühilduvuse probleemi antud juhul ei teki, kuna kasutatakse kaasaegseid seadmeid ja protokolle alajaama kogu sekundaarosa jaoks.

Laiendamist vajavad kaasaegsed alajaamad

Kaasaegsete alajaamade laiendamise vajadus tekitab näiteks uute tarbijate või genereeritavate võimsuste lisamisel. Antud juhul lisatakse uued kohtterminalid või asendatakse olemasolevaid kohtterminalide uute vajaliku funktsionaalsusega kohtterminalide vastu, täiendatakse olemasoleva RTU konfiguratsioon uutest terminalidest signaalide edastamiseks. Uute tarbijate lisamiseks ei ole tihti vaja olemasolevaid tarbijaid välja lülitada, seega seadistus- ja testimistööde korraldamine on lihtsam kui vanade seadmete asendamise puhul.

Uue funktsionaalsuse lisamisel teostatakse eelnevalt ettevalmistustööd, vajadusel vahetatakse või täiendatakse alajaama primaarosa, mis tähendab, et sekundaarseadmete paigaldamise, seadistamise ja testimise ajal ei ole veel vastavad lahtrid töösse viidud, mis lihtsustab oluliselt antud tööde läbiviimist.

1.6 Alajaamade telemaatika lahendused

Alajaamade kaughalduse teostamiseks on võimalik kasutada erinevaid lahendusi. Eestis on enamlevinud praktika korraldada kaughaldust RTU baasil. Alternatiiviks võiks olla tsentraliseeritud kaitse ja juhtseade (*Centralized Protection and Control Device*) või alajaama automatiseerimise süsteem (*Substation Automation System*). Kõik need

lahendused on väga erinevad ning nende valimisel tuleb kindlasti lähtuda energiasüsteemi/alajaama koosseisust ning eesmärkidest, mida on vaja saavutada antud süsteemi paigaldamisega.

RTU

RTU on seade, mis võimaldab andmevahetust IED, HMI ja SCADA vahel. RTU koosneb tavaliselt moodulitest, mis võimaldavad luua erineva funktsionaalsusega süsteeme lähtudes klientide vajadustest. Tavaliselt koostatakse RTU protsessormoodulist (CPU), kommunikatsioonimoodulist, toiteplokkist. Vajadusel kasutatakse analoogsisendite, digitaalsisendite ja väljundite mooduleid (I/O moodulid). Kaasaegsetel alajaamadel kasutatakse tavaliselt IED-d ning andmevahetus teostatakse IEC 61850 protokollide abil. Seetõttu RTU I/O moodulite kasutamine alajaamades aina väheneb.

Protsessormoodul on RTU peamoodul, mis tagab kogu seadme funktsioneerimist. Kommunikatsioonimoduleid kasutatakse RTU andmesidevõrgu või teiste seadmetega ühendamiseks. Kommunikatsioonipordid on olemas ka peamoodulil ning kommunikatsioonimooduli kasutatakse lisaks juhul, kui CPU mooduli porte ei piisa süsteemi vajaliku konfiguratsiooni loomiseks. I/O mooduleid kasutatakse elektriliste ühenduste teostamiseks, kui näiteks IED ei ole kasutusel või signaale on otstarbekam edastada otse RTU-sse.

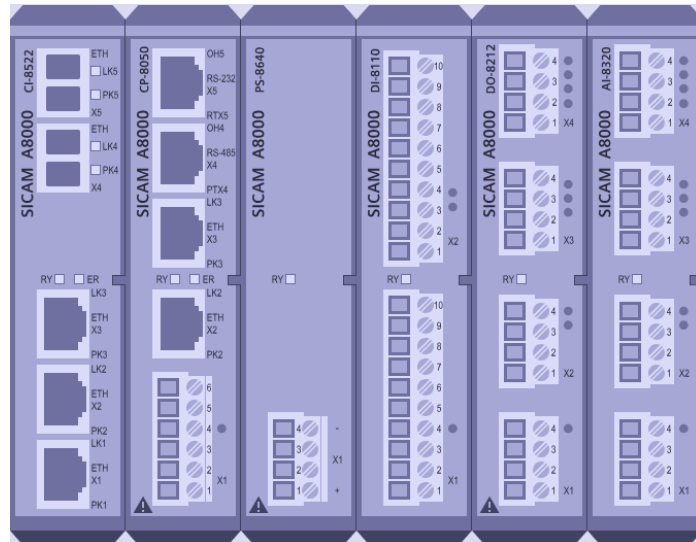
RTU eelised:

- paindlik, sobib erinevate süsteemide jaoks;
- kergesti mastabeeritav, on võimalik luua ja hallata suuri süsteeme;
- toetab liiasust;
- toetab enamus protokolle;
- suhteliselt odav.

RTU puudused:

- sõltub riistvarast;
- süsteemide laiendamine on piiratud mõnede mudelite kasutamise puhul;

Joonisel (vt Joonis 1.6) on toodud Siemens SICAM A8000 RTU näidis, mille koosseisus on protsessormoodul CP-8050, kommunikatsioonimoodul CI-8522 Ethernet ja optika portidega, toiteplokk PS-8640, mis kasutatakse abipinge 24-60VDC puhul, I/O moodulid DI-8110, DO-8212, AI-8320.

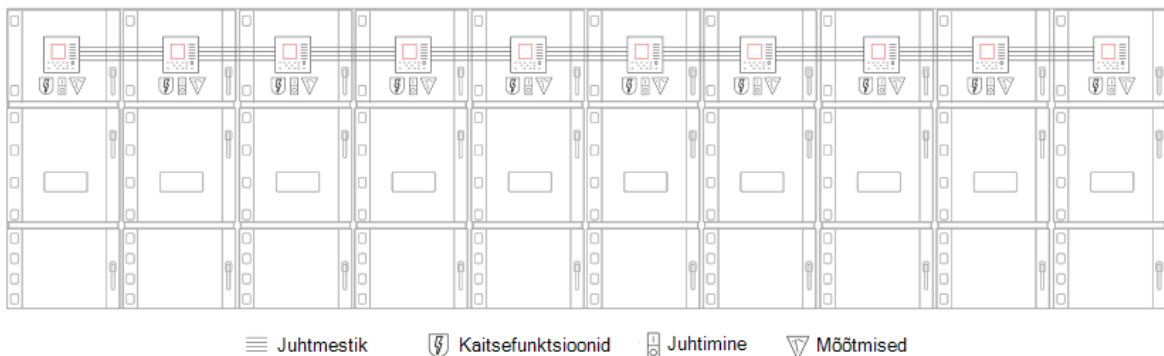


Joonis 1.6 Siemens SICAM A8000 RTU

Tsentraliseeritud kaitse- ja juhtseade

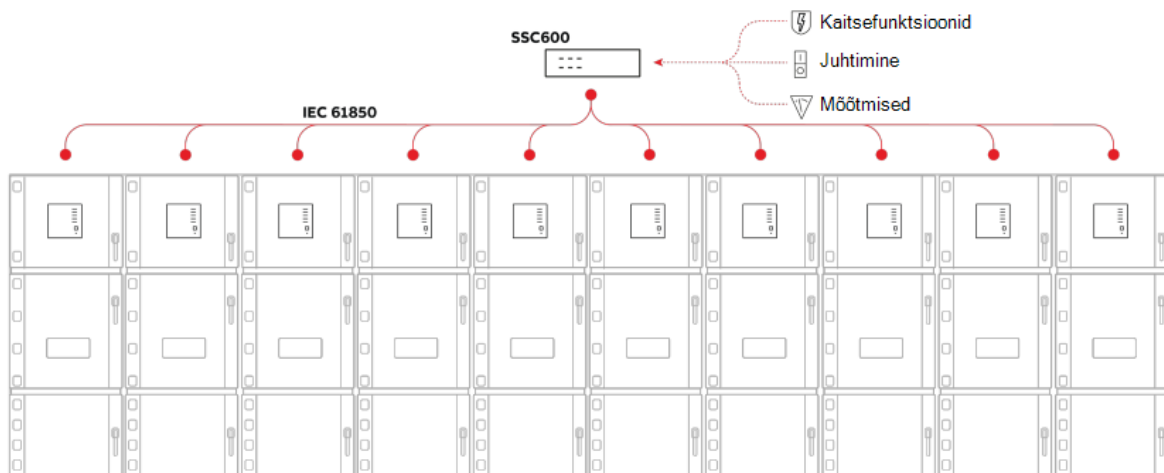
ABB SSC600 on ABB poolt väljatöötatud alajaamade tsentraliseeritud kaitse, mis ühendab endas RTU ja IED-d. Kõik kaitse- ja juhtimisfunktsioonid koondatakse ühte seadmesse alajaama tasemel. See võimaldab tagada alajaama kaughaldust, minimeerida inseneritööd. ABB SSC600 on ühilduv IEC 61850 standardiga.

Tavaliselt paigaldatakse lahtrisse kaitserellee, mis ühendab endas kõiki vajalikke funktsioone nagu kaitse ja mõõtmised (vt Joonis 1.7). Juhtimine teostatakse näiteks RTU kaudu.



Joonis 1.7 Standardne lahendus kaitserelledega [18]

Keskse kaitse ja juhtseadme puhul kõik ühendused teostatakse *merging unit*'i abil, mis paigaldatakse alajaama lahtritesse ning mille abil kõik I/O ühenduste ja mõõtmiste signaalid edastatakse keskseadmesse (vt Joonis 1.8). *Merging unit*'i asemel võivad teatud juhtudel olla kasutatud ka kaitserelleed, näiteks REX620 või REX640 [19], aga see muudab konfiguratsiooni keerulisemaks ja kallimaks.



Joonis 1.8 Lahendus ABB SSC600 kasutamise [18]

ABB SSC600 kasutamise eelised:

- kaitse- ja juhtimisfunktsioonid on koondatud ühte seadmesse, mis võimaldab vältida keerulisi andmesidevõrkusid;
- konfigureerimise paindlikud võimalused;
- toetab kõike peamisi alajaamades kasutatavaid protokolle;
- süsteemi kiire ja lihtne uuendus;
- erinevate kaitsete tugi (näiteks fiidri-, mootori- või trafokaitse);
- HMI funktsionaalsus;
- häirete (*disturbance*) salvestamise võimalus.

ABB SSC600 kasutamise puudused:

- seadme riknemise tõttu on kogu alajaama kaitse tööst väljas;
- lahendus on suhteliselt kallis, eriti väikeste alajaamade jaoks.

Alajaama automatiseerimissüsteem

Alajaama automatiseerimissüsteemi näidiseks on Siemens SICAM PAS (*Power Automation System*). Automatiseerimissüsteemi funktsioonid on sarnased RTU funktsioonidele, s.t. andmevahetuse tagamine IED, HMI ja SCADA vahel. SICAM PAS on paindlik, modulaarne ja skaleeritav süsteem, mille abil on võimalik luua automatiseerimise erinevaid lahendusi [20].

SICAM PAS töötab Microsoft Windowsi operatsioonisüsteemidega tööstusstandardi riistvaral, tavaliselt on see tööstusarvuti või server ning seega on antud lahenduse plussideks madalad riist- ja tarkvarakulud ja pidevalt kättesaadav tugi. Süsteemi on lihtne kasutada, hallata, laiendada ja kombineerida teiste lahendustega. Rakendust saab

jaotada mitme arvuti vahel, suurendades nii jõudlust kui ka ühenduvust ja saadavust. Andmeid salvestatakse andmebaasi (nt protsessiandmed, konfiguratsiooniandmed jne), millega tagatakse andmetele kiiret ligipääsu. Süsteem toetab kõiki alajaamade andmeedastuseks vajalikke protokolle. Suureks plussiks on liiasuse (*redundancy*) funktsionaalsuse olemasolu. SICAM PAS sisaldab integreeritud testimis- ja diagnostikafunktsioone. [20]

SICAM PAS eelised:

- paindlik, sobib erinevate süsteemide jaoks;
- kergesti mastabeeritav, on võimalik luua ja hallata suuri süsteeme;
- riistvarast sõltumatu, on võimalik paigaldada arvutisse Windows OS-iga;
- toetab liiasust;
- toetab enamus protokolle.

SICAM PAS puudused:

- kallis;
- on ette nähtud peamiselt suurte süsteemide jaoks, väikeste süsteemide puhul on kasutamine ebaotstarbekas;
- ei ole IO-moduleid, seega tuleb kasutada IED (näiteks SIPROTEC 5) signaalide edastamiseks;
- keeruline ja aeganõudev seadistamine ja konfigureerimine.

