



INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

FLISR MOODULI RAKENDAMINE *ELEKTRILEVI OÜ* KESKPINGE JAOTUSVÕRGUS

IMPLEMENTING FLISR MODULE IN *ELEKTRILEVI OÜ* MEDIUM VOLTAGE DISTRIBUTION GRID

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Kaspar Hordo

Üliõpilaskood: 204273AAVM

Juhendajad: professor Jako Kilter
Maanus Roosmann (*Enefit Connect OÜ*)

Tallinn 2022

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

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

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Kaspar Hordo

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „FLISR mooduli rakendamine *Elektrilevi OÜ* keskpinge jaotusvõrgus“, mille juhendaja on professor Jako Kilter,
 - 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.

_____ (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.

LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Kaspar Hordo

Lõputöö liik: Magistritöö

Töö pealkiri: FLISR mooduli rakendamine *Elektrilevi OÜ* keskpinge jaotusvõrgus

Kuupäev:
15.05.2022

90 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika

Töö juhendaja(d): professor Jako Kilter, Maanus Roosmann

Töö konsultant (konsultandid): Marko Kiisk

Sisu kirjeldus:

Käesolev magistritöö on kirjutatud Eesti suurima jaotusvõrguettevõtte *Elektrilevi OÜ* poolt välja pakutud teemal isetaastuva võrgu lahendusest ja on tingitud vajadusest vähendada võrgu kvaliteedinäitajate arvvaartusi. Isetaastuva võrgu lahendus on tarkvõrgu kontseptsiooni osa, mis on rikkeliste keskpinge katkestuste korral võimeline automaatselt tuvastama selle tekkimise ja kasutades kaugjuhitavaid lülitusseadmed lokaliseerima ning isoleerima riket sisaldava võrguosa ja taastama tervetele võrguosadele elektrivarustuse. Eelnevalt nimetatud toimingud teostab lahendus automaatselt ja oluliselt kiiremini, kui seda suudaks tavaolukorras võrgu dispetšer. Magistritöös antakse ülevaade Eesti elektrivõrgu toimimisest, juhtimisest ja suundumustest ning jaotusvõrguettevõtte *Elektrilevi OÜ* uuest juhtimissüsteemist, mille üks osa on isetaastuva võrgu lahendus, mis hetkel ei ole veel töösse rakendatud. Praktilise osa jaoks on kaardistatud võrguettevõtja ühe juhtimispiirkonna kolme piirkonnaalajaama väljuvaid fiidreid isetaastuva lahenduse sobivuse osas ja teostatud katsetused, mis põhinevad analüüsitud võrguosa reaalsetel möödunud riketel, andmetel ning nende lahendustel. Praktilise osa läbi viimiseks ja tulemuste saamiseks on kasutatud ettevõtte töövahendeid, rakendusi ja töö autori poolt koostatud Exceli tabelarvutusi. Töö tulemustena esitatakse mõjud kvaliteedinäitajatele ja parendusettepanekud isetaastuva lahenduse efektiivsemaks kasutusele võtmiseks. Töö põhilise tulemusena tuleb välja, et käsitletud isetaastuvat lahendust on võimalik ilma täiendavate võrguinvesteeringuteta üsna suures mahus kasutusele võtta ja selle mõju vaadeldavatele kvaliteedinäitajatele, mida põhjustavad rikkelised katkestused, on märkimisväärne. Töö tulemused võivad olla kasulikud jaotusvõrguettevõtjatele.

Märksõnad: tarkvõrk, isetaastuv võrk, rikete juhtimine, FLISR, SCADA.

ABSTRACT

<i>Author:</i> Kaspar Hordo	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Implementing FLISR in <i>Elektrilevi OÜ</i> medium voltage distribution grid	
<i>Date:</i> 15.05.2022	90 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> professor Jako Kilter, Maanus Roosmann	
<i>Consultant(s):</i> Marko Kiisk	
<i>Abstract:</i> <p>This master's thesis is written on the topic of a self-renewable grid solution, a topic proposed by <i>Elektrilevi OÜ</i>, the largest distribution network company in Estonia, and is due to the need to reduce the numerical values of network quality indicators. The self-healing grid solution is part of smart grid concept that is able to automatically detect the occurrence of a medium voltage fault event and use remotely controlled switches to locate and isolate the faulty part of the grid and restore power to the healthy parts. The above operations are performed automatically and significantly faster than a grid dispatcher would normally be able to do. The master's thesis provides an overview of the operation, management and trends of the Estonian electricity system. An overview is also provided about distribution grid company <i>Elektrilevi OÜ's</i> new control system, which includes a self-renewable grid solution, which has not yet been implemented. For the practical part of this thesis, the outgoing feeders of the three regional substations of one control area of the network operator have been mapped for the suitability of the self-healing solution and tests have been performed based on the real past failures, their data and resolutions. The company's tools, applications and Excel spreadsheets compiled by the author of this thesis have been used to carry out the practical part and obtain the results. As a result of the work, the effects on the quality indicators and suggestions for improvement for the more efficient use of the self-healing solution are presented. The main result of the work is that the self-healing solution in question can be implemented on a fairly large scale without additional grid investment, and its impact on the observed quality indicators caused by medium voltage faults is significant. The results of the work could be beneficial to distribution grid operators.</p>	
<i>Keywords:</i> smart grid, self-healing grid, fault management, FLISR, SCADA.	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	FLISR mooduli rakendamine Elektrilevi OÜ keskpinge jaotusvõrgus
Lõputöö teema inglise keeles:	<i>Implementing FLISR module in Elektrilevi OÜ medium voltage distribution grid</i>
Üliõpilane:	Kaspar Hordo, 204273AAVM
Eriala:	Elektroenergeetika – energiasüsteemide digitaliseerimine
Lõputöö liik:	magistritöö
Lõputöö juhendaja:	professor Jako Kilter
Lõputöö kaasjuhendaja: (ettevõtte, amet ja kontakt)	Maanus Roosmann (Enefit Connect OÜ, peaspetsialist, maanus.roosmann@enefit.ee)
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	30.06.2022
Lõputöö esitamise tähtaeg:	18.05.2022

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Teema on oluline, sest üha enam elektrifitseeritud ühiskonnas on elektri varustuskindlus omandamas aina tähtsamat rolli ning surve rikete poolt põhjustatud rikkeliste katkestuste kestvust vähendada on kasvav. See teema on oluline võrguettevõtete jaoks, kelle huvi on tarbijate ootuseid täita ning saavutada võrgu kvaliteedinäitajate (SAIDI, CAIDI) eesmärgid. Teema on oluline ka tarkvõrgule ülemineku seisukohast, sest FLISR mooduli täielik implementeerimine täidab tarkvõrgu üht kriteeriumi – häiringute korral isetaastumise võimekus.

Probleemi taust on see, et hetkel toimub Eesti jaotusvõrgus juhtimine suures osas manuaalselt - keskpinge rikkelise katkestuse tekkimisel peab veakoha lokaliseerima, vigase võrguosa eraldama ning tarbijatele toite taastamise korraldama dispetšer SCADA

signaalide ja kaugjuhitavate lülitite abil või korralduste teel. Tänu uuele SCADA süsteemile ja FLISR moodulile on võimalus osa või kõik eelnevalt mainitud teostada automaatselt ja kiiremini, kui seda suudaks inimene teha. Samuti teostab tarkvara reaajas kiireid lühisekoha arvutusi ning seeläbi suudab teha kaalutletud otsuseid või anda võrgu juhtijale informatsiooni, juhiseid või soovitusi potentsiaalsetest veakohtadest ja vigastest võrguosadest, mille abil kiiremini rikkebrigaad õigesse kohta suunata ja aidates kiiremini taastada elektrivarustuse.

Sarnase temaatikaga lõputööd ei ole varem Tallinna Tehnikaülikoolis elektroenergeetika magistriõppe tasemel teostatud. Lisaks teadaolevale annab töö ettevõttele konkreetseid näpunäiteid FLISR mooduli seadistamiseks sarnaste seadmetega võrguosades ning töö tulemusi saab arvesse võtta edaspidiste võrgu automatiseerimise põhimõtete loomisel..

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on analüüsida ADMS SCADA FLISR mooduli rakendatavust rikkeliste katkestuste likvideerimisel Elektrilevi OÜ keskpinge jaotusvõrgus Orissaare, Leisi ja Valjala piirkonnaalajaamade ja sealt väljuvate fiidrite näitel ning teha ettepanekud ettevõttele FLISR mooduli seadistamiseks ja kasutuselevõtuks.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

1. Võrgu automaatika rakendamise võimaluste ülevaade ja analüüs kirjanduse alusel isetaastuvate võrkude raamistikus;
2. Valitud piirkonna telemaatika seadmete kaardistus ning nende poolt SCADA'sse edastatavate signaalide/alarmide analüüs FLISR moodulile sobivuse osas;
3. FLISR mooduli seadistamine vaadeldava piirkonna fiidrite lõikes (käivitusvalikute määramine, sobiva töörežiimi valimine)
4. Erinevate seadistusega FLISR mooduli katsetus vastavas piirkonnas rikkeliste katkestuste lahendamisel (OTS keskkonnas möödunud rikete lahendamine);
5. Mõju võrgu kvaliteedinäitajatele ja majanduslik analüüs.

4. Lähteandmed

Teadusajakirjad ja teadustööde andmebaasid, avalik võrgumaterjal.

SCADA signaalide logi/ajalugu sündmustest (konf.), sisedokumendid (konf.), SCADA & FLISR dokumentatsioon (konf.), telemaatika seadmete dokumentatsioon (konf.) – ettevõtte poolt võimaldatud materjalid.

5. Uurimismeetodid

Töö tulemusteni jõudmiseks kasutatakse võrgu mudeli simulatsioonikeskkonnas FLISR mooduli katsetamist, sealhulgas varasemalt toimunud rikete ja nendega seotud signaalide/alarmide baasil sündmuste taasloomist süsteemile ning mooduli töö hindamist.

Metoodika põhineb katsetustel ning modelleerimisel. Andmete analüüsiks kasutatakse tarkvara poolt väljastatavaid aruandeid ning Exceli tabelarvutusi. Samuti teostatakse kirjanduse analüüs ja esitatakse ülevaatlikult võrdlus teiste sarnaste lahendustega isetaastuvate võrkude raamistikus.

6. Graafiline osa

1. Analüüsitava võrgu skeemid
2. SCADA ja telemaatikaseadmete infovahetuse skeemid
3. FLISR põhimõtteskeemid
4. Tulemuste tabelid, graafikud

Graafilist osa on nii töö põhiosas kui ka lisades.

7. Töö struktuur

1. Sissejuhatus
2. Elektrivõrgu toimimine
 - a. Põhi-ja jaotusvõrgu ülevaade, juhtimissüsteem
 - b. Võrgu kvaliteedinäitajad, suundumused
 - c. Tarkvõrk, isetaastuv võrk
3. Kirjanduse analüüs ja kokkuvõtte isetaastuvate võrkude raamistikus
 - a. Isetaastuva võrgu tehnoloogiad
 - b. Hollandi 20 kV isetaastuva jaotusvõrgu tutvustus
 - c. FLISR tutvustus Soomes Elenia näitel
4. Valitud piirkonna jaotusvõrgu toimimine ja juhtimine
 - a. Jaotusvõrgu juhtimine, SCADA süsteem
 - b. Valitud piirkonna ülevaade
 - i. Võrgu tutvustus ja kirjeldus, seadmete arv, skeemid
 - ii. Telemaatika seadmed, omapärad
 - iii. Möödunud rikete statistika ja analüüs
5. FLISR mooduli seadistamine valitud piirkonnale
 - a. Rikke tuvastamise meetodid, võimalused
 - b. Rikke lokaliseerimine
 - c. Rikke eraldamine võrgust

- d. Tarbijatele toite taastamine
- 6. Katsetamine, mooduli töötamine reaalsete toimunud sündmuste korral
- 7. Tulemused
- 8. Kokkuvõte

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Raamatunäited:

1. "Jaotusvõrgud" - J. Kilter, M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt. 2007;
2. "Elektrivõrgu operatiivjuhtimissüsteem" – M. Meldorf, T. Tikk. 2002;

Teadusartiklite näited:

1. "Practical experience of a self-healing power system by means of the zone concept" - J. Holmlund, A. Kostianen, T. Hakola, O. Gulich, ABB. 2012;
2. "Control-Center-Based automatic fault isolation and restoration system for rural medium voltage networks" - J. Kuru, T. Ihonen, J. Haikonen. 2013;
3. "Implementation of an Automatic FLIR-scheme in a 20 kV distribution grid" – E.J. Coster, W.C.M. Kerstens, O. Schroedel. 2014;
4. "Technologies of the self healing grid" – C. Angelo, P. Selejan. 2013;

9. Lõputöö konsultandid

Marko Kiisk – Enefit Connect OÜ peaspetsialist, ADMS SCADA ekspert.

10. Töö etapid ja ajakava

Loetelu töö etappidest, mille taga sulgudes tähtaeg. Mõned näited töö etappidest:
kirjanduse läbitöötamine (01.02.2021),
lähteandmete kogumine (01.03.2021),
teoreetilise osa kirjutamine (10.03.2021),
modelleerimise, katsetuste teostamine (01.04.2021),
uuringu tulemuste kirjeldamine (15.04.2021),
järelduste kirjutamine (15.04.2021),
kokkuvõtte koostamine (01.05.2021),
töö esimene versioon valmis (01.05.2021),
juhendajale läbilugemiseks saatmine (01.05.2021),
paranduste sisseviimine (10.05.2021),

juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine (11.05.2021),
töö lõplik versioon valmis (17.05.2021)

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel.