2 SILPOWERI ALAJAAMAD

Silpoweri elektrivõrgus on olemas erinevat tüüpi alajaamasid, nii uued kui ka vanad. Vanade alajaamade renoveerimine on hädavajalik personali töö optimeerimiseks ja osutatava teenuse kvaliteedi parendamiseks. Nagu on juba eelnevalt mainitud, esimest Silpoweri alajaama renoveerimist teostas antud magistritöö autor Silpoweri elektritsehhi juhataja juhendamisel. Renoveeritud alajaamas on kasutusel kohtterminalid. Alajaama kaughallatavaks muutmiseks paigaldati ABB RTU, mille abil vahetatakse nüüd signaale kohtterminalide ja SCADA vahel. Silpoweri alajaamade renoveerimise protsess jätkab ning järgmiste alajaamade renoveerimise võimalused uuritakse antud magistritöös.

2.1 SEJ alajaamade kirjeldus

Silpoweri elektrivõrkude arendamiseks on otsustatud muuta kaugjuhitavateks viis ühetüüpilist alajaama. Antud töö eesmärgiks on võimaluste väljaselgitamine ja analüüsimine, vajalike täienduste projekteerimine alajaama seadmete osas ja SCADA täiendamine antud alajaamadest signaalide edastamise osas.

Komplektalajaamad 6kV/0,4kV on jaotusalajaamad ning neid kasutatakse lõpptarbijate elektrienergiaga varustamiseks. Kõik alajaamad on ühetüübilised Harju Elektri poolt toodetud komplektalajaamad, aga projekteeritud ja ehitatud erinevatel aegadel, seega on olemas erinevused mõnede seadmete ja lahenduste osas. Näiteks esimeses alajaamas on RLA realiseeritud elektromehaaniliste releede baasil ning teistel alajaamadatel on juba kasutusel *programmable logic controller* (PLC-d). Kuna kõik alajaamad on ühetüübilised, on kirjeldus esitatud ühe alajaama kohta ning vajadusel on toodud erinevused teistest.

Alajaamas on kaks 6 kV sektsiooni ja kaks 0,4 kV sektsiooni. Alajaama keskpingejaotlad 6 kV ja madalpingejaotlad 0,4 kV asuvad ühes ruumis. Alajaamas on kasutatud kõrgepinge jaotlad Merlin Gerin (uutes alajaamades Schneider Electric) RM6, mis koosnevad käsijuhitavatest koormus- ja maanduslülititest ja mootoriga võimsuslülititest. Madalpinge jaotusseadme 0,4 kV lülitid on Merlin Gerin NS1600 (uutes alajaamades on Siemens 3WL). Madalpinge osa on varustatud RLA-ga, mis võimaldab tagada tarbijate katkematu elektriga varustamine. Nagu ülalpool mainitud on, on erinevatel alajaamadatel RLA teostamiseks kasutatud erinevaid lahendusi elektromehaanilistest releedest kuni PLC-ni, sealhulgas näiteks Siemens LOGO. Alajaama releekaitse ja automaatika osaks on trafo liigvoolukaitse (VIP30). Trafod kaitstakse ülekuumenemise vastu kontakttermomeetri abil, mis esimeses astmes annab hoiatuse ja teise astmega lülitab trafo välja.

Alajaama projekteerimisel eeldati ette näha telemehaaniseerimise võimalust järgmises mahus:

Signalisatsioon:

- Võimsuslülitite, koormuslülitite ja maanduslülitite asendisignaalid
- Signaal "Trafo temperatuur" – hoiatus
- Signaal "Trafo temperatuur" – töötamine väljalülitamisele
- Valvesignaal
- Tulekahju signaal [21]

Juhtimine

- Trafode 6 kV võimsuslülitite juhtimine [21]

Mõõtmine

- Voolud trafode 0,4 kV sisestustel (3 mõõtmist)
- Pinged trafode 0,4 kV sisestustel (3 mõõtmist)
- Arvestite näidud
- Trafode õli temperatuur [21]

Reaalsuses on aga ainult mõnedes alajaamades mõõtmise signaale võimalik saada multimeetritest RS-485 liidese kaudu, kõige vanema alajaama multimeetritel ei ole signaalide edastamise liidesed/pordid ette nähtud. Ühes alajaamas on olemas telemehaanika kapp, kus on olemas klemmid 6 kV jaotla signaalide jaoks. Klemmid kapis dubleerivad jaotusseadmes oleva klemmkapi klemme ning ei ole millegagi ühendatud. Telemehaanika kappi sisse on viidud ka tulekahju ja valvesignalisatsiooni kaablid, mis ei ole kasutusel. 0,4 kV jaotlate signaalide edastamiseks ei ole kapis midagi ette nähtud. Teistes alajaamades antud kapp üldse puudub.

Ettevõtte arendustööde tulemuseks on ühise valvesüsteemi loomine, seega on kõikides alajaamades tulekahju ja valvesignalisatsiooni jaoks kasutusel eraldi süsteem ning signaalid tulevad otse valvekeskusesse, mis on ühine kõikide antud ettevõtte objektide jaoks, seega SCADA-sse neid signaale edastada ei ole vaja.

Alajaamade projekteerimisel ja ehitamisel ei olnud veel ettevõttel SCADA süsteemi kasutusel. Alajaamad projekteeriti edaspidise arendamise võimalusega telemehaaniseerimise osas, arvestades projekteerimise hetkel saadavaid vahendeid ja lahendusi, aga ettevõttel ei olnud selget visiooni, milliseid signaale on vaja SCADA-sse saata. Seega ei olnud see osa hästi läbi mõeldud ja projekteeritud ettevõtte nõudmiste puudumise tõttu.

Ettevõtte elektrivõrgu arendamisel ehitati uusi kaasaegseid alajaamasid ning tekkis vajadus nende alajaamade kaugjuhtimisel ja monitooringul. Selle eesmärgi täitmiseks

oli uute alajaamade ehitamisel loodud SCADA süsteem, mis oli paigaldatud dispetšerikeskusesse. Kõikide uute ehitatavate alajaamade signaalid edastatakse nüüd SCADA-sse. SCADA kasutusse võtmisega osutus võimalikuks muuta kaughallatavateks ka olemasolevaid alajaamasid ning ettevõtte otsustas elektrivõrgu jaoks tähtsamate alajaamade signaale lisada SCADA-sse.

Esimesena oli teostatud KJP vahealajaama kaugjuhtimine „Silpower alajaamade kaugjuhtimissüsteemi laiendamine” projekti raames. Antud alajaamas on releekaitse ja automaatika teostatud ABB SPACOM-i kohtterminalide baasil. Aegamööda ühendatakse SCADA-sse ka teised alajaamad, kus on kasutusel erinevate tootjate kohtterminalid. Kohtterminalide kasutamine näeb ette alajaama kaugjuhtimise ja monitooringu võimalust ning alajaama projekteerimisel valitakse ka vastavaid seadmeid.

Järgmiseks eesmärgiks on muutmine kaugjuhitavateks alajaamasid, kus kohtterminalid ei ole kasutusel. Antud juhul tuleb arvestada sellega, kas on kasutusel kaitsed, mille baasil nad on teostatud ning kas on vaja kohtterminali paigaldada või piisab ainult RTU-d. Antud töö praktilise osa ülesandeks on välja selgitada ja analüüsida alajaamast signaalide edastamise võimalust ettevõtte SCADA-sse ning süsteemi projekteerimine, sealhulgas signaalide edastamiseks vajalikke seadmete valik.

Projekteeritav süsteem peab tagama järgmiste alajaama monitooringu ja juhtimise võimalusi:

- Monitooring:
 - Keskpingejaotla 6 kV lülite asendid
 - Madalpingejaotla 0,4 kV pealülite asendid
 - Madalpingejaotla 0,4 kV RLA seisund
 - Madalpingejaotla 0,4 kV pinge mõõtmine
- Juhtimine:
 - RLA välja/sisseviimine
 - Madalpingejaotla 0,4 kV pealülite juhtimine [21]

2.2 Seadmete valik

Alajaama signaalide kogumiseks ja edasi juhtimiskeskusesse edastamiseks tavaliselt kasutatakse RTU. Alternatiivideks võiks kasutada näiteks Siemens SICAM PAS või ABB SSC600. Üheks lahenduseks on samuti Siemens PLC SIMATIC S7-1200 [22] või S7-1500 [23] kasutamine. SIMATIC S7-1500 kasutatakse suurte ja keeruliste süsteemide jaoks, oluliselt kallim kui SIMATIC S7-1200, nõuab kallimat litsentsi. Selle kontrolleri eeliseks on võimalus andmete üleandmist kasutades IEC 61850 standardi

protokolle. Antud juhul alajaamad on väikesed ning Siemens SICAM PAS, ABB SSC600 või SIMATIC S7-1500 lahendused on selleks liiga kallid ja keerulised ning antud signaalide mahu puhul ebaotstarbekad.

Eestis on enamlevinud Hitachi Energy (eelnevalt ABB), Siemens, Sprecher RTU kasutamine. Kõik need tootjad pakuvad erinevaid lahendusi nii suurte ja keeruliste kui ka väikeste süsteemide jaoks. Lihtsamate projektide jaoks kasutatakse ka kohaliku tootja Martem RTU-d.

Hitachi Energy suurte projektide jaoks on ettenähtud RTU560 [6] seeria seadmed. See on moodulsüsteem, mis võimaldab luua süsteeme paindlikult arvestades kõiki nõudmisi. Väiksemate projektide jaoks on ettenähtud RTU540 [24]. RTU koosneb ühest moodulist, mis ühendatakse võrku Ethernet interface kaudu. Vajadusel antud RTU-ga on võimalik kasutada väliseid RTU520 [25] I/O mooduleid. Väikeste projektide jaoks on võimalik kasutada RTU530 [26] seeria seadmeid, mis on samuti moodulseadmed ning võimaldavad koostada süsteemi erinevatest I/O moodulitest. Võrreldes RTU560 seadmetega, RTU530 on väga kompaktne, ei nõua palju ruumi ning kinnitatakse DIN-latile, mis lihtsustab seadme montaaži.

Siemens SICAM AK3 [27] RTU on sarnane Hitachi Energy RTU560 seadmetega ning ette nähtud suurte ja keeruliste süsteemide jaoks. Aga nende tootmine ja tugi varsti lõpetatakse, seega nende baasil uute süsteemide loomine on ebaotstarbekas. Hetkel arendab Siemens A8000 [28] seeria RTU lahendust. See sobib nii suurte kui ka väikeste süsteemide loomiseks, samuti võimaldab luua hajutatud RTU-d, st I/O moodulite hajutatud paigutus.

Sprecher SPRECON-E seeria [29] RTU-d on sarnased Hitachi Energy ja Siemens RTU-dele. SPRECON-E-C on sama funktsionaalsusega, nagu SICAM AK3 ja RTU560, SPRECON-E-T on nagu Siemens A8000 või Hitachi Energy RTU530.

RTU valimisel tuleb arvestada olemasolevate alajaama seadmetega, nii kaitse kui ka kommunikatsiooni osas. Alajaama 6 kV trafokaitse on tagatud VIP30 kaitserellee abil ning 0,4 kV voolulõige ja maksimaalvoolukaitse on tagatud *micrologic trip unit*'i abil. Kuna seadmed on töökorras ning tagavad nõutud kaitset siis on otsustatud hetkel neid kaasaegsete releede vastu mitte vahetada. See tähendab, et IEC 61850 kasutamine samuti ei eeldata. Seega signaalide edastamine SCADA-sse toimub ainult RTU I/O moodulite kaudu. Kommunikatsiooniseadmeid alajaamas ei ole, kõik vajalikud seadmed peavad olema valitud projekteerimisel.

Suured süsteemid nagu Hitachi Energy RTU560, Siemens AK3 või SPRECON-E-C on antud juhul ebaotstarbekad. Hitachi Energy seadmetest RTU540 ja RTU530 vahel võiks valida uuema RTU530, mis on kompaktne ja võimaldab kasutada I/O mooduleid.

RTU540 ei sobi nii hästi, kuna ette nähtud peamiselt Ethernet või serial interface kaudu andmete edastamiseks ning selleks on vaja kasutada täiendavalt RTU520 I/O mooduleid, samuti see on suurem ning võtab rohkem ruumi. Siemensi RTU-dest sobib väga hästi SICAM A8000 seeria RTU-d, mis koosnevad erinevatest moodulitest ning võimaldab paindlikult vajalikku süsteemi konfigurereida. Sama funktsionaalsust nagu SICAM A8000 pakub ka SPRECON-E-T RTU. Üheks variandiks on ka Siemens SIMATIC S7 PLC kasutamine.

SICAM A8000 ja SPRECON-E-T on enam vähem sama funktsionaalsusega RTU-d, aga Sprecher seadmete tugi Eestis ei ole nii hea, nagu Siemensi seadmetel. Samuti Spreheri RTU dokumentatsiooni seadistamise kohta ei ole võimalik nii lihtne leida ning kõikide probleemide lahendamiseks on vaja otsida spetsialiste. Lähtudes ülalmainitust analüüsitakse ja valitakse kolme varianti vahel: Siemens SICAM A8000 RTU, Hitachi Energy RTU530 ja Siemens SIMATIC S7 PLC. Kõikidel nendel seadmetel on olemas SNMP, NTP, *firewall*, PLC-loogika funktsioonide ning ka IEC 60870-5-104 protokollitugi.