SISUKORD

LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	13
SISSEJUHATUS	14
1 ELEKTRIVÕRGU TOIMIMINE	16
1.1 Põhi- ja jaotusvõrgu ülevaade, juhtimissüsteem	16
1.2 Võrgu kvaliteedinäitajad	20
1.3 Suundumused	24
1.4 Tarkvõrk, isetaastuv võrk	25
2 KIRJANDUSE ANALÜÜS JA KOKKUVÕTE ISETAASTUVATE VÕRKUDE RAAMISTIKUS	29
2.1 Isetaastuva võrgu tehnoloogiad	29
2.2 Hollandi 20 kV isetaastuva jaotusvõrgu tutvustus	34
2.3 FLISR tutvustus Soomes Elenia näitel	36
3 ELEKTRILEVI JAOTUSVÕRGU FLISR.....	43
3.1 Rikke asukoht (FL)	44
3.2 Rikke lokaliseerimine (FLL)	46
3.3 Rikke eraldamine võrgust (FI)	47
3.4 Tarbijatele toite taastamine (SR)	47
4 JAOTUSVÕRGU ÜHE PIIRKONNA JUHTIMINE JA FLISR POTENTSIAAL.....	49
4.1 Jaotusvõrgu keskpinge rikete lahendamine	49
4.2 Valitud piirkonna ülevaade	50
4.2.1 Väljuvate fiidrite kaardistus	51
4.2.2 FLISR rakenduse kasutuselevõtu sobivuse hindamise kirjeldamine	58
4.2.3 Möödunud rikete statistika.....	61
4.3 Mooduli katsetamine reaalsete möödunud sündmustega	63
4.4 Tulemused	69
KOKKUVÕTE	73
KASUTATUD KIRJANDUS	75
LISA 1 – Rikke asukoht (FL) väljund	77
LISA 2 – Rike 2 lahendus.....	78
LISA 3 – Rike 3 lahendus.....	79
LISA 4 – Rike 4 lahendus.....	80
LISA 5 – Rike 5 FL väljund.....	81

LISA 6 – Rike 5 lahendus.....	82
LISA 7 – Rike 6 lahendus.....	83
LISA 8 – Rike 7 lühisvool	84
LISA 9 – Rike 7 FL (simulatsioon) väljund.....	85
LISA 10 – Rike 7 lahendus	86
LISA 11 – Rike 8 FL väljund	87
LISA 12 – Rike 8 lahendus	88
LISA 13 – Rike 9 FL väljund	89
LISA 14 – Rike 9 lahendus	90

EESSÕNA

Käesoleva magistritöö teema on valitud ettevõtte *Elektrilevi OÜ* poolt välja pakutud aktuaalsete ja huvipakkuvate teemade loetelust, täpne teema sõnastus ning uuritav piirkond on paika pandud koostöös lõputöö juhendajate ja konsultandiga. Lõputöö esimesed kaks peatükki koostati avalikult kättesaadavast materjalist, kasutades teadusartiklite andmebaase, aruandeid ja veebimaterjale. Lõputöö kolmas peatükk on kirjutatud kasutades *Elektrilevi OÜ-le* võrgujuhtimise teenust pakkuva ettevõtte *Enefit Connect OÜ* sisedokumente ja töötajate konsultatsioone. Töö autor töötab ise samuti *Enefit Connect OÜ* juhtimiskeskuses vanemspetsialistina. Lõputöö neljas, praktiline osa on kirjutatud juhtimiskeskuses ja kasutades *Enefit Connect OÜ* suletud infosüsteeme, töövahendeid ja andmebaase, mida kasutatakse võrguteenuse juhtimiseks.

Autor soovib igakülgse abi ja nõuannete eest tänada juhendajaid, kelleks olid Tallinna Tehnikaülikooli professor Jako Kilter ja ettevõtte *Enefit Connect OÜ* peaspetsialist Maanus Roosmann. Samuti soovib autor tänada lõputöö konsultati, kelleks oli ettevõtte *Enefit Connect OÜ* industriaaltehnoloogia arhitekt Marko Kiisk.

Märksõnad: tarkvõrk, isetaastuv võrk, rikete juhtimine, FLISR, SCADA.

SISSEJUHATUS

Ühiskondlikud ootused, elektrifitseerimise kasv, madalpingele ühendatud detsentraliseeritud elektritootmise kasvav osakaal ja regulatiivsed ettekirjutused ning arengukavad seavad üha kõrgemaid kvaliteedinõudeid jaotusvõrkudele, mis tähendab muu hulgas vajadust rikete tekkimisel katkestuse ulatuse piiramist ja kiiret taastamist. Samuti on jaotusvõrgu ettevõtjatele oluline pakkuda kvaliteetset võrguteenust ja majanduslikud huvid vähendada katkestuste kestvust tarbijatele, mille tulemusel vähenevad mõõdetavad kvaliteedinäitajad (SAIDI), andmata energia kogus ja riiklikult sätestatud kvaliteedinõuete rikkumisel tarbijatele kompenseeritavad hüvitiste summad. Töökindluse parendamiseks on peamised meetodid paljasjuhtmelise õhuliini asendamine kaetud juhtme või maakaabelliinidega ja võrgu automatiseerimine, millest viimase tulemusel tekivad võimalikuks isetaastuva võrgu lahendused.

Eesti suurima jaotusvõrguettevõtte, *Elektrilevi OÜ*, võrku juhib ettevõtte *Enefit Connect OÜ*, kus töötab ka antud magistritöö autor. Ettevõtte on alates 2022. aasta esimesest kvartalist kasutanud võrgu juhtimiseks uut SCADA süsteemi, mille funktsionaalsuses sisaldub ka isetaastuva võrgu lahendus – *Fault Location, Isolation and Supply Restoration* (ehk rikke lokaliseerimine, isoleerimine ja toite taastamine), edaspidi tekstis FLISR, mis ei ole veel töösse rakendatud. Uurimisteema on esitatud jaotusvõrguettevõtte *Elektrilevi OÜ* poolt Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi elektrisüsteemi uurimisrühma lõputöö teemade nimekirja, kust magistritöö autor selle valis isiklikust huvist ja teema aktuaalsusest. Käesoleva magistritöö teemakäsitluses uuritakse nimetatud automaatse isetaastumise lahenduse kasutusele võtmise võimalusi ja analüüsitakse ühe juhtimispiirkonna kolme piirkonnaalajaama väljuvaid fiidreid FLISR mooduli kasutusele võtmise võimekusest lähtuvalt. Töö eesmärk on välja selgitada tänase automatiseerimise taseme juures FLISR mooduli rakendatavuse määr ja hinnata mõju kvaliteedinäitajatele möödunud rikkeid ning nende lahendusi analüüsides. Püstitatud hüpotees on, et analüüsitava isetaastuva võrgu lahenduse kasutusele võtmisel väheneb rikkete katkestuste mõju, mis aitab võrguettevõtjal parendada kvaliteedinäitajaid. Põhilised uurimisküsimused, mida töö käigus lahendatakse, on:

- Analüüsitava võrguosa kaugjuhitavate seadmete piisavus FLISR isetaastuva võrgu lahenduse kasutusele võtmiseks;
- FLISR mooduli kasutusele võtmise potentsiaalne mõju kvaliteedinäitajatele, möödunud perioodi reaalse rikkete analüüs ja mõju hindamine.

Lõputöö esimeses osas antakse ülevaade Eesti elektrivõrgu toimimisest ja juhtimisest, kirjeldatakse levinumaid võrgu töökindlust iseloomustavaid kvaliteedinäitajaid ja nende väärtusi möödunud aastate lõikes, antakse ülevaade jaotusvõrkude väljakutsetest, mille on esile kutsunud hajustootmise kasvamine ja regulatiivsed nõuded vähendada SAIDI arväärtust. Samuti kirjeldatakse tarkvõrgu olemust ja selle tähtsust. Magistritöö teine peatükk kirjeldab isetaastuva võrgu tehnoloogiaid ja annab ülevaate olemasolevatest tehnoloogiast ning kasutusjuhtumitest lähiriikide jaotusvõrguettevõtjate näol. Töö kolmandas osas kirjeldatakse *Elektrilevi OÜ* võrgu juhtimiseks kasutatava uue SCADA süsteemi FLISR mooduli tööpõhimõtteid ja töötamise aluseid. Töö neljandas peatükis antakse ülevaade valitud võrguosa tänasest juhtimisest, kaardistatakse väljuvad fiidrid ja analüüsitakse neid FLISR mooduli rakendatavusest lähtuvalt, tuues välja isetaastuva lahenduse juhitud seadmed ja antakse ülevaade möödunud rikete statistikast ning mõjust analüüsitavatele kvaliteedinäitajatele. Samas peatükis kirjeldatakse ka läbi viidud katsetusi hindamaks FLISR mooduli töötamist realselt toimunud rikete korral ja antakse ülevaade katsetulemustest - hinnangulisest mõjust nende rikete kvaliteedinäitajatele ja järeldustest.

Käesoleva lõputöö raames teostatud analüüsist ja katsetustest on kasu jaotusvõrguettevõtjatele ja jaotusvõrku juhtivatele ettevõtetele, kes otsivad lahendusi vähendamaks keskpinge rikete mõju võrgu kvaliteedinäitajatele.

Magistritöö sisaldab neljateistkümmet lisa, millest viis on uuritava FLISR mooduli vea asukoha rakenduse väljundid ja üheksa on lülitamiste registrid analüüsima toimunud rikete reaalset lahendust eeldusliku isetaastuva lahenduse omaga.

1 ELEKTRIVÕRGU TOIMIMINE

Käesolevas peatükis esitatakse ülevaade Eesti põhi- ja jaotusvõrgust, nende juhtimisest, kvaliteedinäitajatest ja arengusuundumustest.

1.1 Põhi- ja jaotusvõrgu ülevaade, juhtimissüsteem

Elektrienergia ülekandmiseks ja tarbijatele edastamiseks loodud elektrivõrgu võib sisuliselt jaotada kaheks: põhivõrk ja jaotusvõrk. Põhivõrk on riigipiire ületav ja energiasüsteeme tervikuks ühendav kõrgepingel talitlev võrk, mille abil ühendatakse omavahel suured elektrijaamad, suurtarbijad ja jaotusvõrgud ning mille abil kantakse üle suurt energiahulka pikkade vahemaade taha. [1] Jaotusvõrk on madal- ja keskpingel toimiv ning üldjuhul üht piirkonda hõlmav võrk [2], mille abil toimetatakse elektrienergia tarbijate liitumispunktideni, kust lõpeb jaotusvõrgu opereerimisala.

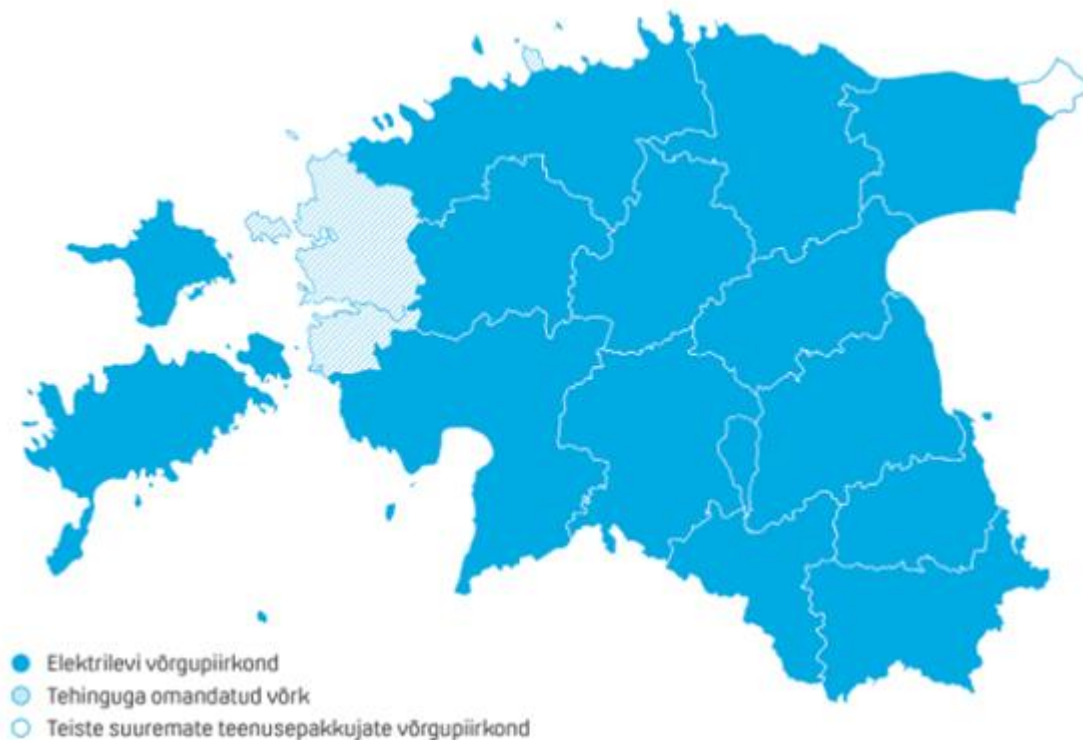


Joonis 1.1 – Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrk [4]

Eestis on ainult üks põhivõrguteenust pakkuv ettevõtte – *Elering AS*. Samuti on nimetatud ettevõtte näol tegemist süsteemihalduriga. Eesti kuulub *BRELL* sünkroonlasse, mis on Venemaa, Eesti, Läti, Leedu ning Valgevene ühine sagedusala. Eestil on välisühendusi teiste riikide kokku 8 – kuus 330 kV vahelduvvooluühendust (3 Lätiga, 3 Venemaaga) ja kaks alalisvooluühendust Soomega. [3] Põhivõrgu moodustavad (joonis 1.1): 1697 kilomeetrit 330 kV liine, mis on mõeldud suurte energiakoguste ülekandmiseks suuremate vahemaade taha; 3493 kilomeetrit 110 kV liine, mis on mõeldud energia edastamiseks piirkondadesse; 58 kilomeetrit 35 kV liine,

millest ligi 88% moodustavad merekaablid ning 155 alajaama, millest 13 on 330 kV alajaama ning 110 kV alajaamade arv 142. [4] Põhivõrgu selgroo moodustavad 330 kV liinid, nende abil on ühendused naaberriikide energiasüsteemidega, enamik jaotusvõrgu ettevõtjate liitumispunkte on 110 kV pingestmel.