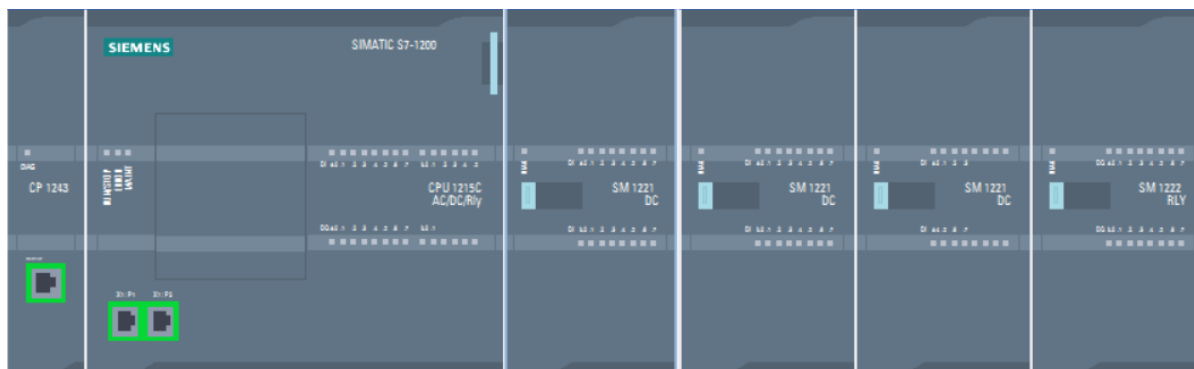
2.3 Seadmete konfiguratsioon

Kogu süsteemi konfiguratsioon sõltub seadmete valikust ja koosseisust. Kui füüsiliste seadmete koosseis on määratud, on võimalik alustada nende konfigureerimisega. Seadmeid valitakse lähtudes kasutatavatest tehnoloogiatest ja protokollidest. Antud juhul tuleb kindlasti valida I/O moodulitega seadmeid, kuna kohtterminale ning seega protokolle (näiteks IEC 61850) antud alajaamades ei kasutata.

Siemens SIMATIC S7 PLC

Siemens SIMATIC S7 PLC puhul võib kasutada S7-1200 CPU moodulit CPU1215C AC/DC/Rly, DI moodulid SM1221 DC, DO moodulid SM1222 RLY, kommunikatsiooni moodul CP1243-1, mis toetab IEC 60870-5-104 protokollit. *Single Point*'i signaalide orienteeruv arv on 40, PLC CPU sisendite arv on 14, seega juurde tuleb paigaldada täiendavaid DI mooduleid. Ühe DI mooduli sisendite arv on 8 või 16, seega peab olema lisatud kolm täiendavat moodulit. Valida võib 14 (CPU) + 16 (DI) + 16 (DI) + 8 (DI) = 54 sisendite või 14 (CPU) + 16 (DI) + 16 (DI) = 46 sisendite kombinatsioonide vahel, sõltuvalt sellest millist reservi on vaja tagada. Käskude signaalide ligikaudne arv on 8. CPU DO arv on 10 väljundit, seega on piisav, aga reservi tagamiseks saab paigaldada juurde ka täiendava DO mooduli. Signaalide edastamiseks SCADA-sse kasutatakse IEC 60870-5-104 protokollit, seega peab olema

kasutatud täiendav kommunikatsiooni moodul CP1243-1 IEC 60870-5-104 protokolliga. Kuna kommunikatsioonimoodulil on ainult Ethernet port, tuleb kasutada optikakonverterit, näiteks MOXA IMC-101 [30]. Kuna alajaamas ei ole alalispinge abitoidet, PLC toiteks on vahelduvpinge. Alalispinge kasutamine on võimalik AC-DC pingemuundurite paigaldamise puhul. Signaalide ahelate jaoks kasutatakse alalispinget, seega tuleb paigaldada muundureid. Umbkaudne seadme konfiguratsioon on esitatud joonisel (vt Joonis 2.1)

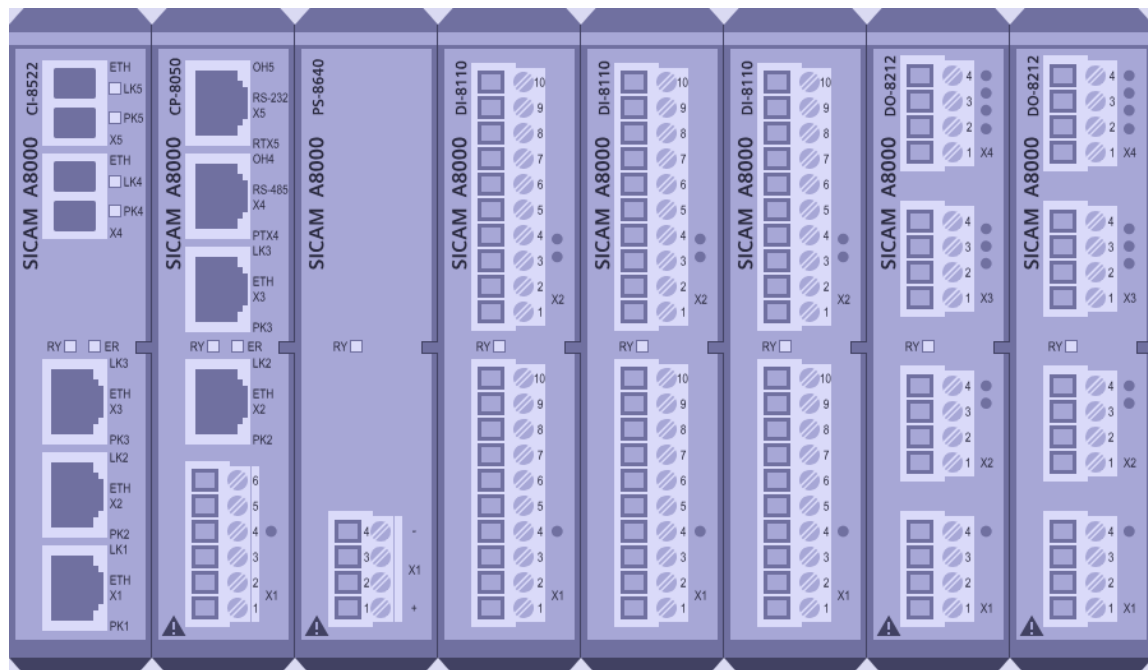


Joonis 2.1 Lahendus ABB SSC600 kasutamiseks [18]

Siemens SICAM A8000

Siemens SICAM A8000 puhul on valitud protsessormoodul SICAM A8000 CP-8050. Protsessormooduli jaoks võimalik valida toiteploki vastavalt alajaamas kasutatavale abitoidetele. Nagu SIMATIC S7-1200 PLC puhul on võimalik valida kahe variandi vahel, vahelduvpinge või AC-DC pingemuunduri abil saadud alalispinge. Alalispinge kasutamisel saab kasutada näiteks SICAM A8000 PS-8640 toiteploki. Signaalide jaoks kasutatakse kolm DI moodulit SICAM A8000 DI-8110 (2x8 sisendit) kokku 48 sisendit ja kaks DO moodulit SICAM A8000 DO-8212 (8 väljundit) kokku 16 väljundit. Valitud moodulite kogus tagab reservi. Kommunikatsioonimoodulit SICAM A8000 CI-8522 kasutatakse signaalide edastamiseks SCADA-sse. Moodulil on olemas optikapoordid ning täiendavaid meediakonvertereid pole vaja paigaldada.

Umbkaudne seadme konfiguratsioon on esitatud joonisel (vt Joonis 2.2). RTU moodulitel on alati kindel asukoht, mida tuleb jälgida moodulite ühendamisel. Siemensi seadmete puhul asuvad tavaliselt kommunikatsioonimoodulid protsessorist vasakul pool, toiteplokk paigaldatakse protsessori külge paremalt poolt ja vajadusel, nagu antud konfiguratsiooni puhul lisatakse I/O mooduleid.

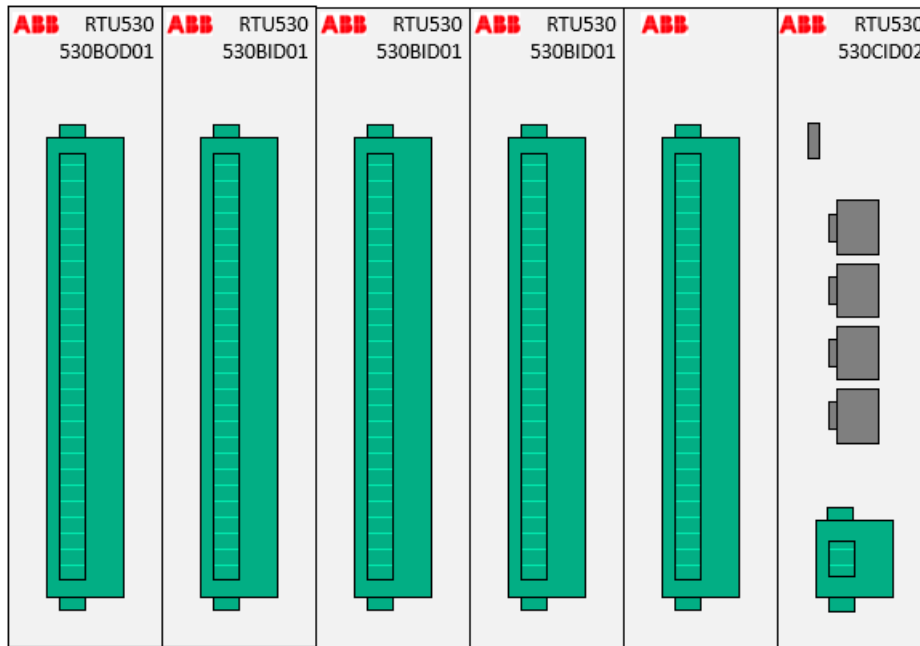


Joonis 2.2 Lahendus ABB SSC600 kasutamise [18]

Hitachi Energy RTU530

Hitachi Energy RTU puhul kasutatakse protsessormoodulit 530CID02. Antud seadme puhul toiteplokk on sisseehitatud ning eraldi moodulit ei ole vaja. Toiteplokk nõuab alalispinget ning kuna alajaamas alalispinge abitoidet ei ole, seega kindlasti peab olema kasutatud AC-DC pingemuundur. Protsessormoodulil on ka kaheksa binaarsisendit ja neli väljundit. Kuna signaale on tunduvalt rohkem, tuleb lisada täiendavaid I/O mooduleid. Kasutatakse kolm binaarsisendite moodulit 530BID01. Ühel moodulil on 16 binaarsisendit, seega protsessormooduli sisenditega kokku on 56 binaarsisendit ning üks väljundite moodul 8 väljundiga (koos protsessormooduli väljunditega kokku 12 väljundit). Antud sisendite ja väljundite arv võimaldab tagada reservi. Eraldi kommunikatsioonimoodulit antud RTU puhul ei ole, kasutatakse protsessormooduli kommunikatsioonipordid. Kuna protsessormoodulil on ainult Ethernet pordid, tuleb täiendavalt kasutada optikakonverterit.

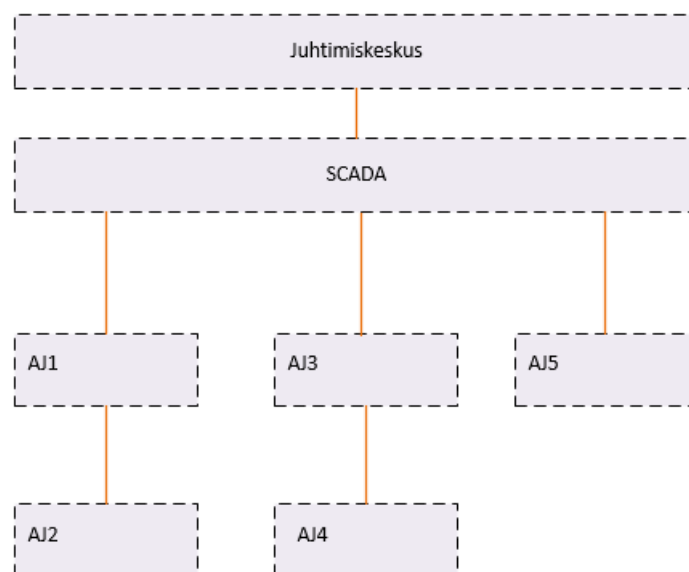
Umbkaudne seadme konfiguratsioon on esitatud joonisel (vt Joonis 2.3). Võrreldes Siemensi seadmetega, antud konfiguratsiooni puhul protsessormoodul asub paremal pool ning vasakult poolt protsessormooduli külge on kinnitatud täiendavad I/O moodulid.