2020. aasta seisuga oli Eestis 33 jaotusvõrguettevõtet ja neile kuuluvaid elektriliine 65 500 kilomeetrit. Neist suurim on *Elektrilevi OÜ*, kelle turuosa on üle 89% kogu sektori müüginahust. [3] *Elektrilevile* kuulub 63 000 kilomeetrit elektriliine, mis üle 96% kogu jaotusvõrgu elektriliinidest, ning 25 300 alajaama. Elektrivõrk on oma olemuselt loomulik monopol ning samale maa-alale üldiselt teist konkureerivat taristut otstarbekas ehitada ei ole, piirkonniti vaadates katab *Elektrilevi OÜ* jaotusvõrk 95% Eestist (joonis 1.2) ning pakub teenust 533 000 kliendile. [5] Suurimaks alaks, kus on jaotusvõrku haldab teine ettevõtte, on Narva linn, Narva-Jõesuu, Sillamäe ja selle ümbrus, kus võrguteenuseid osutab *VKG Elektrivõrgud* (37 000 tarbimiskohta, 372 alajaama, 930 km 0,4-110 kV elektriliine). [6] Jaotusvõrgu teeninduspiirkondadest annab hea ülevaate alljärgnev joonis 1.2, kus on kujutatud *Elektrilevi OÜ* võrgupiirkonda (sinine, siniselt viirutatud) ning valgega *VKG Elektrivõrgud* võrgupiirkonda. [5] Ülejäänud 31 Eesti tegutseva jaotusvõrgu teeninduspiirkonnad, müügi- ning võrgumahud on proportsionaalselt väikesed:



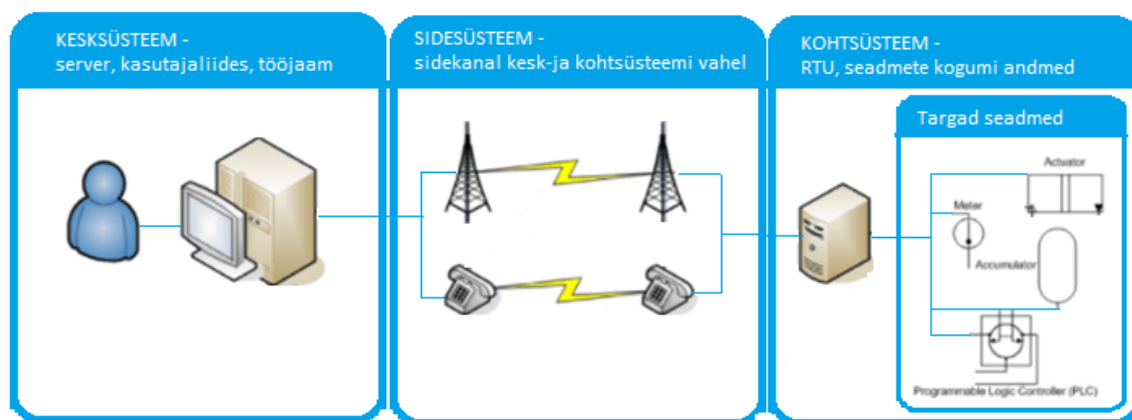
Joonis 1.2 - Elektrilevi jaotusvõrk [5]

Eesti elektrisüsteemi talitluse planeerimist ja juhtimist reaalajas korraldab põhivõrguettevõtte *Elering AS*. Talitluse planeerimine on elektrisüsteemi talitluse lubatavuse koordineeritud kontroll, mis hõlmab endast talitluskindluse analüüsi ning vajadusel talitluse viimist lubatud piiridesse. Eesmärk on koostada plaanid ja prognoosid reaalajas toimuva talitluse juhtimise faasi jaoks, tagades optimaalsed kaod ja maksimaalse võimaliku piiriülese ülekandevõimsuse vastates samal ajal töö- ja varustuskindluse nõuetele. [7] Reaalajas juhtimise eesmärk on tagada igal ajahetkel elektrisüsteemi ohutu ja töökindel toimimine. Ülekandevõrku juhivad igal ajahetkel kolm dispetšerit, kelle tööülesanneteks on korrigeerida reaalajas tekkivad kõrvalekaldeid bilansiplaanist, tagada põhivõrgu liitumispunktides kvaliteetne elektrivarustus, juhtida ohutult elektripaigaldiste ja seadmete hooldusesse/remonti, töösse ja reservi viimist, tuvastada häiringuid või avariitalitlust ning korraldada selle likvideerimine ehk lülitamiste juhtimine, koostöö klientide ja naaberriikide süsteemihalduritega, turuosaliste teavitamine piiriüleste ülekandevõimsuste muutusest. [8] Jaotusvõrgu reaalajas juhtimist *Elektrilevi* võrgus korraldab tavaolukorras päevasel ajal 12 dispetšerit, öisel ajal ning nädalavahetustel 5 dispetšerit, kelle ülesanneteks on võrguseisukorra seire, normaaltalitluse-, avarii- ja remondirežiimide jälgimine ja vastavuse tagamine, keskpinge võrgu pingerežiimide juhtimine, lülitamistoimingute juhtimine sealhulgas jaotusvõrgu rikete lokaliseerimise, kõrvaldamise ja elektrivarustuse taastamise juhtimine ja korraldamine [9]. Väiksemates jaotusvõrkudes on tavaliselt üks kuni mõni dispetšer, kes tagab oma ettevõttele kuuluvas jaotusvõrgus tarbijatele kvaliteedinõuetele vastava elektrikvaliteedi ja teostab võrgu seiret ning juhtimist.

Nii põhi- kui jaotusvõrkude reaalajas juhtimiseks ja seireks on dispetšerite põhiliseks töövahendiks SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*), mis on keskne juhtimissüsteem, koondades võrguelementide olekuparameetreid ja võimaldades kaugjuhtimist. Põhivõrgu ettevõtja Elering AS omandis olevad alajaamad ja sealsed seadmed on kõik kaugjuhtimise võimekusega ning nende asendi-, seisundi- ja mõõteandmed edastatakse SCADA süsteemi. Samuti jõuavad nimetatud juhtimissüsteemi ka põhivõrgu partnerite ja klientide andmed, mis on olulised talitluse juhtimiseks. [7] [8] Jaotusvõrgus on võrguelementide hulk kümnetes kordades suurem ning varustuskindluse (elektrisüsteemi toimepidevuse) seisukohast on üksikute elementide tähtsus vähemoluline kui põhivõrgu puhul. Seetõttu on ka telemaatikaseadmetega varustatud elementide osakaal väiksem, sest kaugjuhtimise võimekuse loomine nõuab lisainvesteeringuid ning suure osa jaotusvõrgu liidestamine SCADA süsteemiga ei ole seni olnud majanduslikult otstarbekas. Elektrilevi võrgus on keskse juhtimissüsteemiga sidestatud alajaamade osakaal alla 15%, kaugjuhtimise

võimekusega varustatakse võrguteenuse toimepidevuse aspektist tähtsamad elemendid, milleks on suuremad jaotusvõrgu alajaamad (piirkonnaalajaamad, fiiderpunktid) seal paiknevate seadmetega ning pikki keskpinge õhuline sektsioneerivad, haruliinide hargnemisel või normaallahutuspunktides olevad kaugjuhitavad võimsus- või koormuslahklülidid.

SCADA koosneb lihtsustatult kirjeldades koht-, andmeedastus- ehk side- ja kesksüsteemist. Kohtsüsteemi moodustab füüsiliselt ühes asukohas, näiteks alajaamas või lahutuspunktis, paiknev seadmete kogum. Kohtsüsteem koondab mõõteseadmetest (pinge- ja voolutrafod, andurid) tulevad mõõteandmed, teisaldab need digitaalsele kujule, salvestab ning edastab vastavalt seadistusele. Kohtsüsteemi üks tähtsaim element on RTU (*Remote Terminal Unit*) ehk kaugterminal, mis vahendab juhtimiskäskke võrguelementidele ning kogub kokku edastatavad andmed. Andmeedastus- ehk sidesüsteem transpordib andmeid kesksüsteemi ja kohtsüsteemide vahel kasutades mõnd sidekanalit. Elektrivõrkude puhul on kohtsüsteemid üksteisest füüsiliselt kohati väga suurte vahemaade taga ning ajalooliselt on kasutusel erinevad sidekanalid. Tänapäeval eelistatuim on fiiberoptiline kaabel, mis on suure häiringukindluse ning läbilaskevõimega. Kesksüsteem kogub kohtsüsteemide edastatud informatsiooni kokku, salvestab soovitud ajaks ning töötleb saadud andmeid sobivale kujule kasutajaliidese jaoks (alarmid, signaalid, graafikud, diagrammid), mille abil saab dispetšer operatiivselt juhtida ja võrguseiret teostada [10]. Kesksüsteemi sideserverisse koguneb kohtsüsteemide edastatud teave, mis suunatakse SCADA süsteemi serverisse töötlemiseks, mille tulemused kuvatakse dispetšeri SCADA ekraanidele. Lülitustoimingute ja muude juhtimiskorralduste puhul käib käsuahel teistpidi – kasutajaliideseest tehtud toiming liigub SCADA süsteemiserveri, sealt sideserveri ning seejärel kohtsüsteemi RTU edastab toimingut valitud seadmele.



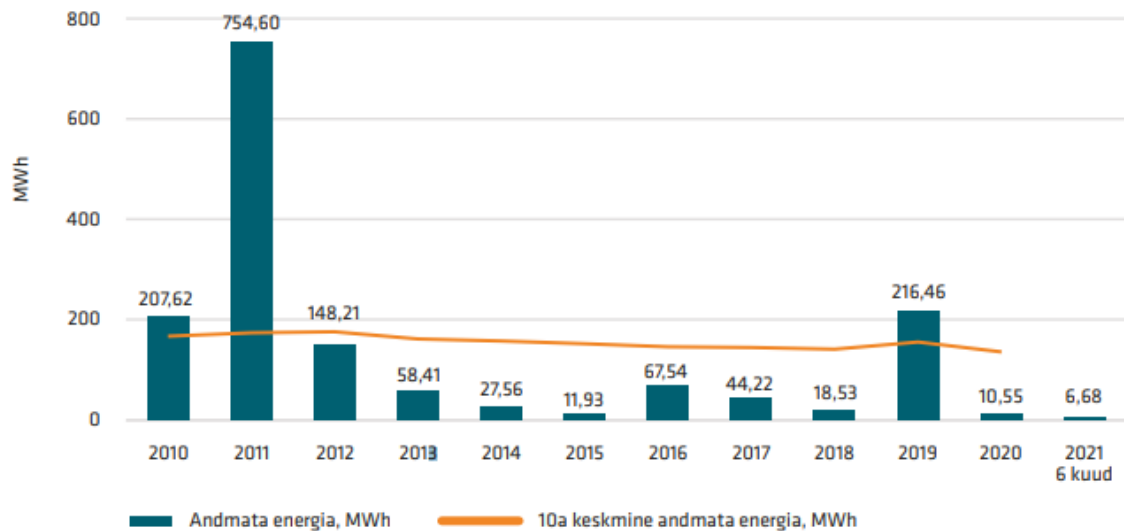
Joonis 1.3 – SCADA põhimõtteskeem [11]

Lisaks SCADA juhtimissüsteemile on põhi- ja jaotusvõrguettevõtetal erinevad andmehaldus-, skeemi- ja muud IT-rakendused, mida kasutatakse võrgu juhtimiseks ja mille abil tagatakse süsteemi toimepidevus ja talitus. Need on ettevõtete lõikes erinevate ülesehituste ja eesmärkidega ning nendesse käesoleva lõputöö raames ei süveneta.

1.2 Võrgu kvaliteedinäitajad

Elektrivõrgu kvaliteedinäitajaid saab liigitada kaheks: edastatava elektrienergia kvaliteet ning varustuskindluse näitajad (andmata jäänud energia, ühe tarbimiskoha kohta arvutatavad katkestuste suhtarvud). Elektrivarustuse kvaliteedinõuete aluseks on elektrituruseadus, millest tulenevalt kinnitab perioodiliselt kvaliteedinõuded majandus- ja kommunikatsiooniminister. [3] Käesolevas peatükis keskendutakse peamiselt jaotusvõrgu varustuskindluse näitajatele, mis on otseselt seotud antud magistr töö temaatika ning eesmärgiga, ja põhivõrgu kvaliteedinäitajaid käsitletakse vähem, nendest antakse ülevaade. Jaotusvõrgu kvaliteedinäitajaid käsitletakse eelkõige *Elektrilevi OÜ* omandis oleva võrgu ja mõõdikute näitel, sest käesoleva kirjatöö praktiline osa tehakse samuti *Elektrilevi OÜ* võrgus ning võttes arvesse asjaolu, et nimetatud ettevõtte jaotusvõrk katab üle 95% Eestist, annab selline käsitusviis piisavalt hea ülevaate.

Põhivõrk on üldiselt töökindlam ja paremate kvaliteedinäitajatega kui jaotusvõrk. Põhjusteks asjaolud, et põhivõrgu seadmete arv on oluliselt väiksem ning iga seade omab varustuskindluse seisukohast suuremat väärtust, sest põhivõrgu katkestuste korral on üldjuhul katkestatud ka jaotusvõrgu kliendid. Ühtlasi on kasutatavad pingeastmed kõrgemad, mille tulemusel on isolatsioonivahemikud ja kaitsetsoonid suuremad, mistõttu mõjutab ümbritsev looduskeskkond seadmeid vähem. Samuti on reeglina ülekandevõrgu konfiguratsioon ring- või silmusvõrk. Eelnevalt mainitud konfiguratsioonid ja asjaolu, et põhivõrk on suures osas automatiseeritud ning varustatud releekaitsega, tagavad süsteemi toimepidevuse ka elementide väljalülitumisel rikete tagajärjel. Seda iseloomustab ettevõtte poolt avaldatud rikete ja katkestuste statistika - 2021. aastal toimus Eleringi ülekandevõrgus 107 väljalülitumist põhjustavat riket, millest 12 puhul tekkis reaalne katkestus ehk tarbija ei saanud liitumispunktis tarbida elektrienergiat [12]. Levinuim põhivõrgu varustuskindluse kvaliteedinäitaja on andmata jäänud elektrienergia, mida arvutatakse katkestuse kestvuse ja perioodi keskmise tarbimise järgi. Viimase 10 aasta keskmine andmata jäänud energia kogud aastas on 61,7 MWh [12]. Möödunud perioodi (2010 – 2020, 2021 pool aastat) andmata jäänud elektrienergia kogustest aastate lõikes annab ülevaate joonis 1.4.



Joonis 1.4 - Elering AS andmata energia 2010-2020 [7]

Jaotusvõrgu tarbijate elektrikvaliteedinõuded on sätestatud määruses „Võrguteenuste kvaliteedinõuded ja võrgutasude vähendamise tingimused kvaliteedinõuete rikkumise korral“, mille kohaselt on soovituslik tagada standardis EVS-EN 50160 kirjeldatud tunnussuurused normaaltalitusel [13]. Jaotusvõrkude varustuskindlus on madalam kui põhivõrgul tingituna suurest hõlmatavast maa-alast, liinide kogupikkusest, võrgu konfiguratsioonist (radiaalvõrk, avatud silmusvõrk) ning olulisusest süsteemi toimepidevuse seisukohast. Samuti on jaotamisel kasutatavad pingeastmed madalamad, mis on majanduslikult otstarbekam väiksemate energiakoguste ülekandmiseks lühemate vahemaade taha, kuid tähendab õhuliinidel madalamaid maste ja rippeid ning väiksemaid isolatsioonivahemike, mis muudab võrgu ilmastikuoludele haavatavamaks. Jaotusvõrkude varustuskindlusenäitajatest levinumad on SAIDI, SAIFI ning CAIDI ehk katkestuse keskmine kestus tarbimiskoha kohta aastas, katkestuste keskmine sagedus tarbimiskoha kohta aastas ning katkestuse keskmine kestus võrguettevõtja kohta aastas, mille avaldised (1.1-1.3) on esitatud alljärgnevalt [13]:

$$SAIDI = \frac{\sum_{k=1}^m d_k \cdot n_k}{N} \quad (1.1)$$

$$SAIFI = \frac{\sum_{k=1}^m n_k}{N} \quad (1.2)$$

$$CAIDI = \frac{\sum_{k=1}^m d_k \cdot n_k}{\sum_{k=1}^m n_k} \quad (1.3)$$

kus n_k on katkestatud tarbimiskohtade arv; m tarbimiskoha katkestuste arv aastas; N tarbimiskohtade koguarv; d_k tarbimiskoha katkestus minutites [13].

Määruses sätestatud võrguteenuse kvaliteedinõuded, mida vaadeldakse iga tarbija suhtes eraldi, seavad rikkelistele ja plaanilistele katkestustele piirajad, mida ületades peab võrguettevõtja maksma tarbijale kompensatsiooni, mille suurused on samuti määruses kehtestatud. Sätestatud on nii ühekordse katkestuse kui aastase summaarse katkestuste kestvuse maksimaalne lubatud väärtus. Jaotusvõrgu tarbijatel eristatakse võrgu varustuskindluse tasemeid olenevalt 110 kV ühenduste arvust. Samuti on eristatud suve- ja talveperioodil lubatud ühekordsed plaanilise ja rikkelise katkestuse kestvused, sest tulenevalt Eesti geograafilisest laiuskraadist ja kliimatilistest tingimustest ning nende erinevusest on talvisel perioodil rikete lokaliseerimine ja likvideerimine oluliselt raskendatud (nt paks lumi liinikoridorides, ulatuslik jääde, külmunud pinnas kaabelliinide ümber, ligipääs alajaamade ja võrguelementide juurde raskendatud).

Tabel 1.1 - Võrguteenuse kvaliteedinõuded [13]

	Suveperiood (01.04-30.09)	Talveperiood (01.10-31.03)
Põhivõrk		
Lubatud rikkeline katkestus	2 h / 120 h * / 72 h sündmuse lõppemisest **	
Lubatud rikkeline katkestus aastas kokku	150 h	
Jaotusvõrk		
Lubatud rikkeline katkestus	12 h / 72 h sündmuse lõppemisest **	16 h / 72 h sündmuse lõppemisest **
Lubatud plaaniline katkestus	10 h	8 h
Lubatud rikkeline katkestus aastas kokku	50 h / 100 h *	
Lubatud plaaniline katkestus aastas kokku	64 h	

* - tarbimiskoha toide on tagatud ühe 110 kV trafo või liini kaudu

** - elektrivõrgu eriolukorra väljakuulutamisel

Elektrituruseadus sätestab kohustuse kõikidele võrguettevõtjatele iga-aastaselt avaldada oma kvaliteedinõuete sh varustuskindluse näitajad ning Konkurentsiamet kontrollib nende täitmist, vajadusel teostab järelevamenetlusi ja aruandeid. Nimetatud andmed on avalikustatud ja vabalt kättesaadavad Konkurentsiameti veebilehel. Järgnevalt esitatud tabelis (tabel 1.2) on koondatud võrguettevõtjate poolt perioodil 2016-2020 esitatud kvaliteedinäitajad, kus eraldi on välja toodud *Elektrilevi OÜ* osa:

Tabel 1.2 - Võrguettevõtjate kvaliteedinäitajad [14]

Aasta	Elektrilevi OÜ	Jaotusvõrgud kokku	Põhivõrk (Elering AS)
Tarbimiskohtade koguarv (tk)			
2016	664 919	733 606	233
2017	651 355	720 728	240
2018	654 034	724 705	240
2019	656 917	726 865	244
2020	668 022	738 130	247
SAIFI (tk)			
2016	1,627	1,488	0,107
2017	1,363	1,261	0,138
2018	1,471	1,369	0,092
2019	1,751	1,676	0,139
2020	1,384	1,276	0,081
SAIDI (minut)			
2016	163,154	148,521	6,030
2017	105,000	96,383	3,771
2018	141,800	129,767	7,271
2019	268,916	249,297	17,221
2020	173,000	157,946	1,510
CAIDI (minut)			
2016	100,274	99,838	56,200
2017	77,024	76,420	27,424
2018	96,377	94,775	79,318
2019	153,567	148,710	123,588
2020	125,000	123,778	18,650

Jaotusvõrgu kvaliteedinäitajaid mõjutab kõige rohkem ilmastikutingimused, eriti tormiste ilmade arv, mil tuulekiirus ületab projekteerimisnorme (25 m/s mandril, 30 m/s rannikualadel ja saartel).

Tabel 1.3 - Elektrilevi OÜ rikete statistika [14]

	Vääramatust jõust (nt loodus-õnnetus) põhjustatud rikkeliste katkestuste arv VKN § 4 (3)	Riketest põhjustatud katkestuste arv VKN § 4 (4;5) (va VKN§ 4 (3))	Kokku rikete arv	Tarbimiskohtade arv, kus aastane summaarne riketest põhjustatud katkestuste kestus ületas normi VKN § 4 (6, 61)
2016	96 302	985 570	1 081 872	115
2017	0	887 933	887 933	173
2018	86 264	876 018	962 282	645
2019	105 000	1 045 346	1 150 346	5 279
2020	197 168	727 374	924 542	1 207

2017. aastal, mil *Elektrilevi OÜ* ei kuulutanud elektrivõrgus kordagi välja eriolukorda (esimene veerg), on rikete arv vaadeldava perioodi väikseim ning ka eelnevalt esitatud kvaliteedinäitajad parimad. Kliimamuutuseid ja selle mõjusid analüüsid ennustab Euroopa Keskkonnaagnetuur oma prognoosides ja simulatsioonides, et talviste tormide arv on muutustes kogu Euroopas ning valdav enamus uuringutest nõustub, et tõsiste talvetormide ja võib-olla ka tõsiste sügistormide oht suureneb Atlandi ookeani põhjaosas ning Põhja-, Loode- ja Kesk-Euroopa aladel 21. sajandi jooksul [15]. See tähendab võrguettevõtjatele suure tõenäosusega ilmastikust tingitud rikkisündmuste ja erakorraliste olukordade sagenemist. Seega võrguteenuse varustuskindluse kvaliteedinäitajate parendamiseks on vaja investeerida ilmastikukindlamasse võrku, mis vähendaks rikete tekkimise tõenäosust tormide ajal, või tõsta riketele reageerimise võimekust, vähendades katkestuste kestvust ja ulatust ning seeläbi varustuskindluse näitajaid.

1.3 Suundumused

Maailmas ja Euroopas jätkuv tugev majanduskasv suurendab riikide energiavajadust, üha enam suureneb elektroiintensiivsete teenuste tarbimine ja elektriliste seadmete kasutamine, suurenevad tipukoormused ja muutuvad tarbimisgraafikud. Samal ajal toimub üleminek vähese süsinikheitega majandusele ja jätkusuutlikumate energiaallikate kasutuselevõtt, milleks peamiselt on tuule- ja päikeseenergia. Pariisi kliimaleppega, millega on ühinenud ka Eesti, võetud kohustuste täitmiseks on suures muutuses elektriturg ja -sektor. Peamiseks sihiks on tõhusam elektrienergia kasutamine ja taastuvatest energiaallikatest toodetud elektrienergia osa kasv. See toob endaga vajaduse suunata investeeringuid varaklassidesse, mis võimaldaks kasutusele võtta lokaalsete taastuvenergia ressursile rajatud detsentraliseeritud tootmisvõimsused, elektritransporti, erinevaid energiasalvestuse tehnoloogiaid ja nende sidusust võrguga. Samuti on oluline suurendada riikidevahelisi ülekandevõimsusi ja jaotusvõrkude läbilaskevõimeid koos digitaliseeritud energiavoogude juhtimisplatvormidega, et võimaldada tarbijatel osaleda aktiivselt turul. Traditsiooniliselt välja kujunenud elektrisüsteemid, kus elektrienergia liikumine toimub „ülevalt alla“ ehk suuremahulistest põhivõrguga ühendatud elektrijaamadest jaotusvõrkudesse ja seeläbi madalamatel pingeastmetel tarbijateni, on muutunud juba tänaseks ning on pidevas arengus. Jaotusvõrgud omandavad tänu detsentraliseeritud elektrienergia tootmise pidevale kasvule elektrisüsteemi funktsioneerimisel ja varustuskindluse tagamisel üha olulisemat rolli, juba praegusel hetkel ajas on toimumas elektritootmise võimsuste märkimisväärne liikumine kesk- ja madalpingetele. Rollimuutuse tulemusel peavad jaotusvõrguettevõtjad olema suutelised liitma enda võrku kiiresti lisanduvaid hajutatud

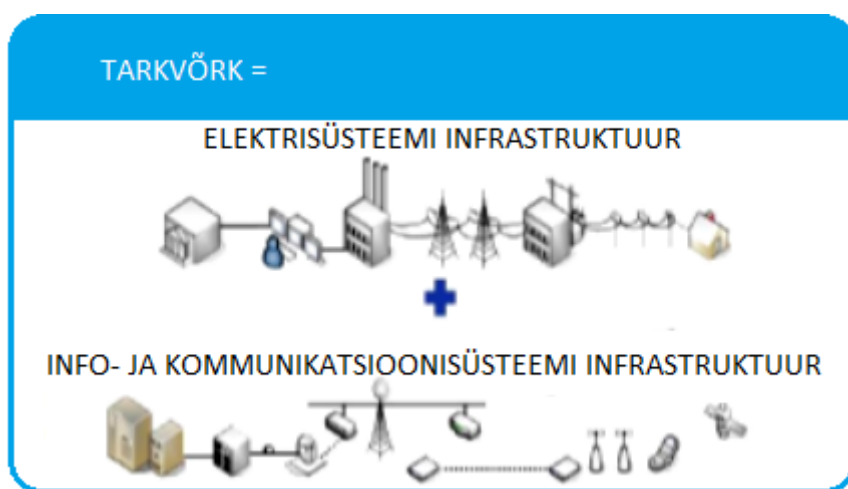
tootmisüksusi ning võtma kasutusele turumudelid võimaldamaks jaotusvõrgu klientidel osaleda aktiivsemalt ja efektiivsemalt elektriturul, saades ise neutraalseks turu korraldajaks. Elektrituru arenemise, tarbimisharjumuste muutumise ning pidevalt suureneva elektrienergia nõudluse taustal on oluline, et jaotusvõrguettevõtjad muutuksid aktiivsemateks võrguoperaatoriteks, mille osaks on tõhusam ja majanduslikult tasuvam opereerimine. Samal ajal on pidevalt kasvamas ka tarbijate ootused ja nõudmised võrguteenuse kvaliteedile, toimepidevusele ning katkestuste kestvusele. [16] [17] Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv elektrienergia varustuskindluse ja infrastruktuuriinvesteeringute kohta sõnastab samuti selgelt, et põhi- ja jaotusvõrguettevõtjatelt tuleb nõuda volukatkestuste sageduse ja kestuse osas kõrgetasemelist teenuse pakkumist lõpptarbijale ehk rikkelite katkestuste sagedust ja kestvust tuleb alandada. [18] Vabariigi Valitsuse poolt 2013. aastal heaks kiidetud otsusest tulenevalt koostatud ja 2017. aastal valminud Eesti energiamajanduse arengukava aastani 2030 (ENMAK 2030) on sõnastatud energiamajanduse eesmärkide täitmist iseloomustavad tulemused, milleks üheks on jaotusvõrgu katkestuste keskmine kogukestus minutites tarbimiskoha kohta aastas (ehk SAIDI) ei ületa 90 minutit, mis saavutatakse ilma täiendava koormuseta tarbijatariifile [19].

Sellest tulenevalt on jaotusvõrguettevõtjad panustamas kvaliteedinäitajate parendamiseks. *Elektrilevi OÜ* on tellinud erinevatelt teadusasutustelt mitmesuguseid uuringuid ja analüüse (näiteks varaklasside investeeringute, rikke põhjuste ja varahalduse standardi loomiseks) eesmärgiga parendada varustuskindluse näitajaid, tuvastada nõrkuseid ning saavutada eelnevalt kirjeldatud ENMAK-s seatud ambitsioonikad eesmärgid. Uuringutes läbivad meetodid jaotusvõrgu varustuskindluse parendamiseks on paljasjuhtmeliste õhuliinide asendamine kaetud juhtmete ning õhukaablitega; demograafiliste muutuste tagajärjel ebavajalikuks (tarbimine puudub) muutuva võrgu demonteerimine; keskpinge võrgu viimine kaabliitorudesse ning automatiseerimine. Nimetatud meetodid nõuvad suuri investeeringuid ning eelduslikult maksab SAIDI 90 eesmärgi saavutamise aastaks 2030 ligikaudu 287 miljonit eurot [20] [21]. Kui teised nimetatud meetodid parendavad varustuskindlust töökindluse kasvu, rikete tõenäosuse vähendamise ja ennetamise teel, siis võrgu automatiseerimine ise ei vähenda rikke esinemise tõenäosust, vaid selle mõju vähendades rikke kestvust ja ulatust.

1.4 Tarkvõrk, isetaastuv võrk

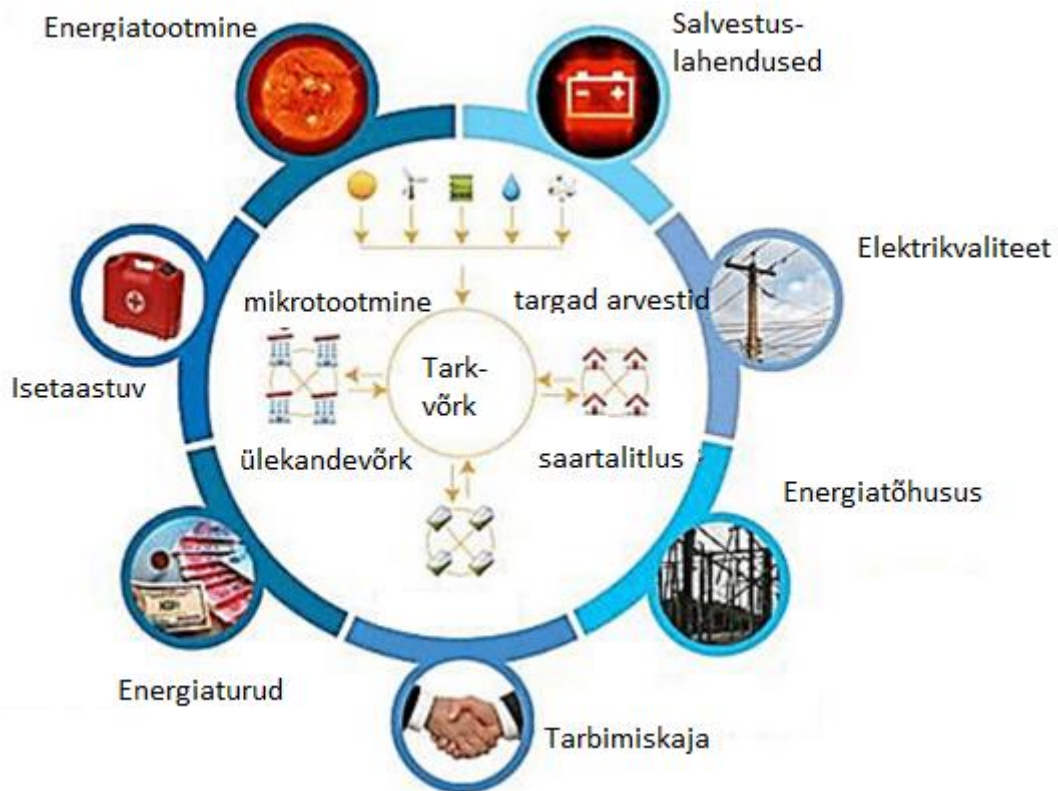
Ületamiseks süsinikuneutraalsele ja detsentraliseeritud energiatootmisele üleminekul esile kerkinud probleeme nagu katkendlik ja heitliku iseloomuga tootmine ning kasvavad energiahinnad, on üha tähtsamat tähendust omandamas tarkvõrk ja selle

kasutuselevõtt. [22] Tarkvõrk on moodsat tehnoloogiat kasutav elektrivõrk, mis ühendab elektritootjad, -müüjad, -ülekandevõrke, -jaotusvõrke, -tarbijad ja seadmetearendajad ühisesse andme- ja elektrisüsteemi ning tagab reaalajas kahe-suunalise andmevahetuse ning energiavoo. [23] Jälgides regulaarselt energiavoogu, tarbijate nõudlust, pinget, sagedust ja võimsustegurit ning kontrollides erinevate energialiikide kasutamist, sealhulgas taastuvate energiaallikate, ning kasutades energiatõhusaid meetodikaid ja tehnoloogiaid, võimaldab see luua töökindlama, tugevama ja turvalisema elektriinfrastruktuuri. Lihtsustatult sõnastades koosneb tarkvõrk info- ja kommunikatsiooni tehnoloogia ning ülekande- ja jaotusvõrgu kombinatsioonist [22], kus toimub reaalajas andmevahetus nii seadmete ja võrgujuhtijate kui erinevate turuosaliste vahel.