Joonis 2.3 Lahendus ABB SSC600 kasutamiseks [18]

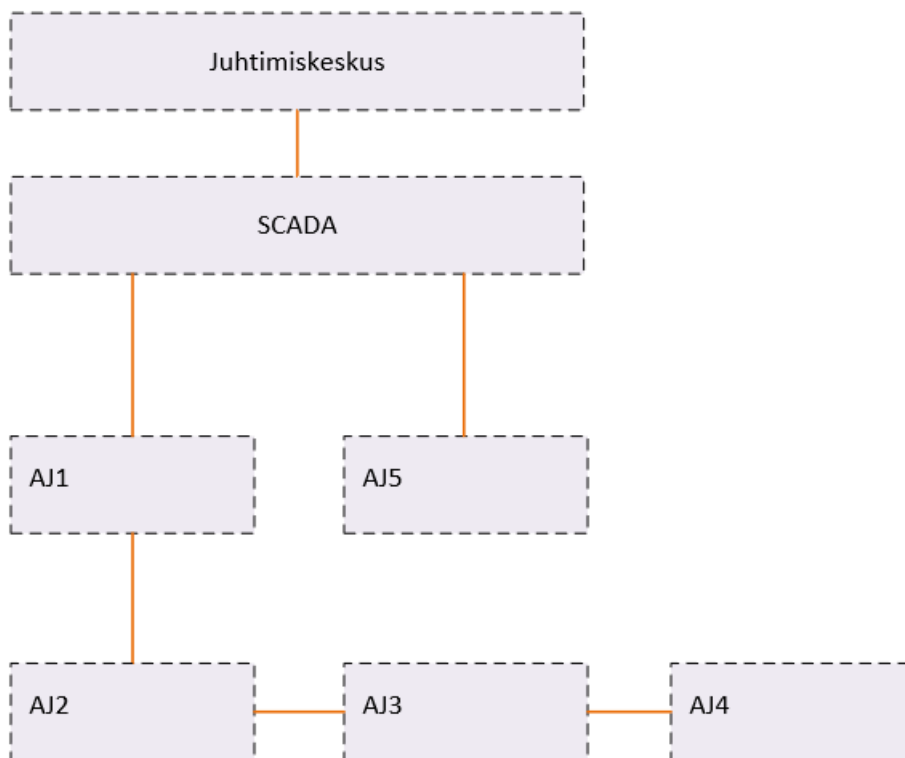
2.4 Side alajaamade vahel

Ülesannet teeb keerulisemaks see, et kaughallatavaks tuleb muuta mitu alajaama korraga. Lahenduse valik sõltub mitte ainult alajaama seadmetest, vaid ka alajaamade asukohast ning nende vahelistest andmesidekanalitest. Ettevõttel on olemas andmesidekanalid alajaamade vahel, mis on teostatud fiberoptiliste kaablite abil. Aga kuna ühendusi on palju, ei ole alati vabad optikakiud saadavad.



Joonis 2.4 SIMATIC S7 lahendus

Samuti need ühendused ei ole optimaalsed. Esiolgsed ühendused olid AJ1 ja AJ2 vahel ning AJ3 ja AJ4 vahel. Lihtsustatud skeem on toodud joonisel (vt Joonis 2.4). Aga ühendus alajaamade AJ3 ja AJ4 ning SCADA vahel on päris pikk ja keeruline ning läbib teisi alajaamasid, mis ei ole antud projektiga seotud. Samuti ühes alajaamas ei olnud vabu optikakiudu ning ühendust tuli teostada alajaamas kasutusel oleva *switch*'i kaudu, konfigureerides täiendava VLAN-i signaalide eraldamiseks. Oli leitud võimalus paigaldada täiendavaid optikakaableid ja tekitada ühendust ka AJ2 ja AJ3 vahel, mis oluliselt optimeeris sidet (vt joonis 2.4). Kahjuks AJ5 paiknemine ei võimalda ühendada seda alajaama teiste alajaamadega.



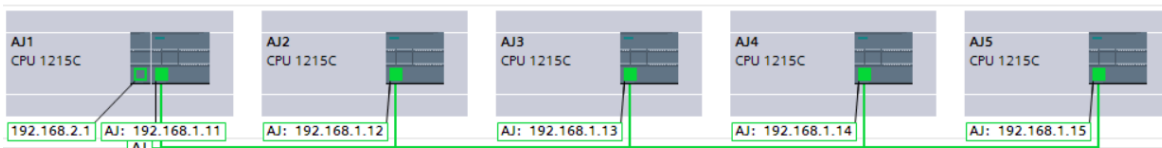
Joonis 2.5 Alajaamadevahelised sidekanalid

2.5 Lahenduste võrdlus

Lahenduste võrdlemiseks tuleb hinnata mitte ainult seadmete koosseisu, vaid ka alajaamade asukohta ning nende vaheliste andmesikanalite paiknemist. Igal lahendusel on oma eelised ja puudused, millega tuleb arvestada.

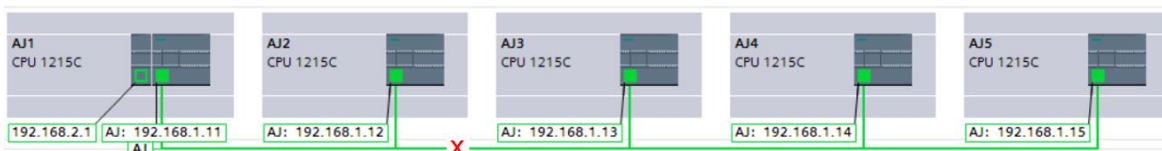
Lahendus Siemens SIMATIC S7 PLC baasil

Lahenduses kasutatakse Siemens SIMATIC S7 CPU ja täiendavad I/O moodulid. Siemens SIMATIC S7 võimaldab ühendada kontrollereid omavahel, nädisühendus on toodud joonisel (vt Joonis 2.5). Tegelikult AJ5 kontrolleri on eraldiseisev. Selliste ühenduste puhul täiendavad keerulised võrguseadmed ei ole vajalikud, mis lihtsustab oluliselt võrgu seadistamist. Vajalikud on ainult meediakonverterid optiliste ühenduste kasutamiseks, kuna SIMATIC S7 seadmetel on olemas ainult Ethernet pordid.



Joonis 2.6 SIMATIC S7 lahendus

Sellise konfiguratsiooni suureks puuduseks on see, et side katkestamisel näiteks AJ2 ja AJ3 vahel (vt Joonis 2.6) ei ole enam signaalide edastamine võimalik alajaamadest AJ3 kuni AJ5. Kuna SIMATIC S7 ei toeta liiasuse (*redundancy*) tehnoloogiaid, siis antud probleemi võib lahendada ühendades kontrollereid näiteks RSTP toega võrguseadmete kaudu (üldjuhul see on hallatav *switch*). See muudab võrku keerulisemaks nii konfigureerimise kui ka haldamise osas. Samuti lahenduse elluviimise kulud suurenevad.



Joonis 2.7 Side katkestus

Antud skeemi puuduseks on ka esimese kontrolleri suur koormatus, kuna kõikide alajaamade signaalid edastatakse selle kaudu. Koormatus suureneb antud ahelasse iga täiendava PLC lisamisega. Joonisel näidatud skeemi puhul kõige väiksem koormatus on AJ5 CPU moodulil, kuna töödeldakse ainult selle PLC signaale, AJ4 CPU koormatus on juba suurem, kuna selle kaudu edastatakse nii AJ5 kui ka AJ4 signaalid. AJ1 CPU koormatus on kõige suurem.

Signaalide edastamiseks SCADA-sse protokolliga IEC 60870-5-104 abil tuleb paigaldada kommunikatsioonimooduli CP 1243-1. Kui kontrollereid on ühendatud vastavalt joonisel toodud skeemile (jadamisi), siis antud moodul on vajalik ainult esimese alajaama kontrolleri jaoks. Sellise lahenduse puuduseks on see, et kommunikatsioonimooduli riknemise tõttu ei tule enam signaalid SCADA-sse kõikidest alajaamadest. Kui aga iga PLC ühendatakse võrku eraldi või tekitab otsesidest SCADA-sse läbivalt teisi alajaamu,

siis paigaldatakse kommunikatsioonimoodul igasse alajaama ning mooduli rikkumine ühes alajaamas ei mõjuta teiste alajaamade signaalide edastamist.

SIMATIC S7 kasutamise puuduseks on ka ajasünkroniseerimise probleem. Signaali edastatakse SCADA-sse ajatempliga, mis oli signaalile määratud CPU poolt. See tähendab, et see ei ole reaalne sündmuse tekkimise aeg, vaid aeg, millal signaal on CPU poolt saadud. Mõnedel juhtudel näiteks kaitsete jaoks, see on kriitiline.

Automaatika süsteemides kasutatakse reeglina signaalide edastamisel *periodical transmission*'i, s.t. signaale edastatakse iga teatud aja möödumisel vaatamata sellele, kas oli mingi seisundi muudatus või mitte. Seega probleemid võivad tekkida selliste signaalidega, nagu näiteks *Single* või *Double Point*, mis nõuavad andmete edastamist iga muutmise puhul (*spontaneous transmission*).

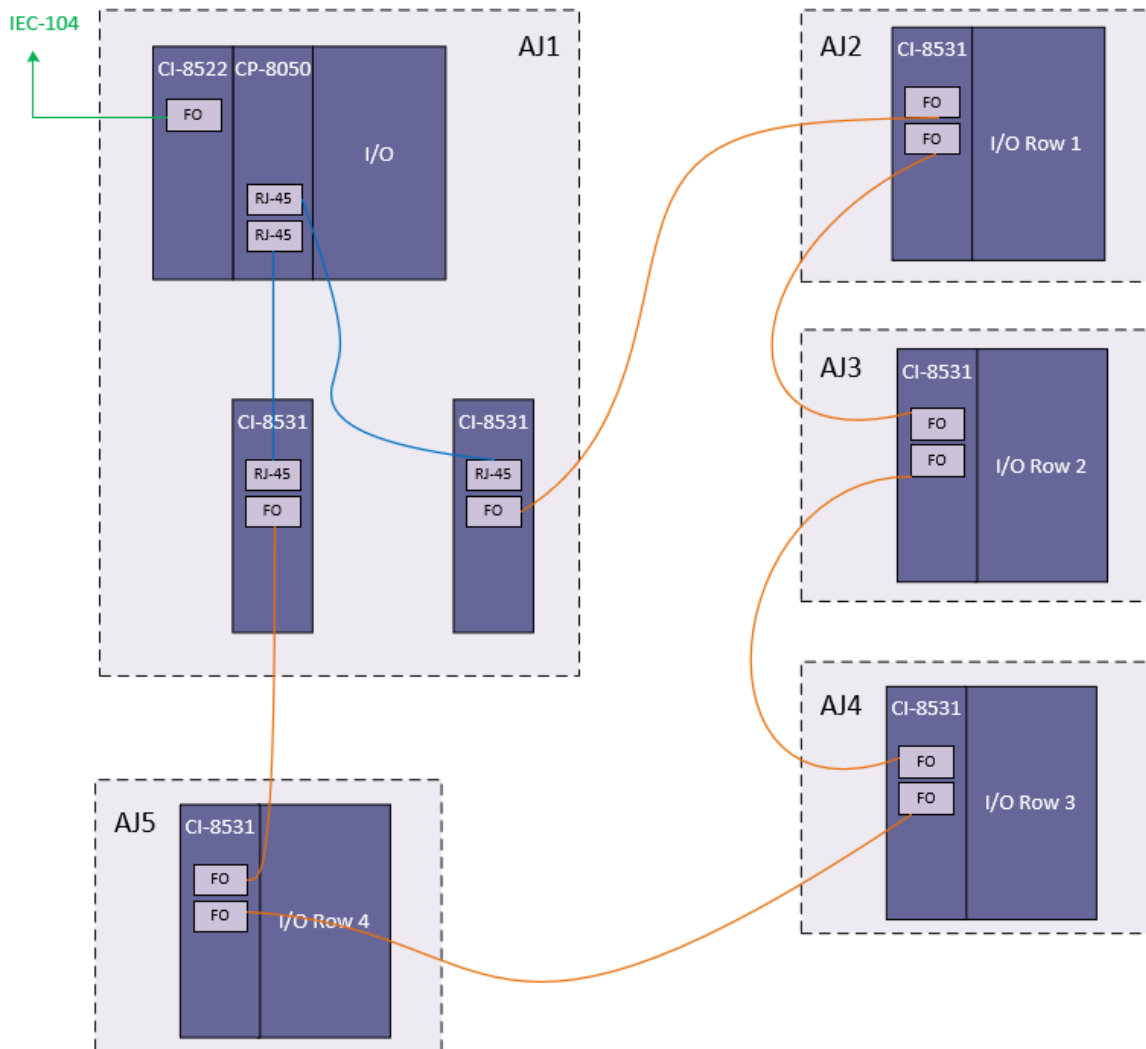
Lähtudes ülaltoodust, lihtsama variandi puhul lahendus on odav ja enam vähem kergesti seadistatav, nõuab vähe ruumi, lihtsamat alajaama automaatikat (näiteks RLA) on võimalik teostada PLC loogika abil. Suurteks miinusteks on liiasuse puudumine, täpse ajasünkroniseerimise võimatus, CPU-de suur koormatus ja selle tulemusena madal töökindlus.