Joonis 1.5 – Tarkvõrk [22]

Tarkvõrgu arengut ja kasutuselevõttu eestvedavateks võtmeteguriteks on elektrienergia nõudluse kasv, töökindluse parendamise vajadus, tehnoloogiline areng, elektrivõrkude areng, keskkonnaprobleemid ja tõhususe vajadus. Tarkvõrgu peamine eesmärk on võimaldada hajustootmise, salvestuslahenduste (sh elektriautod) ja tarbimiskaja integreerimist elektrituru toimimisse. Rahvusliku Energiatehnoloogia Labori (*National Energy Technology Laboratory*) Modernse võrgu projektis on sõnastatud tarkvõrgu omadusi ja võimekusi järgnevate märksõnadega: isetaastuv pärast elektrisüsteemi häireid (avastab algavaid probleeme; minimeerib katkestuse mõju, vähendades kestvust ja ulatust); tarbijate aktiivse osalemise võimaldamine tarbimiskajas; vastupidavus füüsilistele ja küberrünnakutele; 21. sajandi kvaliteedinõudmistele vastava elektrienergia pakkumine; kõiki tootmis- ja salvestusvõimalusi mahutav; uute toodete, teenuste ja turgude kasutusele võtmise võimekus; varade optimeerimine ja energiatõhusus [24]. Võtme komponendid ülevaade on esitatud joonisel 1.6



Joonis 1.6 - Tarkvõrgu võtmekomponendid [22]

Ühe käsitluse järgi võib tarkvõrgu kontseptsiooni selle põhielementide järgi kirjeldada järgnevalt. Tarkvõrk koosneb [24]:

- Targast mõõtmisest, mis sisaldab kaasaegset mõõtesüsteemide infrastruktuuri, annab tarbijale reaalajas tarbimisinfot ja turu- ning hinnasignaale toetamaks tarbimiskaja funktsioone ja energiasüsteemile tõhusamat elektriseadmete kasutamist;
- Tarkadest fiidritest, mis sisaldavad uue põlvkonna andureid ja sensoreid parandamaks seisunditeavet alajaamadest väljuvatel võrguosadel ning võimaldamaks jaotusvarade (sh hajutatud elektritootmise) optimaalset juhtimist;
- Tarkadest alajaamadest, mis tähendab IED (*Intelligent Eletronic Device*) laiendatud kasutust alajaamade primaar- ja sekundaarseadmete optimaalseks juhtimiseks ja jälgimiseks;
- Tark elektrienergia ülekandmine, mis tähendab ülekandevõrgu tõhustamist ja täpsemat juhtimist kasutades uue põlvkonna faasormõõtmisi (*PMU – Phasor Measurement Units*) ja FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*) seadmeid.

- Tark tootmine, mis sisaldab uusi meetodeid tsentraalsete tootmisüksuste tõhusamaks ja ökonoomsemaks kasutamiseks hajustootmise taustal.

Tabel 1.4 - Tarkvõrgu omaduste ja elementide vastastikuse mõju maatriks [24]

Tarkvõrgu komponent	Tarkvõrgu põhielemendid				
	Mõõõtmine	Fiidrid	Alajaamad	Ülekandmine	Tootmine
Isetaastumine	Kaudne mõju	Otsene mõju	Otsene mõju	Otsene mõju	Kaudne mõju
Tarbija kaasamine	Otsene mõju	Puudub mõju	Puudub mõju	Puudub mõju	Puudub mõju
Ründekindlus	Negatiivne mõju	Negatiivne mõju	Negatiivne mõju	Negatiivne mõju	Negatiivne mõju
Kõrge elektrikvaliteet	Kaudne mõju	Otsene mõju	Kaudne mõju	Puudub mõju	Kaudne mõju
Võimaldab hajustootmist	Kaudne mõju	Kaudne mõju	Kaudne mõju	Puudub mõju	Otsene mõju
Võimaldab turge	Otsene mõju	Puudub mõju	Puudub mõju	Puudub mõju	Puudub mõju
Vara optimeerimine	Kaudne mõju	Otsene mõju	Otsene mõju	Puudub mõju	Otsene mõju

Isetaastuv võrk on üks tarkvõrgu tähtsamaid omadusi. Süsteemi keerukuse kasvades ja elementide lisandumisel on üha keerulisem vigade parandamine ning normaaltalituse taastamine, teisalt on detsentraliseeritud tootmise korral igal võrguosal süsteemi toimimisel olulisem roll ja katkestuste ulatus ning kestvus peab vähenema. Selle lahendusena nähakse isetaastumise võimekust. Isetaastumine [25] kohaselt tähendab, et võimaliku rikke või katkestuse korral toimub automaatselt veakoha eraldamine ning tarbijatele elektrivarustuse taastamine. See eeldab regulaarselt võimalikult lühikese ajaintervalliga või reaajas võrgutegevuse automaathindamist ja -jälgimist ning andmete kogumist, mille tulemusel oleks süsteem võimeline erinevate tõrgete korral tuvastama kiirelt veatalituse ning ilma inimese sekkumiseta olema võimeline vastu võtma otsuseid erinevate rikete tuvastamiseks, lokaliseerimiseks, eraldamiseks ja tarbijate ümbertoitmiseks lülitamistoimingute kaudu, laiendamata seejuures riket. Selline võimekus eeldab reaajas toimivad võimsaid arvutussüsteeme, mis jälgivad, mõõdavad ja lisavad prognostilist analüütikat otsuste ettevalmistamiseks. [26] Isetaastuv võrk (*self-healing grid*) on väga laiaulatuslik ning paljuhõlmav teema, mida võib käsitleda nii suure ühendenergiastüsteemi, põhivõrgu kui jaotusvõrgu väiksemate võrguosade rikete tasandil kui ka rikkeliste katkestuste ennetamise tasandil. Käesolevas magistritöös käsitletakse isetaastuvate võrkude kontekstis keskpinge jaotusvõrke ja sealsete rikkeliste katkestuste automaatset likvideerimist.

2 KIRJANDUSE ANALÜÜS JA KOKKUVÕTE

ISETAASTUVATE VÕRKUDE RAAMISTIKUS

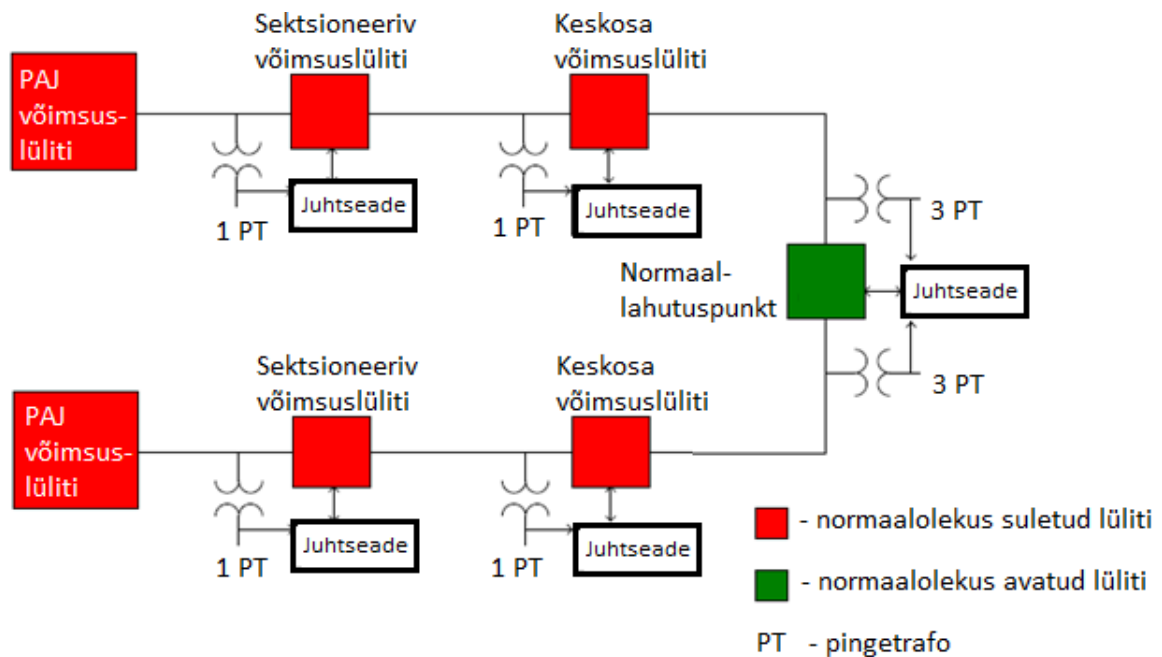
Isetaastumise funktsiooni iseloomustab süsteemi võime automaatselt eristada, kas süsteem töötab korralikult või mitte ning võime rakendada vajalikke meetmeid normaaltalitluse tagamiseks. Peamine eesmärk isetaastumisel [27] on rikke kiire ja tõhus eraldamine ning rikke laiendamise takistamine. Isetaastumine saab toimuda ainult teatud ulatuseni, sõltuvalt konkreetse rikke asukohast skeemis. Piiravateks teguriteks on üldjuhul viimane reserveeritud või kaugjuhitav element, millest edasi tuleb kaasata rikke kõrvaldamiseks inimressurssi. *FLISR (Fault Location, Isolation and Source Restoration)* ehk vea lokaliseerimise, eraldamise ning toite taastamise lahenduste (kirjanduses veel *FLIR, FDIR [D - detection]*) eesmärk on automaatselt tehtavate toimingute tulemusel pingestada väljalülitunud fiidri terved lõigud, taastades seeläbi elektrivarustuse võimalikult paljudele tarbijatele. Sektsioneerides lülitusseadmete alusel fiider osadeks ning liigitades neid rikkelisteks ja terveteks, siis hinnanguliselt võtab tüüpilise jaotusvõrgu keskpinge rikke korral elektrivarustuse taastamine tervetel võrguosade toitel olevatele klientidele 45-75 minutit ilma ja 1-5 minutit kasutades *FLISR* tehnoloogiaid [28]. Käesolevas peatükis käsitletakse erinevaid *FLISR* tehnoloogiaid ja kirjeldatakse kahe jaotusvõrguettevõtte kogemust isetaastuva võrgu kasutusele võtmisel.

2.1 Isetaastuva võrgu tehnoloogiad

22. rahvusvahelisel elektri jaotuse konverentsil¹ esitles tehnoloogiaettevõtte ABB isetaastuva võrgu täna eksisteerivaid tehnoloogiaid. Silmusjuhtimismooduli loogikaga (*Reclosers with Loop Control Module* ehk LCM) varustatud võimsuslülitid on lahendus, millel on taastavate lülituste jada sisseehitatud. Lülitamistoimingute otsused, mis lähtuvad kombineerides pingemõõtmiseid aegsätete ja alternatiivsete sättegruppidega, on võimelised teostama lihtsaid ning kuluefektiivselt *FLISR* lahendusi ilma sidetehnoloogiat või kauhjuhtimist kasutamata. Lahenduse põhimõtteid ja töötamist rikete korral on selgitatud näiteskeemi abil, mis on esitatud joonisel 2.1. Nimetatud näiteskeem koosneb alajaamast väljuvast kahest releekaitsega varustatud võimsuslülitist alt väljuvast fiidrist, millel on üks sektsioneeriv (*sectionalizing*) ja üks keskosa

¹ *CIREC (Conference and Exhibition on Electricity Distribution)* on 1971. aastal alguse saanud ning iga kahe aasta tagant erinevas linnas toimuv konverents, kus sektori osalised (võrguettevõtjad, tootjad, teadlased jmt) jagavad relevantsetel teemadel kogemusi ning esitlevad uusi tooteid [35].

(midpoint) võimsuslüliti ning fiidrite vahel on normaallahutuspunkt (võimsuslüliti, tie point recloser):

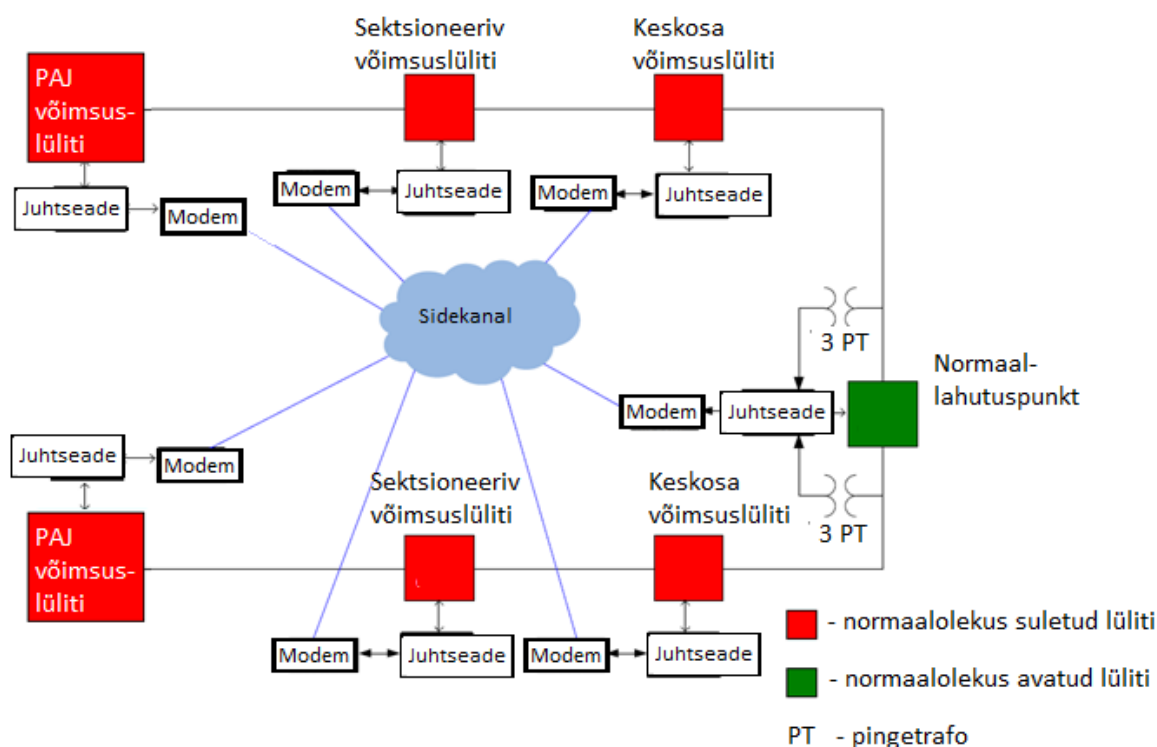


Joonis 2.1 – Silmusjuhtimismooduliga võrgu näite skeem [29]