Keerulisema lahenduse puhul võrguseadmete kasutamisel on töökindlus parendatud, väheneb CPU-de koormatus, liiasus on tagatud, aga aja sünkroniseerimine on endiselt raskendatud, loodud võrku on raskem seadistada ja hallata, lahendus on kallim. Samuti võivad tekkida probleemid edaspidise laiendamise või täiendamise puhul, kui otsustatakse kasutada andmete vahetamiseks IEC 61850 protokolle. Antud lahenduses on arvestatud ainult signaalidega I/O moodulite elektrilistest ühendustest, IEC 61850 tugi aga puudub.

Lahendus Siemens SICAM A8000 RTU baasil

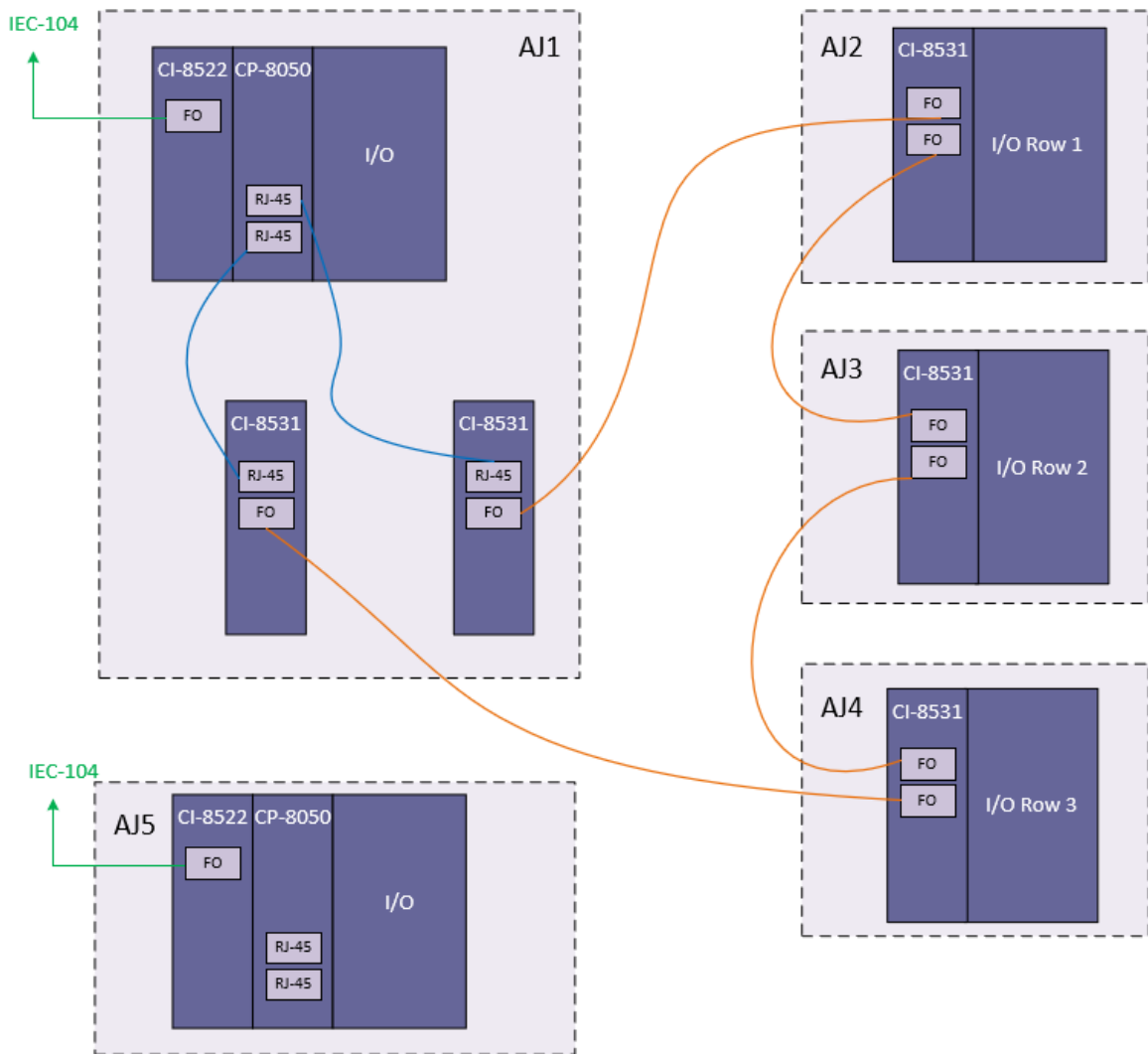
Siemens SICAM A8000 võimaldab luua hajutatud RTU-d. Kuna IEC 61850 antud juhul ei kasutata ning signaalide edastamiseks kasutatakse ainult elektrilisi ühendusi RTU I/O moodulitega, on võimalik ühte alajaama paigaldada RTU peamoodulit (protsessormoodul) ning teistesse alajaamadesse I/O moodulite ridasid koos kommunikatsioonimoodulitega, ühendades neid omavahel optiliste kaablitega. Sellist konfiguratsiooni on suhteliselt lihtne seadistada ja hallata. Vajadusel konfiguratsiooni on võimalik laiendada lisades täiendavaid I/O moodulite ridasid, mis on vajalik näiteks teiste alajaamade ühendamise vajaduse tekkimise puhul. Samuti see lahendus vähendab optika kiudude arvu ühenduste jaoks. Eraldi kommunikatsioonimoodul on vajalik SCADA-ga ühendamiseks. See lahendus on töökindel, kuna I/O moduleid on

võimalik ühendada varuühendusega (*redundancy*) (vt Joonis 2.7). Katkestuse korral kõik alajaamad on sides, välja arvatud juhul, kui peamoodul ei tööta või katkeskus on toimunud RTU ja SCADA vahel.



Joonis 2.8 Alajaama automaatika komponentide arhitektuur [7]

Tegelikkuses ei ole võimalik antud skeemi realiseerida. Alajaamade vahel optika kaablite paiknemise tõttu ringi on võimalik ühendada ainult neli alajaama, kuna ei ole võimalik paigaldada andmesidekanaleid viienda alajaama ja teiste alajaamade vahel. Protsessormoodul ei toeta kahe I/O moodulite rea ühendust. Seega kuigi protsessormoodulil on kaks Ethernet porti, ei ole kahjuks kõikide alajaamade korruga ühendamine protsessormooduliga võimalik. Seega viiendal alajaamal peab olema eraldi ühendus SCADA-ga ning selleks tuleb paigaldada ka eraldi protsessormoodulit. (vt Joonis 2.9).



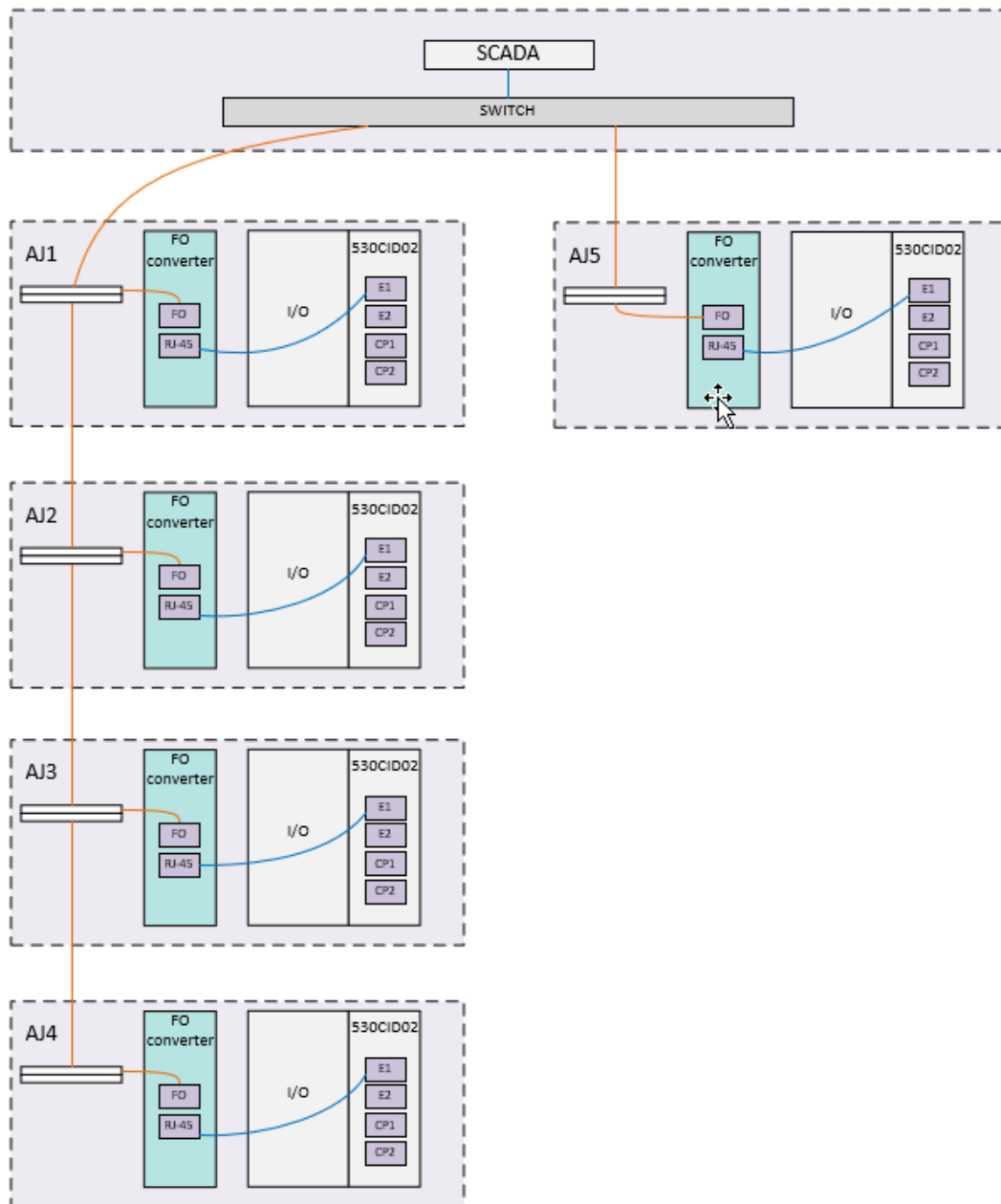
Joonis 2.9 Alajaama automaatika komponentide arhitektuur [7]

Antud konfiguratsiooni eeliseks on see, et kommunikatsioonimoodulitel on olemas nii Ethernet kui ka FO pordid, seega ei ole vaja paigaldada täiendavaid konvertereid. See tõstab ka töökindlust, kuna mida vähem on võrguelemente, seda töökindlam võrk on. Täiendavaid konvertereid on vaja kasutada ainult protsessormooduli ühendamiseks teiste alajaamade I/O ridadega. Antud lahenduse puhul ei tekki probleeme aja sünkroniseerimisega, nagu eelmise lahenduse puhul. Samuti toetavad SICAM A8000 seeria RTU-d IEC 61850 standardit ja seega edaspidine võimalik laiendus on lihtsasti teostatav.

Lahendus Hitachi Energy RTU530 RTU baasil

Hitachi Energy RTU530 puhul protsessormoodulit on vaja paigaldada igale alajaamale, aga neid on võimalik omavahel ühendada sarnaselt SIMATIC S7 lahendusele. Sel juhul töökindlus on madalam samadel põhjusel, kui SIMATIC S7 lahenduse puhul.

Töökindluse tõstmiseks on võimalik kasutada eraldi optika kiudu (vt Joonis 2.9) ühenduste teostamiseks. Antud juhul ühendus ei sõltu võrguseadmetest ega RTU-dest. Samuti ei ole RTU530 seadmetel optikaporte ning on vaja igas alajaamas kasutada optika konverterit. Kõik ülejäänud funktsioonid on sarnased Siemens SICAM A8000 lahendusele. Erinevused võivad olla RTU-de seadistamise osas. Hitachi Energy RTU-de seadistamine on tavaliselt lihtsam, kui Siemensi seadmete seadistamine.



Joonis 2.10 Alajaama automaatika komponentide arhitektuur [7]

2.6 Töökindluse analüüs

Kõikide juhtimissüsteemide puhul on võimalikud erineva töökindlusega konfiguratsioonid, mis on seotud alajaamade vaheliste sidemete eripäradega. Töökindlust tagavad nii liiasuse ja erinevate protokollide tugi kui ka sellised omadused nagu seadistamise ja haldamise keerulisus/lihtsus, lisafunktsioonide olemasolu, laiendamise ja täiendamise võimalused. Erinevate andmeedastuskanalite kasutamise võimalus tõstab oluliselt töökindlust, seega Ethernet (LAN) ja optika portide olemasolu ühes seadmes on väga suur eelis. Mida lihtsam on seadme konfigureerimine, seda kiiremini on võimalik seadet töösse viia või tekkinud probleemi lahendada. Allpool toodud kokkuvõtvates tabelites on näidatud läbivaadatud seadmete eelised ja puudused (vt Tabel 2.1, Tabel 2.2, Tabel 2.3).

Siemens SIMATIC S7

Tabel 2.1 SIMATIC S7 eelised ja puudused

Eelised:	Puudused:
<ul style="list-style-type: none">– suhteliselt kergesti seadistatav;– lihtsamat alajaama automaatikat (näiteks RLA) on võimalik teostada PLC loogika abil;– lihtne hallata;– laiendatav lisamoodulite lisamisega.	<ul style="list-style-type: none">– ei toeta liiasuse (<i>redundancy</i>) tehnoloogiaid;– esimese kontrolleri suur koormatus PLC-de jadamisi ühendamisel;– lisamooduli CP-1243-1 vajadus IEC60870-5-104 protokolliga signaalide edastamiseks;– PLC-de jadamisi ühendatud skeemi puhul kommunikatsioonimooduli riknemise tõttu ei tule enam signaalid SCADA-sse;– ajasünkroniseerimise probleem;– FO portide puudus, meediakonverter on vajalik;– puudub IEC 61850 tugi

Siemens SICAM A8000 eelised

Tabel 2.2 SICAM A8000 eelised ja puudused

Eelised:	Puudused:
<ul style="list-style-type: none">– hajutatud RTU (I/O moodulite read);– lihtne hallata;– toetab liiasust;– FO portide olemasolu;– IEC60870-5-104 tugi;– IEC 61850 tugi;– alajaama automaatikat (näiteks RLA) on võimalik teostada PLC loogika abil;– laiendatav lisamoodulite lisamisega.	<ul style="list-style-type: none">– suhteliselt keeruline RTU seadistamine

Hitachi Energy RTU530 eelised:

Tabel 2.3 RTU530 eelised ja puudused

Eelised:	Puudused:
<ul style="list-style-type: none">– lihtne hallata;– kergesti seadistatav;– IEC60870-5-104 tugi– IEC 61850 tugi;– alajaama automaatikat (näiteks RLA) on võimalik teostada PLC loogika abil;– laiendatav lisamoodulite lisamisega	<ul style="list-style-type: none">– FO portide puudus, mediakonverter on vajalik

Võrreldes kõikide lahenduste võimalusi ja eripärasid võib teha järeldust, et kõige töökindlam on süsteem, mis on loodud Siemens SICAM A8000 seeria RTU baasil, kasutades liiasuse tehnoloogiad.

2.7 Majanduslik analüüs

Maksumus on hinnatud tootjatelt saadud hindade põhjal. Hinnad on küsitud moodulite kohta, mille alusel oli võimalik arvutada kogu süsteemi maksumust. Kogumaksumus oli

arvutatud lähtudes konkreetsest konfiguratsioonist arvestades seadmete/moodulite arvu konfiguratsioonis. Arvutatud on nii maksumus iga alajaama kohta kui ka viie alajaama kogumaksumus. Kuna hinnad ei ole saadud avalikke allikatest ning ei kuulu avalikustamisele, neid antud töös ei avalikustata. On antud võrdlev hinnang, lähtudes kõige madalamast ja kõige kõrgemast maksumusest. Kõikidest lahendustest kõige odavamaks osutus Hitachi Energy RTU isegi lähtudes kõige keerulisema süsteemi variandist. Kõige kallim on Siemens RTU.

2.8 Optimaalse lahenduse valimine

Võrdlustabelis (vt Tabel 2.4) on esitatud erinevate tootjate juhtimissüsteemide võimalused ja omadused.

	IEC104 tugi	Turvalisus	Seadistamise keerukus	Töökindlus	Haldus ja käit	Maksumus
Siemens SICAM A8000 RTU	+	+	keskmine	kõrge	lihtne	kõrge
Hitachi Energy RTU530	+	+	lihtne	keskmine	lihtne	madal
Siemens SIMATIC S7 PLC	+	+	keskmine	madal/keskmine	lihtne	keskmine

Tabel 2.4 Lahenduste võrdlus

Turvalisus on hinnatud selliste kriteeriumite põhjal, nagu tule müüri olemasolu, andmete krüpteerimise võimalused, erinevate õigustega kasutajad.

Seadistamise keerukuse määrab nii võrgu konfiguratsioon kui ka seadistamiseks kasutatav tarkvara.

Töökindlust hinnatakse süsteemi talitlemise võimalusest rikke või häire tekkimisel. See on varuühenduste olemasolu, aja sünkroniseerimise võimalused, süsteemi elementide sõltuvust teistest elementidest, elementide varundatud toide.

Haldus ja käit hinnatakse lähtudes süsteemi haldamise vajadusest ja keerukust.

Siemens SICAM on kõige töökindlam, aga samas ka kõige kallim süsteem, millele lisandub ka seadistamise keerukus.

Siemens SIMATIC S7 on keskmise maksumusega süsteem, aga ka kõige madalama töökindlusega. Samuti selle süsteemi seadistamine ei ole kõige lihtsam.

Hitachi Energy RTU530 on keskmise töökindlusega süsteem, mida on kerge seadistada. Selle juhtimissüsteemi maksumus on kõige madalam.

Kõikide kriteeriumite järgi kõige optimaalsem on Hitachi Energy lahendus, mis tagab vajalikku töökindlust ning ei nõua suuri kulusid. Samuti ettevõttel on olemas kasutusel

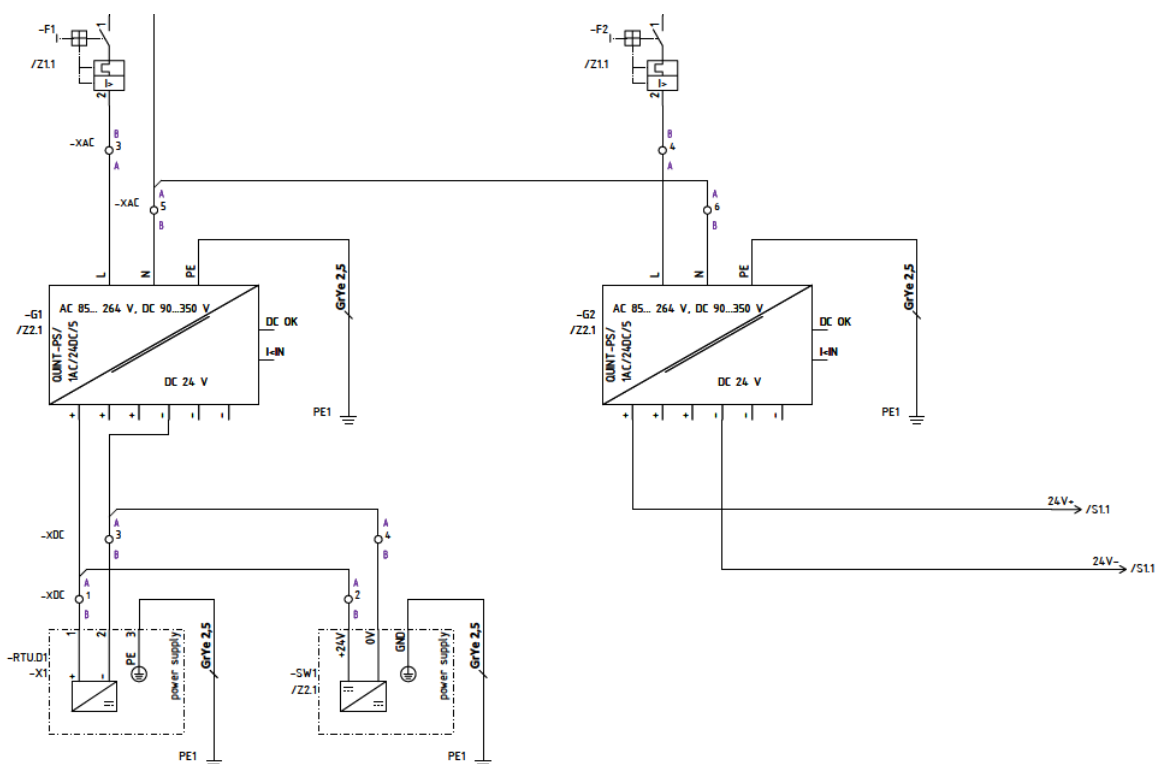
teised Hitachi Energy lahendused, mis võimaldab paremini integreerida uued lahendused olemasolevasse süsteemi.

3 LAHENDUSE VÄLJATÖÖTAMINE JA RAKENDAMINE

Valitud lahenduse elluviimiseks peab olema koostatud tehniline projekt, mille järgi hangitakse seadmeid, komplekteeritakse vajalikke kilpe, teostatakse paigaldustööd ja ühendusi alajaamas. Paralleelselt paigaldustöödega vastava tarkvara abil koostatakse seadmete konfiguratsioon. Mõnede seadmete configureerimine on võimalik pärast nende paigaldamist. Kui seadmed on paigaldatud ja ühendatud, seadmetesse laetakse ettevalmistatud konfiguratsioon ning alustatakse süsteemi testimisega. Testitud ja kontrollitud süsteem viiakse töösse.

3.1 Projekteerimine

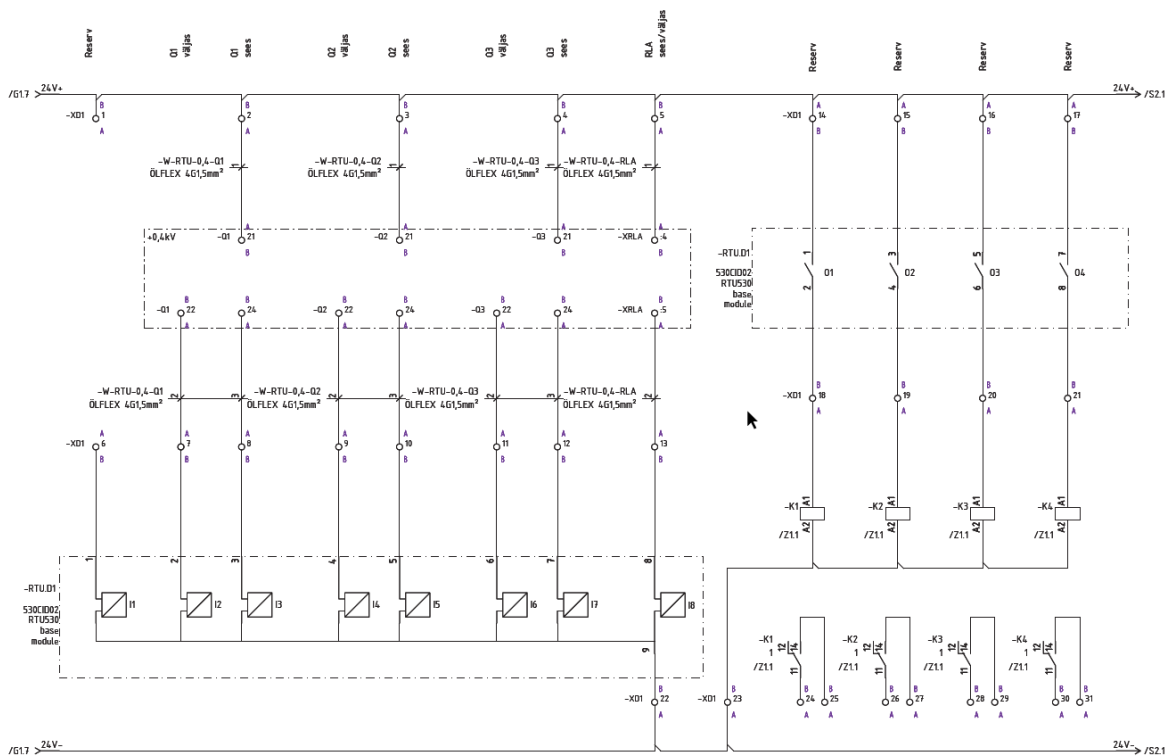
Kui optimaalne lahendus ja vastavad seadmed on valitud, koostatakse tehnilist projekti. Antud töö praktilises osas on koostatud RTU kilbi projekt. Projekti koostamiseks on vajalik ka alajaama kommunikatsioonivõrgu skeem, kus on näidatud, kuidas seadmed on omavahel ühendatud, mis protokolle kasutatakse signaalide edastamiseks. Seadmete vahelise kommunikatsiooni jaoks koostatakse IP-tabel, kus näidatakse seadmete võrgusätteid (IP-aadressid ja muud parameetrid, näiteks VLAN-d, RSTP parameetrid jne).