Kõik skeemil kujutatud lülitusseadmed on varustatud pingetrafoodega, mille abil tuvastatakse pinge puudumine või olemasolu skeemil näidatud lõigus ning vajadusel lülitatakse alternatiivskeem. Kui lühis on alajaama ning esimese sektsioneeriva lüliti vahel, siis rakendub alajaamas võimsuslüliti ning fiider kuni normaallahutuspunktini jääb pingetuks. Normaalskeemi järgi suletud seisus lülitid lülitavad end seejärel teise releekaitse sättegrupi peale, mis on koordineeritud koos toimima lahetuspunktist teisele poole jäävate lülititega säilitamiseks selektiivsust. Samal ajal tuvastab normaallahutuspunkt, et üks pool on pingetu ning määratud aja möödudes lülitatakse võimsuslüliti sisse, mille tulemusel pingestatakse terve väljalülitunud fiider (sh veakoht) teiselt poolt. Uute sätete tulemusel rakendub seejärel veakohale lähim võimsuslüliti, milleks antud näidisrikke puhul on sektsioneeriv võimsuslüliti. Selliselt toimides on vigane võrguosa ühe proovipingestamise tulemusel kahelt poolt eraldatud ning ülejäänud võrgu tarbijatele elektrivarustus taastatud. Kui lühis on sektsioneeriva ning keskosa võimsuslüliti vahel, siis rakendub sektsioneeriv võimsuslüliti. Pingetuks jäänud keskosa võimsuslüliti võtab kasutusele uued releekaitsetsätteid. Normaallahutuspunkt saab tänu mõlemal pool asuvate pingetrafoodele aru, et üks pool on jäänud pingetuks ning teine pool on pingestatud, misjärel lülitab aegsätte möödudes võimsuslüliti end sisse, pingestades väljalülitunud võrguosa terves ulatuses uuesti. Seejärel rakendub keskosa võimsuslüliti tänu uutele sätetele ning vigane lõik on kahelt poolt eraldatud, teised osad pingestatud. Sarnaselt algoritmi järgi lahendatakse rike ükskõik millises

skeemil olevas kahe lüliti vahelises võrguosas. Sellise lahenduse puhul on taastamisaeg sõltuv aegsätetest, kuid üldiselt on tegemist põhimõttelt lihtsa ning toimiva lahendusega, mille kasutuselevõtuks eelduseks on levinud mikroprotsessorbaasil lülitusseadmed ning ei vaja võrguettevõtja poolt täiendavate sideinfrastruktuuri rajamise kulutusi. Vaadeldavas näidisevõrgus lahendab meetod rikke kõikjal sarnase lülitamiste jadaga ning üldiselt on see aktsepteeritav lahendus. Veakoha paiknemisel aga keskosa võimsuslüliti ning normaallahutuspunkti vahel toimub asjatu lühisele lülitamine, kui keskosa võimsuslüliti on rakendunud. [28] [29] Kirjeldatud lahenduse puudus on tõenäoliselt väga keerukas alternatiivsete releekaitsetsätete arvutamine. Olenevalt fiidrite pikkusest võib terve väljalülitunud fiidri pingestamisel normaallahutuspunktist ja veakoha paiknemisel pingetu fiidri algsuses, võib lühisvool olla väga väike ning releekaitse toimimine ja selektiivsuse tagamine keerukas ülesanne. Samuti võib rikkalise lõigu pingestamine endaga kaasa tuua rikke laiendamise. Teadusartiklis ei ole kirjeldatud, kas sellise lahenduse kasutusele võtmise eelduseks on taasilülitusautomaatika (TLA) mitte kasutamine. Kui TLA ei ole töös, siis lahendus võib mööduvate lühiste korral asjatult normaalskeemi muuta; kui TLA on töös, siis selle lahenduse korral suureneb lühisele lülitamiste arv, mis kurnab võimsuslülitite ressursi, vähendab eluiga ja suurendab hooldusvajadust. Samuti tekitatakse tarbijatele voolukõikumisi, mis võib rikkuda tarbijate seadmeid. Sarnase tööpõhimõttega lahendust kasutatakse täna Elektrilevi jaotusvõrgus reservilülitusautomaatika näol, kus näiteks alajaamas ühe sektsiooni pingetuks jäämisel lülitab automaatika normaalskeemi järgi toitava liini lüliti välja ning sektsioonidevahelise või normaallahutuspunkti võimsuslüliti sisse.

Teine käsitletav isetaastuva võrgu tehnoloogia põhineb võrguelementide omavahelisel (*peer to peer*) andmevahetusel. Lahenduse eelduseks on, et lülitusseadmete juhtkontrollerid võimaldaks kasutada IEC 61850 standardi, mis annab võimaluse seadmete omavaheliseks kommunikatsiooniks kasutades GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Event*) andmevahetuse põhimõtteid. [28] GOOSE on üks kahest IEC 61850 poolt määratletud kasutatavast andmevahetuse grupist. Oma töökindla ja kiire andmevahetuse tõttu kasutatakse seda erinevate aegkriitiliste toimingute jaoks. Sidekanaliks on võib olla juhtmeta või juhtmega kohtvõrk, vajalik on saavutada kontrollerseadmete omavaheline ühendus üle õhu või side- või optilisekaabliga [30]. Lahenduse töötamist kirjeldatakse näidisevõrgu rikete põhjal, mille skeem on kujutatud joonisel 2.2. Näidisskeemil on seadmed omavahel ühendatud traadita ühendusega, mida on soodsam tööle panna, kuid mis ei ole nii töö- ja häiringukindel ega sama kiire kui juhtmega ühendused:



Joonis 2.2 – Elementide omavahelisel andmevahetusel toimiva lahenduse skeem [29]

Näidisivõrk koosneb samast arvust ja sarnaste omadustega lülitusseadmetest nagu eelnevalt kirjeldatud lahenduse juures. Erinevuseks on kommutatsiooniseadmete kontrollrite omavaheline sidestus ning selle saavutamiseks vajalikud seadmed. Isetaastuva lahenduse tegevused rikke tekkimisel alajaama ja seksioneeriva võimsuslüliti vahel, kui proovipingestamine (TLA) on olnud ebaedukas ning võimsuslüliti on lukustatud:

- alajaama võimsuslüliti edastab GOOSE sõnumi rakendumise ja lukustamise kohta;
- seksioneerivale võimsuslülitele on edastatud GOOSE sõnum sisendiks ja võimsuslüliti avaneb pärast sätestatud aja (t_1) möödumist ning saadab GOOSE sõnumi, et on rakendunud (avatud olekus);
- alajaama võimsuslüliti rakendumise ja lukustamise ning seksioneeriva võimsuslüliti avatud asendi kohta edastatud GOOSE sõnumite peale lülitab keskosa võimsuslüliti end sätestatud aja (t_2) möödumisel ümber teise sättegrupi peale, et säiliks selektiivsus teistsuguse toiteskeemi korral;
- alajaama võimsuslüliti rakendumise ja lukustamise ning seksioneeriva võimsuslüliti avatud asendi kohta edastatud GOOSE sõnumid on sisendiks normaallahutuspunkti võimsuslülitele, mis nende signaalide vastuvõtmisel lülitab end sisse sätestatud aja (t_3) möödumisel. [28] [29]

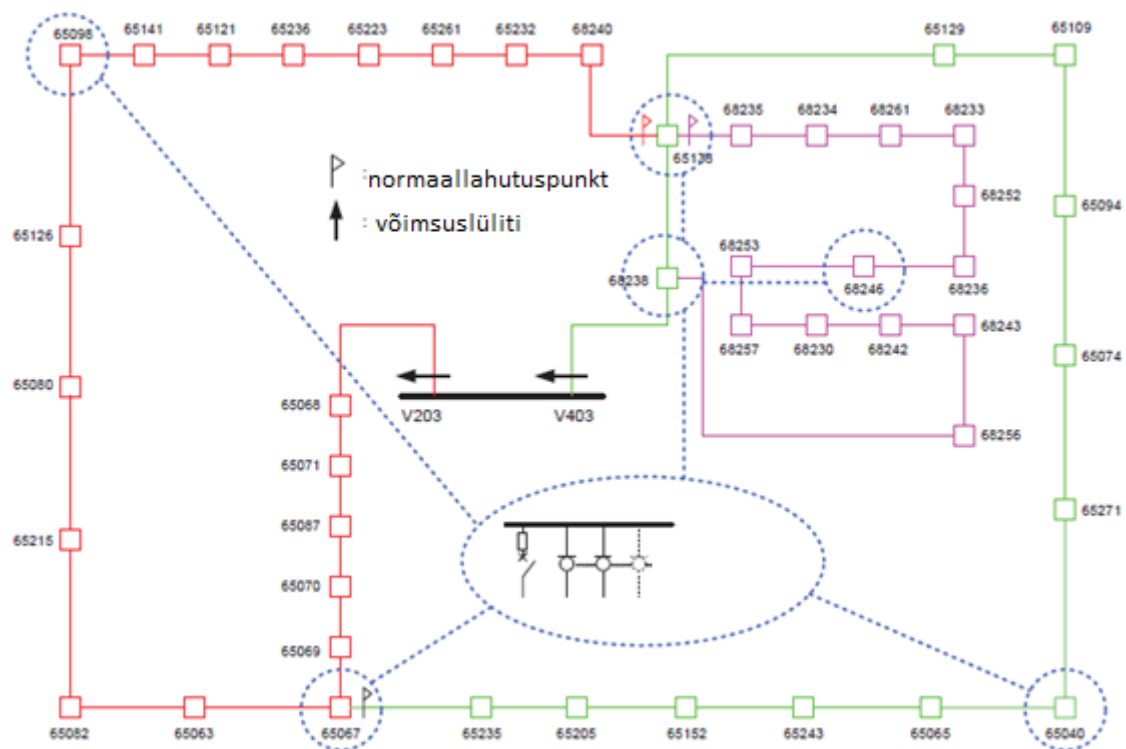
Tegevused eraldavad veakoha kiiresti ülejäänud võrgust ning taastavad tervete võrguosade tarbijatele elektrivarustuse. Võrreldes eelnevalt kirjeldatud lahendusega, ei teostata sellisel juhul liigseid lühiseid lülitamisi. Samuti on eeliseks lahenduse kiirus, mis sõltub ise määratud aegsätetest (t_1 , t_2 , t_3) ning puudub latentsus sidestusega SCADA/DMS süsteemidega. Lisaks võimaldab IEC 61850 protokoll ja GOOSE sõnumite kasutamine lisada FLISR skeemile juurde erinevate tootjate seadmeid, eelduseks nimetatud protokollide kasutamise võimekus. [28] [29] Viimane nimetatud omadus võimaldab võrku lisada näiteks erinevaid rikkeindikaatoreid, mis saavad vea tuvastamisel ja GOOSE sõnumite saatmisel olla sisendiks järgnevatele tegevustele, näiteks võimsuslülitite vahelises võrguosas indikatsioonist tulenevalt kaugjuhitavaid ilma releekaitseta lahk- või koormuslahklüliteid juhtida.

SCADA põhised FLISR lahendused võimaldavad ülevaatlikumalt, kaalutletumalt ja suuremat võrgupilti nähes rakendada isetaastumise võimekust ka keerukamatel võrkudel. Kui varasemalt kirjeldatud kaks lahendust on lokaalsed, töötavad eelnevalt seadistatud algoritmidel või paika pandud lokaalsel lülitusloogikal, siis SCADA süsteemi põhised rakendused on laiahaardelisem viis isetaastuvate lahenduste rakendamiseks. Isetaastuvate lülituste jada ja edastatavad signaalid võivad olla samad, mis esimese kahe näite puhul, kuid signaalid edastatakse kesksesse SCADA juhtimissüsteemi ning sealt antakse ka konkreetsele seadmele juhtimiskäsud. Omades võrgust põhjalikumalt ülevaadet, võimaldab see luua lahendusi, mis teevad otsuseid põhinedes täiendavatel teguritel, nagu fiidrite koormused, ülekoormustingimused ja nõudlusele reageerimine. Lisaks alajaama piirkonnas, kus rike toimus, teostatud FLISR lülitamistega, saab isetaastumise viia järgmisele tasemele, et vajadusel parandada piirkonna toite kvaliteeti ning vajadusel reaktiivvõimsusi juhtida. SCADA süsteemide eelised on kiirem fiidritasemel sündmustele reageerimine ning paindlikkus tulevase hajutatud tootmise võrku juurutamiseks, nagu energiasalvestid, elektrisõidukid, päikesepaneelid ja juba mainitud reaktiivvõimsuse juhtimine. Selliste lahenduste väljatöötamisel on võimalik seda ka suuremas mahus kasutusele võtta, mis võimaldab isetaastumise funktsionaalsust rakendada suuremas mahus kui ainult fiidri või konkreetse piirkonna põhiselt, kus eelnevalt kirjeldatud lahenduste juures tuleb manuaalselt seadistada. SCADA FLISR lahendus ei nõua kommutatsiooniseadmete juhtelementidelt omavaheliste koostalitlusvõimeliste sideprotokollide kasutamist, kuni säilib SCADA süsteemiga liidestatus. Nimetatud asjaolu on suureks eeliseks võrguettevõtjate jaoks, kes on oma võrku järk-järgult moderniseerimas. Võrguettevõtjate juhitava võrgu keerukus, eelarved ja planeerimise põhimõtted määravad parima lahenduse isetaastuva võrgu rakendamiseks ning kvaliteedinäitajate parendamiseks. SCADA põhise FLISR süsteemi juurutamine võimaldab kasutusele võtta erineva põlvkonna *IED-sid*

(*Intelligent Electronic Device*), kuid suur väljakutse on rakenduse väljatöötamine, mis töötab usaldusväärselt ja ohutult kõigis võimalikes süsteemioludes [28] Samuti sõltub see väga palju võrguettevõtja kasutatavast konkreetsest SCADA süsteemist, selle tootjast ning võimekusest. Järgnevates peatükkides antakse ülevaade ja tutvustatakse kesksel juhitud süsteemidel põhinevaid kasutusel olevaid FLISR lahendusi.

2.2 Hollandi 20 kV isetaastuva jaotusvõrgu tutvustus

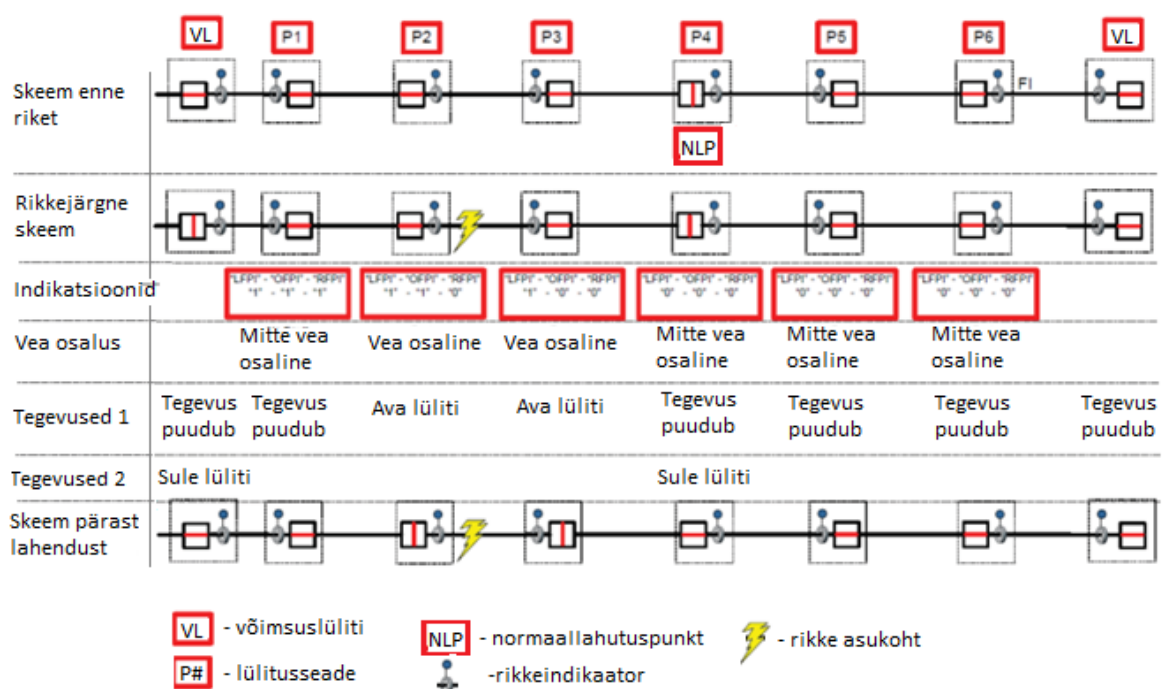
Hollandis tegutseva jaotusvõrguettevõtte *Stedin* viis läbi pilootprojekti testimaks isetaastuva võrgu lahendust, mis põhines kaugjuhitavate seadmete kesksel juhtimisel. Ettevõttele kuulub 22 000 KP/MP (kesk- ja madalpinge) alajaama [31], mistõttu on see suuruselt üsna sarnane Elektrilevi OÜ võrgumahuga (25 300 KP/MP alajaama) [5]. Isetaastuva võrgu piloodiks valiti Rotterdami lõunaosas paiknev võrguosa, mis koosneb kahest fiidrist, 45 KP/MP alajaamast, kolmest normaallahutuspunktist ning kuuest kaugjuhitavate lülititega alajaamast. Võrgu skeem on esitatud joonisel 2.3:



Joonis 2.3 - Hollandi isetaastuva võrgu skeem [31]

Kaugjuhitavate lülititega alajaamad on skeemil märgitud sinise ringiga. Valitud on kõigi normaallahutuspunktide alajaamad (3 tk) ning lisaks kolm alajaama, et need asuks kaabli pikkuste suhtes ühtlasel kaugusel. Kuus kaugjuhitavat alajaama on varustatud mootorajamiga lülitiga, kohaliku juhtploki (*Local Control Unit*), rikkeindikaatoriga,

pingeindikaatoriga, RTU-ga (*Remote Terminal Unit*) ja akuga. Isetaastuva võrgu algoritmi koostas ettevõtte SIEMENS, mida sisestati rakendamiseks kaugjuhitavale juhtplokkile. Algoritmi esimene samm on veatuvastus, milleks kasutati kombinatsiooni kaitserellee alarmist ja võimsuslüliti avatud olekust. See tähendab, et võimsuslüliti on rakendunud releekaitse toimel. Järgmise sammuna hakkab ülevaate saamiseks RTU koguma kohalike juhtplokkide edastatavaid andmeid, milleks on kaugjuhitavate lülitite olekuparameetrid ja rikkeindikaatorite signaalid. Kogutud andmete baasil saab teostada weakoha lokaliseerimise ning panna paika vajalikud lülitamised weakoha eraldamiseks ja tarbijatele elektrivarustuse taastamiseks, sõltuvalt kuhu poole weakoht rikkeindikaatori ja võimsuslüliti suhtes jäi [31]:



Joonis 2.4 – Lahenduse lülitusloogika kujunemine indikatsioonidest lähtuvalt [31]

Weakoha lokaliseerimise loogika põhineb rikkeindikaatoritel, igale kaugjuhitavale seadmele omistatakse väärtuseks „vea osaline (*fault member*)“ või „mitte vea osaline (*no fault member*)“ ning määratakse ära rikke suund seadme suhtes. Määramise aluseks on loogikatehted, kus väärtus tuleb kolme indikaatori tulemusel – seadme enda, ühe võrra allavoolu ja ühe võrra ülesvoolu oleva rikkeindikaatori põhjal [31]:

$$Rike_{paremal} = LFPI \cdot OFPI \cdot \overline{RFPI} \quad (2.1)$$

$$Rike_{vasakul} = LFPI \cdot \overline{OFPI} \cdot \overline{RFPI} \quad (2.2)$$

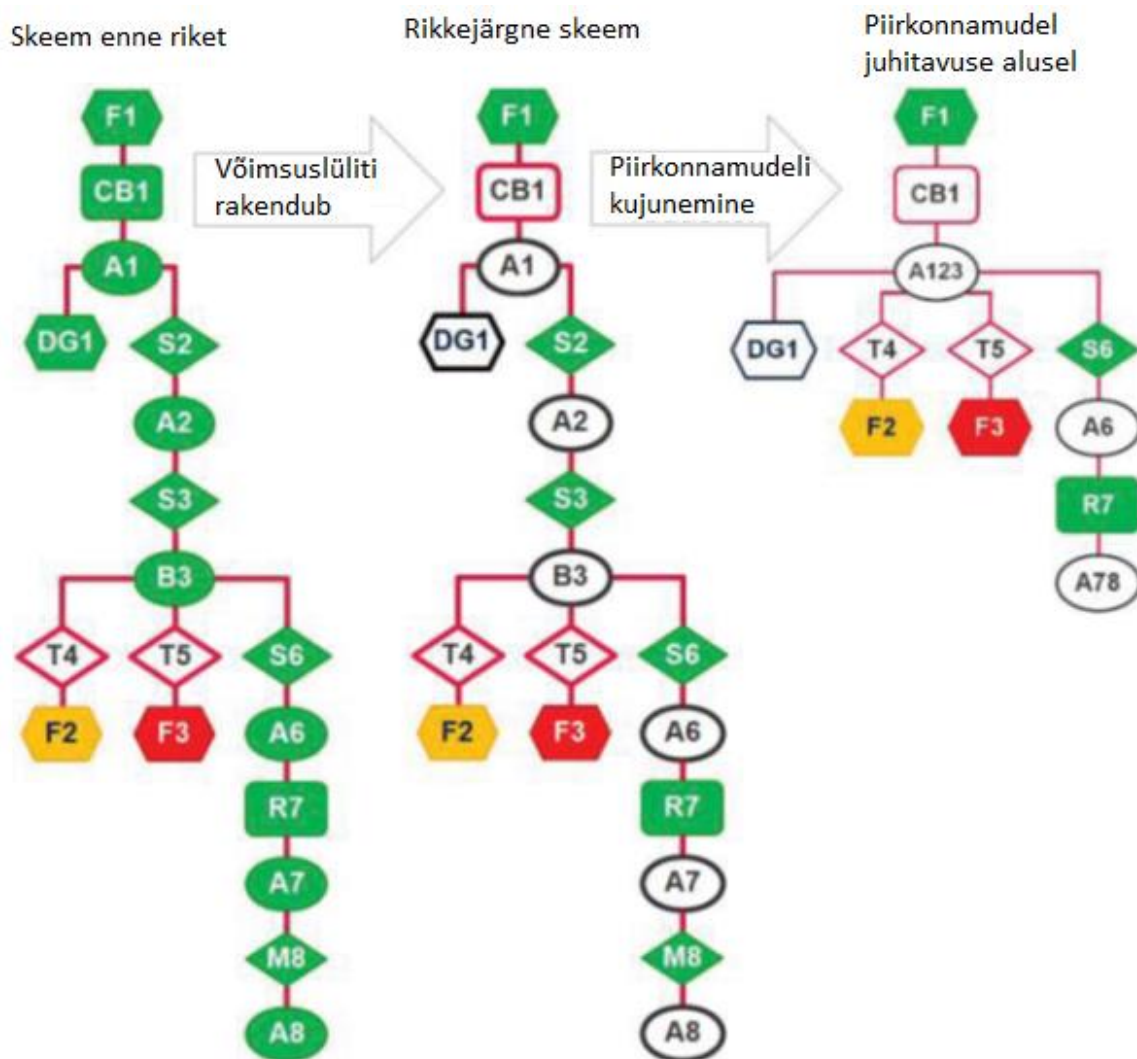
kus LFPI (*Left Fault Passage Indicator*[FPI]) ehk vasakult paikneva, OFPI (*Own FPI*) ehk lülitusseadme enda ja RFPI (*Right FPI*) ehk paremal paikneva rikkeindikaatori olekuinfo.

Ettevõtte avaldatud materjalides ei kajastu antud FLISR lahenduse mõju hinnang kvaliteedinäitajatele. Samas pööratakse tähelepanu, et isetaastuva lahenduse rakendamiseks peab olema valmis ka organisatsioon ning Stedin tegi oma operatiivtöötajatele mitmeid töötubasid selgitamaks ja maandamaks hirme. Teisena toodi välja asjaolu, et FLISR lahendused ei sobi kõigile võrguskeemidele. Lahenduse kõige paremaks töötamiseks peaks olema võrk ühe lahutuskohaga ringskeem, kuid Stedini võrk üldiselt seda ei ole. Samuti toodi välja asjaolu, et sellise lahendusega võib tekkida olukord, kus keskpinge rike pingestatakse isetaastumise käigus madalpinge kaudu, sest alajaamad on madalpinges samuti omavahel seotud. [31] Esitatud lahenduse eeliseks on kindlasti majanduslik aspekt, mis tuleneb sellest, et isetaastumise jaoks ei ole vaja võrgus olemasolevaid lülitusseadmeid asendada kallite releekaitsega varustatud võimsuslülititega. Kirjeldatud FLISR töötab rikkeindikaatorite ja kaugjuhitavate lülitite toel, mida on võimalik saavutada olemasolevaid seadmeid moderniseerides.

2.3 FLISR tutvustus Soomes Elenia näitel

Soome jaotusvõrgu ettevõtte *Elenia Oy* on rakendanud SCADA ja DMS (*Distribution Managment System*) põhise isetaastuva võrgu tehnoloogiat ning avaldanud teadusartikli kontseptsiooni kirjelduse ning tulemustega. *Elenia* jaotusvõrk koosneb 21 523 KP/MP alajamast ning keskpingeliine on 22 050 km, mistõttu on see suuruselt üsna sarnane *Elektrilevi OÜ* jaotusvõrguga. FLISR lahenduse ajendiks oli asjaolu, et tormiste ilmastikutingimuste korral suureneb õhuliinidega piirkondades rikete arv kiiresti ning rikkete katkestuste statistika analüüs näitab, et sellistes tormitingimustes on reeglina esimese katkestust korrigeeriva lülitamise aeg katkestuse algusest liiga pikk. Seetõttu asus ettevõtte otsima kuluefektiivset automaatset tööriista, mis aitaks kaasa SAIDI vähendamisele maapiirkondade keskpinge võrkudes. Uurimise eesmärgiks võeti vähendada veakoha lokaliseerimisele, võrgust eraldamisele ja toite taastamisele kuluvat aega ning eeldati, et automatiseerimist teostatakse ettevõtte tüüpilises hajuspiirkonna võrgus, kus on mõningad kaugjuhitavat võimsus- või koormuslahklülid, lahutuskohad ning üksikud või puuduvad rikkeindikaatorid ning lahendus töötaks ilma täiendavate investeeringuteta võrku. FLISR lahendus pandi tööle olemasolevate juhtimissüsteemide peale: DMS koostab lülitusjärjestuse (ettepanekud), SCADA annab lülituskäsked juhitavatele võrguelementidele. Reaalajas süsteemidevahelise andmevahetuse ja võrguvarade teabe integreerimise korraldamiseks arendati liides *FLIR WS*. Isetaastuva lahenduse kontseptsioon põhineb kahel dünaamilisel mudelil vigasest võrguosast ja sellega seotud elementidest. Loodavateks mudeliteks on lülitusmudel (*switch model*) ja piirkonnamudel (*area model*), mis on dünaamilised ehk lahendusprotsessi käigus

toimingute järel ning ajas muutuvad. Lülitusmudel on olemuselt nimistu kõigist vaadeldava fiidri kaugjuhitavatest elementidest, sisaldades fiidri võimsuslülitit suuremas alajaamas, fiidri toitel olevaid telejuhitavaid elemente, normaallahutuspunkti ja sellest teisele poole jäävaid elemente kuni toitva trafoni. Piirkonnamudel on vaadeldava võrguosa tsoonidesse jaotatud mudel, kus tsoonid eraldatakse seksioneerivate lülitite abil. Mudel on võimeline tsoone liitma või üheks muutma, kui seksioneeriv lüliti ei ole kaugjuhitav või puudub side lülituselemendiga. [32] Piirkonnamudeli kujunemist kirjeldab alljärgnev joonis 2.5:



Joonis 2.5 - Piirkonnamudeli kujunemine juhitavuse alusel [32]

Joonisel 2.5 tähistab lühend CB (*circuit breaker*) relekaitsega võimsuslülitit; DG (*distribution generator*) tootmisüksusega haru; S (*sectionalizer*) on telejuhtiv seksioneeriv lülituselement; T (*tie point*) on normaallahutuspunkt; A ja B tsoone; M manuaalselt juhitavad lülitid; R (*recloser*) mastivõimsuslülitit. Vasakpoolsel kujutisel on näha piirkonnamudel enne riket, keskmisel rikkejärgne ning parempoolne kujutis on

väljakujunenud piirkonnamudel. Piirkonnamudel loomisele eelneb eeltingimuste hindamine, mille käigus kontrollitakse lülitusseadme sides olekut. Joonisel 2.5 kujutatud näite puhul ei saanud juhtimissüsteem ühendust lülititega S1 ja S2. Paremal kujutatud piirkonnamudeli redaktsiooni protseduuri käigus toimub tsoonidesse jagamine, mis võtab arvesse manuaalselt juhitud lüliteid, sideühenduseta lüliteid ja koostab skeemi, millega FLISR saab töötada. Selliste mudelite loomine võimaldab SCADA süsteemil teostada samaaegselt mitmeid FLISR lahendusi, isegi kui võrguelemendid on juhtumite vahel ühised, samas ei tohi piirkonnamudelitel osas olla kattuvust [32]. Sarnased mudelid luuakse ka töö praktilises osas vaadeldud võrgust.