Joonis 3.1 Alajaama automaatika komponentide arhitektuur [7]

Projekti koostamisel lähtutakse valitud seadmetest. Tuleb valida nii põhiseadmeid nagu RTU, meediakonverterid, *switch*'id jne, kui ka abiseadmeid ja tarvikuid, nagu klemmid, releed, toiteplokid, juhtmed ja kaablid. Projektiga määratakse seadmete toiteallikad, signaalid seostatakse RTU sisendite ja väljunditega. Tuleb ette näha- eraldi toiteallikad toite- ja signaalilahelate jaoks. Joonise (vt Joonis 3.1) vasakpoolne osa on toiteahelad ja parempoolne on signaaliahelad.

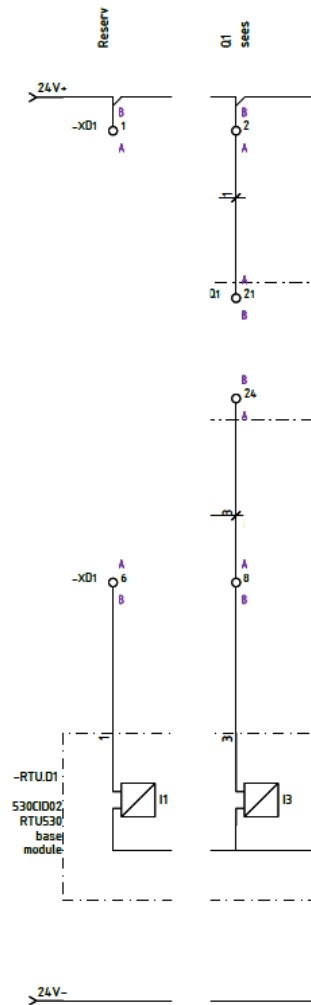
Joonisel (vt Joonis 3.2) on toodud valitud lahenduse sekundaarprojekti osa, kus on näidatud protsessormooduli binaarsisendid (vasakul poolel) ja väljundid (paremal poolel). Binaarsisendidest üks sisend on ettenähtud reservi tagamise jaoks ning teised on kasutatud lülitite asendite signaalide edastamiseks. Protsessormooduli väljundeid antud juhul ei kasutata, vajadusel, näiteks alajaama laiendamisel neid võib kasutusele võtta teostades vastavaid ühendusi.



Joonis 3.2 Alajaama automaatika komponentide arhitektuur [7]

Võimalikke signaalide lisamiseks tuleb tagada binaarsisendite ja väljundite reservi, isegi kui esialgu nende lisamine ei ole planeeritud. Joonisel (vt Joonis 3.3) on näidatud reservsisend (vasakpoolne) ja signaaliga sisend (parempoolne). Reservsisendi jaoks RTU kilbis peavad olema ettenähtud klemmid võimalikke ühenduste teostamiseks. Reservväljundite jaoks on ettenähtud nii klemmid kui ka reeled. Joonistel peavad olema näidatud kaablite nimetused ja tüübid. Antud juhul ettevõtte soovil on kasutatud kaabel Ölflex, mida tavaliselt kasutatakse teistes ettevõtte lahendustes. Sama printsiibi

kasutades on valitud teised tarvikud, nagu klemmid ja releed. See lihtsustab kogu taristu haldamist.

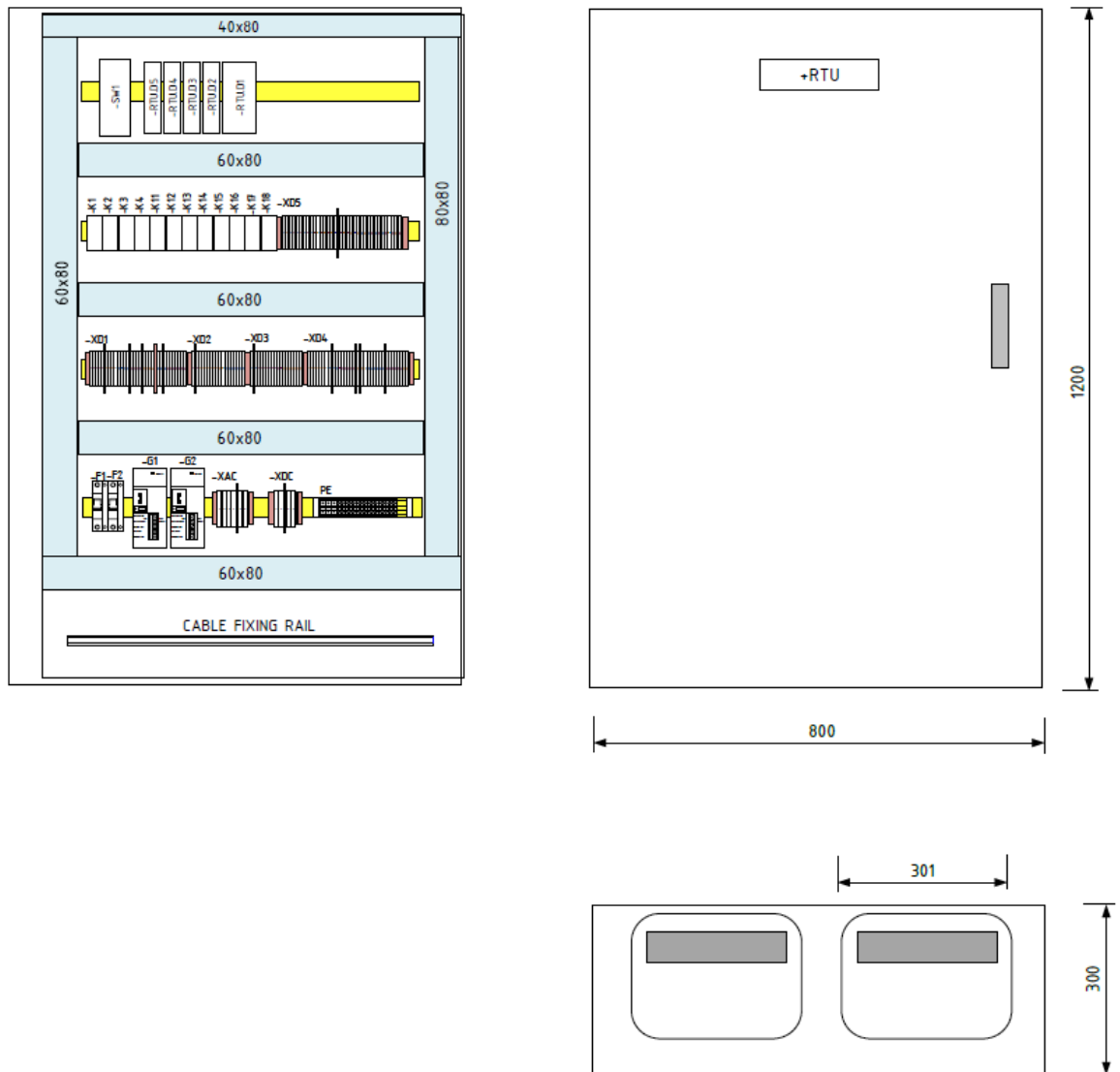


Joonis 3.3 Alajaama automaatika komponentide arhitektuur [7]

Antud projekti puhul alajaamas on olemas jõutrafo kaitsed. Ettevõtte otsustas antud hetkel kaitse rakendumise signaale SCADA-sse mitte edastada, aga vajadusel on võimalik neid hiljem lisada. RTU-s on selleks ette nähtud I/O reservmoodul.

Projektis peavad olema määratud projekteeritava kilbi mõõdud ning seadmete paiknemine kilbis (vt Joonis 3.4). Projektile peab olema lisatud seadmete spetsifikatsioon, kus on näidatud seadmete kõik peamised tehnilised parameetrid, mille alusel on võimalik neid seadmeid tellida. Projekti lisaks on kaablite loetelu, kus on näidatud kaabli nimi, tüüp, pikkus, ühenduskohad ning vajadusel märkused kaabli kohta. Lähtudes projekti mahust ja keerukust koostavad projekti üks või mitu projekteerijat. Koostatud projekti kontrollitakse ja kinnitatakse vastutavate spetsialistide poolt.

EESTVAADE



Joonis 3.4 Projekteeritud kilbi joonis

3.2 Süsteemi konfigureerimine

Süsteemi konfigureerimiseks eelnevalt tuleb teha kindlaks, milliseid parameetreid ja mis eesmärgiga tuleb seadistada. Seadistatakse nii RTU kui ka kõik seadmed, mis on ühendatud võrku. Võrgus olevatele seadmetele määratakse võrguparameetreid, *switch*'idel konfigureeritakse vajalikke võrgu ja turvalisuse sätteid, RTU peab olema konfigureeritud nii võrgu kui ka signaalide edastamise osas, määratud turvalisuse sätteid. Kõikidele seadmetele seadistatakse ajasünkroniseerimise parameetreid (ajaserveri aadressi).

Signaalide määramine

Esiolgu tuleb määrata, milliseid signaale tuleb SCADA-sse esitada ja mis eesmärgiga. Signaalide määramiseks koostatakse signaalide tabel. Tabelis näidatakse signaalide allikad, näiteks I sektsiooni võimsuslülitite Q1, alajaama tähis ning vajadusel ka pingeaste, jaotla, seade, signaali nimetus, signaali tüüp (staatus - näiteks lülitite asendid, käsk, alarm, mõõtmine), IEC 60870-5-104 aadress ning vajadusel ka IEC 61850 aadress, kui signaalide edastamiseks RTU-sse kasutatakse protokoll IEC 61850. Sellisel juhul signaali allikaks on tavaliselt IED (näiteks Siemens SIPROTEC 5 või ABB REF530).

Tuleb näidata informatsiooni tüüpi (*information type*: SP - *single point*, DP - *double point*, DC - *double command*, MV - mõõtmine etc.). IEC 60870-5-104 signaali tüüpi võiks näidata nii indeksiga kui ka nimetusega. Näiteks *single point*'i signaali puhul:

TI-30, M_SP_TB_1: <30> := Single-point information with time tag CP56Time2a / M_SP_TB_1

see on TI-30 (indeks) või M_SP_TB_1 (nimetus). Signaalilistis võiks näidata viiteaeg, kui signaal peab olema edastatud viitega. Signaalid määramiseks võiks kasutada seadme *Interoperability list of IEC 60870-5-104 protocol*, millest on näha, mis signaale antud seade toetab.

Signaalide tabeli näidis on esitatud tabelis (vt Tabel 3.1)

Alajaam	Seade	Signaali nimetus	Signaali tüüp	IEC104 tüüp	ASDU	IEC104 aadress
K1	6KL01	K1_6KL01_asend	staatus	TI-30	1	3001
K1	6KL02	K1_6KL02_asend	staatus	TI-30	1	3002
K1	0_4	Q1_sisse	käsk	TI-45	1	101
K1	0_4	Q2_sisse	käsk	TI-45	1	102

Tabel 3.1 Signaalide tabeli näidis

Seadmete konfigureerimine

Kui signaalid on määratud ja seadmed valitud, alustatakse seadmete konfigureerimisega. Konfigureerimine teostatakse vastavalt eelnevalt koostatud projektidele, IP-aadresside ja signaalide tabelitele. IEC 61850 signaale tavaliselt imporditakse RTU-sse SCD failidest, mis on loodud IED (releede) konfigureerimisel. Signaalid, mis tulevad otse RTU I/O moodulitesse konfigureeritakse RTU-s. Pärast seadmete konfigureerimist ja alajaama kommunikatsioonivõrgu loomist alustatakse signaalide testimisega.

3.3 Süsteemi testimine

Alajaama ehitamisel või renoveerimisel on vaja kindlasti testida kõiki kriitilisi signaale, eriti juhtumis-, mõõtmis-, asendite ja kaitsete signaale. Testimise käigus kontrollitakse, et signaalid tulevad õigesse kohta, nad on sünkroniseeritud ja õiged. Testimisel alajaam peab olema pingetu, kasutatakse ainult abipinget, mis on vajalik seadmete- ja signaalahelate toite tagamiseks. Testid viiakse läbi kohapeal.

Testimist on võimalik teostada erinevat viisi. Signaale võib simuleerida või opereerides reaalsete seadmetega. Signaalide simuleerimist kasutatakse peamiselt RTU või HMI konfiguratsiooni testimiseks. Töökonfiguratsiooni tuleb kindlasti testida edastades signaale reaalistest seadmetest, et veenduda signaalide usaldusväärsusest. Signaale kontrollitakse RTU kaudu, tavaliselt kasutades selleks veebiliidese. Samuti signaalide liikumist võrgus kontrollitakse erinevate sidevõrkude testimise programmidega, nagu näiteks WireShark. Enamasti kasutatakse aga WireSharki andmeside probleemide lahendamiseks. Pärast kõike alajaama signaale kontrollimist ja testimist RTU kaudu, testitakse SCADA signaale dispetšeriga. Signaalide testimine on väga tähtis digitaliseerimise osa. Kõik signaalid peavad olema kontrollitud, et vale objekti mitte sisse/välja lülitada, mis võib olla väga ohtlik nii võrgu, kui ka inimeste jaoks. Testimise viisid sõltuvad sellest, kas tegemist on uue- alles ehitatud alajaamaga või olemasoleva alajaama täiendamisega.

Uusi alajaamasid testitakse enne pingestamist, so kõik alajaama süsteemid peavad olema korralikult kontrollitud ja testitud ning alles peale seda alajaam pingestatakse ja viiakse töösse sisse. Seega testimisel tekkivad vead ei häiri elektrivõrgu tööd ning ei mõjuta tarbijaid. Töös olevate alajaamade testimine on raskendatud, kui alajaama ei ole võimalik täielikult seisata ja tarbijaid välja lülitada. Sel juhul testimisel tuleb teha ümberlülitusi. Tavaliselt üks sektsioon on pingestatud ja kasutatakse elektri tarbijate edastamiseks ja teine sektsioon on pingetu ja testitakse. Seega RTU konfigureerimisel ja testimisel on vaja olla väga ettevaatlik, kuna valesti saadetud signaali tõttu võib tekkida katkestus või isegi õnnetus.

Kõike lihtsam on mõõtmiste testimine, mida on võimalik teostada pingestatud sektsioonil. Lülitite testimine teostatakse pingetu sektsioonil. Esiolgu kontrollitakse signaalide õigsust, kas nad tulevad õigest kohast. Selleks lüliteid suletakse/avatakse käsitsi või vastavate nuppude abil kohapeal ning jälgitakse, et õiged signaalid tulevad RTU-sse ja SCADA-sse. Seega testitakse asendisignaale. Peale seda testitakse juhtimist. Esiolgu proovitakse juhtida RTU-st. Kui RTU on testitud, siis testitakse juhtimine SCADA-st. Vajadusel testitakse kaitseid, selleks reeglina kasutatakse spetsiaalseid seadmeid.

Lihtsamatel juhtudel signaalide testimiseks kasutatakse signaalilisti, mille alusel RTU konfiguratsioon on tehtud. Kui aga alajaam on suur ja keerulise konfiguratsiooniga, testimise jaoks koostatakse testimise protokollid, kus on loetletud kõik vajalikud testid, testimise meetodid ja tingimused.

3.4 Peamised alajaama renoveerimise probleemid

Vana alajaama renoveerimisel võivad tekkida erinevad ootamatud probleemid. Mõned neist võib lahendada kohapeal tulles ja seadmeid ning nende paiknemist ja konfiguratsiooni uurides. Samuti võib aidata alajaama teenindava personali küsitlemine. Mõned probleemid lahendatakse olemasolevate seadmete vahetamisega uute sobivate seadmete vastu.

Oluliseks probleemiks on vajaliku dokumentatsiooni puudus. Mõnikord ei ole võimalik kogu informatsiooni saada kohapeal alajaama uurides. Vastava dokumentatsiooni puudumisel ei ole vajalikke ühenduste määramine ja projekteerimine ning õigete seadmete valimine võimalik. Uute alajaamade puhul see probleem tavaliselt ei teki, kuna dokumente hoitakse serverite peal digitaalsel kujul.

Teiseks probleemiks võiks olla see, et kaugjuhtimine ei olnud alajaama ehitamisel ette nähtud. Samuti seadmed võivad olla liiga vana ning võib tekkida ühilduvuse probleem. Vanade seadmete modifitseerimine tihti võib olla liiga raske, aga uute seadmetega asendamine nõuab suurt ümberehitust. Antud juhul tuleb kaaluda varianti uue alajaama ehitamisega vana asemele. See võiks olla ka probleemiks mitte ainult ressursside, vaid ka vajalikke maa-alade puudumise tõttu.

Antud projekti puhul puudub alajaamas alalispinge abitoide ning seoses sellega tuleb täiendavalt paigaldada muundureid. Kuna alajaamas puuduvad akud, seega toite kadumisel lülitatakse sekundaarseadmeid välja ning seoses sellega ei tule ka signaalid SCADA-sse. Akude olemasolul sellist probleemi ei tekki ning uute alajaamade projekteerimisel alati nähakse ette reservtoite olemasolu.

Oluliseks probleemiks on sidekanalite puudumine. Sellisel juhul tuleb läbi mõelda, projekteerida ja paigaldada meediakanaleid, näiteks optika võrku. Antud töö puhul sidekanalite paiknemine ei olnud optimaalne, mõned ühendused olid võimalikud ainult kasutades teiste alajaamade võrguseadmeid (*switch'e*), mida oli vaja ümber konfigurereerida, lisades täiendavaid VLAN-e renoveeritava alajaama signaalide eraldamiseks teistest signaalidest. Samuti ühendused olid liiga pikad ja läbisid mitu alajaamu, mis ei olnud antud projektiga seotud. Lahenduseks on uute optika kaablite paigaldamine, aga kahjuks mitte kõikide alajaamade jaoks osutus see võimalikuks.

KOKKUVÕTE

Kaasaegsed alajaamad on digitaliseeritud ja täielikult automatiseeritud, mis võimaldab efektiivselt korraldada vajalikke kaitsefunktsioone ning tagab töökindlust. Mida kaasaegsem on alajaam, seda tõhusam on elektrivõrkude haldamise ja juhtimise protsess.

Tänapäeval töötavad uued kaasaegsed alajaamad ühes võrgus paralleelselt vanade alajaamadega, mis ei ole nii efektiivsed ja töökindlad. Oluliseks probleemiks on see, et vanu alajaamu on veel kasutusel päris palju ning see mõjutab oluliselt elektrivõrkude tööd ja kvaliteeti.

Antud probleem on aktuaalne ka Silpower AS-i elektrivõrgu jaoks ning lõputöö eesmärgiks on Silpower AS-i elektrivõrgu töökindluse parendamine läbi kaasaegsete lahenduste kasutamise alajaamade renoveerimisel.

Antud magistritöö eesmärgiks on jätkata Silpoweri elektrivõrgu arendamisega kasutades kaasaegseid ja jätkusuutlikke lahendusi.

Töö käigus on välja selgitatud ja analüüsitud Silpoweri alajaamade kaughallatavateks muutmise võimalused, võrreldud võimalikud lahendused PLC ja RTU baasil, nende efektiivsus ja maksumus, valitud sobiv lahendus. Valik on teostatud kolme variandi vahel: Siemens SICAM A8000 RTU, Hitachi Energy RTU530 ja Siemens SIMATIC S7 PLC. Kaughallatavaks muudetakse mitu alajaama korraga ning lahenduse valik sõltub mitte ainult alajaama seadmetest, vaid ka alajaamade asukohast ning nende vahelistest sidekanalite olemasolust. Kõikide kriteeriumite järgi kõige optimaalsem osutus Hitachi Energy lahendus, mis tagab vajalikku töökindlust ning ei nõua suuri kulusid.

Praktilise osa käigus on projekteeritud vajalikud täiendused alajaama seadmete ja SCADA-sse antud alajaamadest signaalide edastamise osas.

Antud töö on rakenduslik ning suunatud konkreetse eesmärgi saavutamisele lahendada konkreetse ettevõtte probleemi. Aga samas võib see töö olla kasutatud ka näidiseks teistele ettevõtetele sarnaste probleemide lahendamisel. Samuti võivad seda kasutada tudengid ja noored telemaatika spetsialistid, kes alles alustavad oma töötegevust ning neil ei ole töö iseloomust selget ettekujutust.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] M. Melder, Protsessisiini digitaliseerimise ja minimeerimise võimalused Eesti kõrgepingealajaamade andmehõivesüsteemides. Magistritöö., Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2015.
- [2] Electrical Engineering Portal, „The facts about numerical relays that every electrical engineer should know,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://electrical-engineering-portal.com/numerical-relays-facts>.
- [3] „Siemens Ruggedcom,” Siemens, [Võrgumaterjal]. Available: <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/industrial-communication/rugged-communications.html>.
- [4] „Cisco,” Cisco Systems, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.cisco.com/site/us/en/products/networking/switches/index.html>.
- [5] „Meinberg,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.meinbergglobal.com/english/products/rack-mount-1u-ntp-server.htm>.
- [6] „Hitachi Energy RTU560,” Hitachi Energy, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.hitachienergy.com/products-and-solutions/substation-automation-protection-and-control/products/remote-terminal-units/rtu560-product-line>.
- [7] „CEN-CENELEC-ETSI,” [Võrgumaterjal]. Available: https://www.cencenelec.eu/media/CEN-CENELEC/AreasOfWork/CEN-CENELEC_Topics/Smart%20Grids%20and%20Meters/Smart%20Grids/cgseg_sec_0042_report1.pdf.
- [8] P. Contact, „Как управлять потоками в ЛВС Цифровой Подстанции?,” [Võrgumaterjal]. Available: https://habr.com/ru/company/phoenix_contact/blog/507862/.
- [9] A. Klien ja K. Jotz, „Анализ сетей и информационного обмена по протоколам IEC 61850,” [Võrgumaterjal]. Available: <http://digitalsubstation.com/blog/2016/10/12/analyzenetworks/>.
- [10] J. Esabu, J. O. Egwaile, P. E. Orukpe ja S. A. Ike, „IEC 61850 Substation Communication Network Performance & Reliability Assessment Based on

- Network Real Time Operating Data," [Võrgumaterjal]. Available:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9236444>.
- [11] P. Li, Q. Chi, K. Wan, X. Zhan, C. Yang ja S. Wang, „Intelligent Substation Communication Network Traffic Predicting Based on Improved Elman Neural Network," [Võrgumaterjal]. Available:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9095067>.
- [12] Electrical Engineering Portal, „Control system equipment that supervises, protects and controls the substation operation," [Võrgumaterjal]. Available:
<https://electrical-engineering-portal.com/control-system-equipment-substation-operation>.
- [13] „Siemens SICAM PQ Analyser," [Võrgumaterjal]. Available:
<https://new.siemens.com/global/en/products/energy/energy-automation-and-smart-grid/power-quality-measurement/power-quality-analysis-sicam-pq-analyzer.html>.
- [14] F. E. Abrahamsen, Y. Ai ja M. Cheffena, „Communication Technologies for Smart Grid: A Comprehensive Survey," 2021. [Võrgumaterjal]. Available:
<https://arxiv.org/pdf/2103.11657.pdf>.
- [15] H. Tao, J. Zhou ja S. Liu, „A Survey of network Security Situation Awareness in Power Monitoring System," [Võrgumaterjal]. Available:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8245487>.
- [16] M. Meldorf, T. Tikk ja J. Kilter, Elektrivõrgu operatiivjuhtimissüsteem, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2010.
- [17] К. Страусс, Системы автоматики и коммуникации в сетях электроснабжения: практическое руководство., Москва: ООО «Группа ИДТ», 2007.
- [18] „ABB SSC600," 2021. [Võrgumaterjal]. Available:
https://library.e.abb.com/public/caa2dcd7131044fe86a7957f274d7e84/SSC600_pres_1MRS758993_ENe.pdf.
- [19] „ABB," [Võrgumaterjal]. Available: <https://new.abb.com/medium-voltage/distribution-automation/numerical-relays/multiapplication/protection-and-control-rex640>.
- [20] „Siemens SICAM PAS," Siemens, [Võrgumaterjal]. Available:
<https://new.siemens.com/global/en/products/energy/energy-automation-and->

smart-grid/substation-automation/substation-automation-system-sicam-pas.html.

- [21] *Silpower AS sisedokumentid.*
- [22] „Siemens SIMATIC S7-1200,“ Siemens, [Võrgumaterjal]. Available: <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/plc/s7-1200.html>.
- [23] „Siemens SIMATIC S7-1500,“ Siemens, [Võrgumaterjal]. Available: <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/plc/simatic-s7-1500.html>.
- [24] „Hitachi Energy RTU540,“ Hitachi Energy, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.hitachienergy.com/products-and-solutions/substation-automation-protection-and-control/products/remote-terminal-units/rtu540-product-line>.
- [25] „Hitachi Energy RTU520,“ Hitachi Energy, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.hitachienergy.com/products-and-solutions/substation-automation-protection-and-control/products/remote-terminal-units/rtu520-product-line>.
- [26] „Hitachi Energy RTU530,“ Hitachi Energy, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.hitachienergy.com/products-and-solutions/substation-automation-protection-and-control/products/remote-terminal-units/rtu530-product-line>.
- [27] „Siemens SICAM AK3,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:334c59c8-3a84-4a40-97ec-169749ce23cd/sicamak3broschuereen.pdf>.
- [28] „Siemens SICAM A8000,“ Siemens, [Võrgumaterjal]. Available: <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/energy-automation-and-smart-grid/substation-automation/automation-and-remote-terminal-units-sicam-a8000-series.html>.
- [29] „Sprecher SCPRECON-E RTU,“ Sprecher, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.sprecher-automation.com/en/power-supply/products-solutions/telecontrol>.
- [30] „MOXA,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.moxa.com/en/products/industrial-network-infrastructure/ethernet-media-converters/ethernet-to-fiber-media-converters/imc-101-series>.