Isetaastumise lahendus on jagatud kahte lülitamiste faasi: esimene faas algab kohe kui DMS ja SCADA süsteemide vahel on valminud lülitusmudel ning esimeses faasi eesmärk on rikkeline võrguosa isoleerimine ning toite taastamine väljalülitunud fiidri allavoolu (*main feed route*); teine faas hakkab pärast veakohta isoleerivate lülitamiste lõppu ning teise faasi eesmärk on veakohast ülesvoolu toite taastamine alternatiivse skeemiga (*back feed*) ehk fiidri normaalskeemi vaadates veakohast kaugemal asuvas lõigus. Lülitusjada peab sisaldama ka kontrolltoiminguid, mille eesmärk on hinnata eelnevalt teostatud lülituste tulemusi ning vajadusel valida alternatiivne lahendus. Enne lülitusjada koostamist teostab süsteem veakoha analüüsi, mis saab jada koostamise aluseks. Veakoha analüüsil on 3 võimalikku tulemit [32]:

- usaldusväärne hüpotees vigasest võrguosast – sellise tulemuseni jõutakse, kui vaadeldavas võrguosas on palju rikkeindikaatoreid, mis asuvad kaugjuhitavate lülitite läheduses;
- üks kahtlustatav tsoon – sellise tulemuseni jõutakse, kui veakoha analüüsi meetod põhineb mõõteandmetel (nt lühisvool) ning arvutustel. Teine meetod on tõenäosuslik, kus võetakse arvesse iga võrgukomponendi rikkesagedust tuginedes rikkestatistikale. Süsteem võimaldab ka kombineerida tõenäosust ning arvutuslikku veakohta;
- veakoht teadmata – sellise tulemuseni jõuab süsteem, kui eelnevalt kirjeldatud meetodid ei ole saadaval või ei anna piisavalt täpset tulemust (sageli maalühiste korral). [32]

Kõigi veakoha analüüsi tulemite põhjal koostatud lülitusjadade puhul on üldjuhul (kui pole süsteemi poolt keelatud, nt maakaabelvõrgu puhul või tarbija omapärasuste puhul) esimeseks toiminguks proovipingestamine kindlaksmääratud ajasätte möödumisel ilma väljalülitunud võrguosa skeemi muutmata. Selle eesmärk on veenduda, et tegemist on püsirikkega ning kas on vajalikud järgnevad lülitused. Järgnevate tegevuste korral erinevad toimingud sõltuvalt veakoha analüüsi tulemustest, mida kirjeldab alljärgnev joonis 2.6:

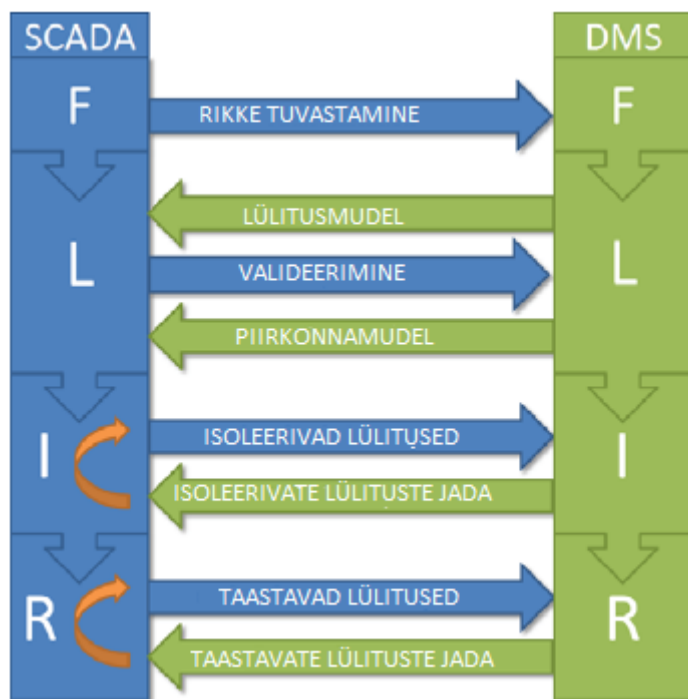


Joonis 2.6 - Tegutsemispõhimõtted tulenevalt veakoha analüüsist [32]

Kui on olemas usaldusväärne hüpotees või üks kahtlustatav tsoon, kus võrguosas riket põhjustav viga asub, siis pärast ebaedukat proovipingestamist toimub kohe selle lõigu eraldamine. Seejärel pingestatakse hetketeadmise järgi terve võrguosa väljalülitunud fiidrist. Kui seda tehes lülitub fiider uuesti välja, toimib automaatika nagu veakoht oleks teadmata. Joonisel 2.6 on kujutatud ka teine proovipingestamine (*trial 2*), mis tähendaks vigase võrguosa pingestamist pärast isoleerimist, eesmärgiga garanteerida rikke olemasolu konkreetses lõigus. Praktikas tähendab see tarbijatele lisakatkestusi ning süsteem võimaldab seda sammu keelata. Kui veakoht on teadmata või eelnev lahendus on olnud ebaedukas, siis on lülitamiste jada eesmärk allavoolu tsoonide järkjärguline pingestamine – esmalt suuremate tsoonide (*sparse roll sequence*) kaupa ning seejärel vajadusel väiksemate võrguosadena (*dense roll sequence*). Proovipingestamine toimub allavoolu ning lõppeb, kui kõik võrguosad on pingestatud (mööduv lühis, *trial 2* lubatud) või veakoht on kahe sektsioneeriva tsooni vahel ning toidetud on kõikvõimalikud tsoonid normaalskeemi järgi. Väiksemate võrguosade pingestamine lõppeb kui pingestatud on kõik võrguosad või veakoht on isoleeritud kahe kaugjuhitava lüliti vahele ning toidetud on veakohale eelnevad võrguosad normaalskeemi järgi. Olenevalt konkreetsest võrgust võivad *sparse* ja *dense roll sequence* ühtida. Pärast veakoha eraldamist võrgust ning normaalskeemi järgi võimalikult suure osa pingestamist hakkab *restoration sequence* ehk allavoolu veakohast kaugemale jäävatele võrguosadele toite taastamine. Selleks on lülitusmudel

seotud võrguosade lülitid ning toite taastamine fiidri kaugemale osale (võimalusel) toimub normaallahutuspunktide kaudu. Kasutatav SCADA ja DMS põhine süsteem võimaldab tuvastada parima variandi fiidri lõpuosa ümbertoitmiseks, võttes arvesse võimalikud piirmäärade rikkumised seoses lubatud koormuse ja pingelanguga. Lisaks kontrollitakse releekaitsetsätte sobivust minimaalse faasidevahelise lühisvooluga võrreldes.

FLISR lahenduse töövoog infosüsteemide vahel on kujutatud alljärgneval joonisel 2.7:



Joonis 2.7 - Töö- ja andmevoog infosüsteemide vahel [32]

SCADA tuvastab rikke alarmide ja käsuta lülitite asendite muutmise abil, mille peale antakse indikatsioon DMS rakendusele rikke tekkest. Skeemihaldusprogramm DMS loob seejärel kaugjuhitavatest lülititest lülitusmodeli, mis saadetakse SCADA süsteemi valideerimiseks (lülitite asendite kontroll, lukustuse ja sidestuse kontroll). Järgmisena loob DMS piirkonnamudeli, teostab veakoha analüüsi ning koostab veakohta isoleerivate lülituste jada, mis saadetakse SCADA süsteemile elluviimiseks. Eduka isoleerimise korral koostab DMS tervetele võrguosadele elektrivarustust taastavate lülituste jada, mis edastatakse SCADA-le lülituste tegemiseks. Süsteemide vaheline andmevahetus käib loodud FLIR WS rakenduse kaudu, mille eesmärk on tagada iga FLISR tsükli ajal sünkroniseeritud süsteemide vahel. Küberturbe kaalutlustel algatab FLIR WS päringuid alati SCADA. Kirjeldatud töövoog võimaldab SCADA süsteemil tsükli täita edastatud toiminguid ilma, et oleks vaja alamsüsteemide vahelist katkematut side, mis aitab süsteemi vähem koormata. Iga tsükli täitmisele eelneb sätestatud eeltingimuste kontroll, lülituskäskude andmine (automaatselt või dispetšeri kinnitusega), millele järgneb

järeloktroll. Mõne tsükli ebaõnnestumisel või sätestatud kontrollparameetrite rikkumisel võtab süsteem teise lahenduse (joonis 2.7) või katkestab isetaastumise protseduuri ning juhtimise võtab üle inimene. FLISR võeti kasutusele 2011. aasta oktoobris pärast 6-kuulist testiperioodi. Esmalt oli kasutuses poolautomaatsena (FLISR teeb ettepanekud, operaator kinnitab manuaalselt), kuid juba sama aasta detsembrist rakendati täisautomaatsena. Lahendus katab valdavalt enamust keskpinge võrgust - umbes 92 % klientidest on ühendatud isetaastuva võrguga, erandiks mõned üksikud keskpingefiidrid, mille toitel näiteks spetsiifilised tööstusettevõtted. [32] Perioodil 2011. aasta oktoobrist kuni 2018. aasta märtsini suutis kirjeldatud FLISR edukalt lahendada 4400 riket. Tulenevalt reguleerijatest ettekirjutustest on Soomes nõue 2028. aastaks saavutada varustuskindluse tase, kus katkestuse kestvus linnades on piiratud 6 tunniga ja linnavälistes asulates 36 tunniga, viiakse järjest rohkem jaotusvõrku maakaablitesse, milles nähakse peamist moodust varustuskindlust parendada. Kaabelvõrgu kiire kasvuga (Elenia võrgus suurusjärgus 1000 km aastas) tõusis vajadus optimeerida FLISR lahendust, mis töötaks paremini õhuliinidega, kaabelliinidega ja eri liinitüüpidega võrgus. Väljatöötatud FLISR edasiarendusel on tava ja tormi režiim (*normal, storm mode*), mille põhiline erinevus on see, et tormioludes suureneb rikete arv õhuliinidega võrguosas ja FLISR taastab toite esmalt ilmastikukindla kaabelvõrguga osale. Tormi režiimis tuleb eelnevalt kirjeldatud lahendusele (joonis 2.7) juurde kaks võimalust: ilmastikukindel ülesvoolu (*weatherproof upstream*) ning eelduslikult terve ülesvoolu (*Healthy upstream based on Fault Distance*). Esimene lahendus võetakse kasutusele, kui tormirežiimis tuvastab FLISR süsteem kaabelvõrku eraldavad kaugjuhitavad lülitid, mille järel isoleeritakse kaabelvõrk ning taastatakse toide seal. Seejärel annab süsteem juhtimise üle dispetšerile. Teine lahendus võetakse kasutusele, kui veakoht on teadmata või ei ole arvutused piisava täpsusklassiga. Lahendus isoleerib esimese ebaeduka proovipingestamise järel eelduslikult (arvutustel põhinev, mööndustega) terve võrguosa ülejäänust kaugjuhitavate lülite olemasolul ning pingestab rakendunud võimsuslüliti poolt, misjärel FLISR enam ei tööta ning annab juhtimise üle dispetšerile. Tormirežiimi puhul kasvab tormi perioodil edukate FLISR juhtumite arv, samas suureneb dispetšerile koormus. [33] FLISR lahenduse tulemused *Elenia* näitel on paljulubavad, samuti kasutab *Enefit Connect OÜ* sama arendaja DMS programmi. Avaldatud materjalides ei ole välja toodud arvulist mõju kvaliteedinäitajatele. Samuti ei ole kirjeldatud kuidas FLISR lahendus töötab näiteks juhul, kui sama fiider on lülitub rikkejärgselt välja, kui ühe korra on juba FLISR seda lahendanud. *Elenia* isetaastuva keskpingevõrgu näitel saab palju õppida ning üle võtta, võrgu iseloomud ja lahenduse kasutuselevõtu eeldused kattuvad Elektrilevi võimalustega. Väga mõistlik tundub SCADA ja DMS vahelise rakenduse kasutamine, mis võimaldab SCADA süsteemi vähem koormata ning

lihtsustab välja töötatud isetaastumise lahenduse kasutuselevõttu näiteks SCADA uuenduste või süsteemi vahetuse korral.

3 ELEKTRILEVI JAOTUSVÕRGU FLISR

Käesolev peatükk on kirjutatud kasutades ettevõtte kinniseid sisedokumente, lõputöö konsultandi selgitusi ja SCADA kasutuskogemust. *Elektrilevi OÜ* jaotusvõrgu juhtimiseks kasutusel olev SCADA süsteem osa on ettevõtte *Schneider Electric* tootest *ADMS (Advanced Distribution Management System (DMS))*. Toote juurde kuulub ka isetaastuva võrgu lahendus FLISR mooduli näol, mille osad on:

- *Fault Location (FL)* – Rikke asukoht on rakendus, mille eesmärk on kiiresti tuvastada, millis(t)es fiidri sektsiooni(de)s on riket põhjustav viga. Rikked koha suurus sõltub võrku installeeritud mõõte- ja indikatsiooniseadmete arvust ning võib varieeruda ühest lülititevahelisest sektsioonist (palju mõõtepunkte, head andmed) kuni terve fiidri (puuduvad mõõteandmed).
- *Fault Localization (FLL)* – Rikke lokaliseerimine on rakendus, mille funktsionaalsus on veakoha lokaliseerimine ja isoleerimine. Rakendus edastab lülitusjärjestuse moodulile (*Switching Sequence module*) lülitustoimingud kaugjuhitavate ja/või käsijuhtimisel lülititega lokaliseerimaks ja isoleerimaks veakoht.
- *Fault Isolation (FI)* – Rakendus edastab lülitusjärjestuse moodulile andmed rikkeline võrguelemendi või -elementide kohta FL/FLL tulemusel.
- *Supply Restoration (SR)* – Toite taastamise rakenduse eesmärk on rikkeline fiidri tervetele osadele toite taastamine ning rakenduse väljundiks on lülitamistoimingud, mille järjestus sõltub määratud seadistusparameetritest.
- *Restore to Normal State (RN)* – Normaalse oleku taastamise rakenduse eesmärk on edastada lülitustoimingud taastamiseks rikkele eelnenud normaalskeem.
- *Telecontrol Automatic Reclosing (TAR)* – Taaslülitusautomaatika eesmärk on õhuliinidega võrguosade proovipingestamine mööduva lühise välistamiseks.

FLISR algoritm töötab süsteemis oleval reaalaja võrgu mudelil, mis põhineb telemeetrilise seadmete edastatud andmetel (olekuparameetrid, mõõteandmed) ning sisestatud andmetel (käsitsi juhitud lülid, manuaalselt süsteemi sisestatud olekud) rikke tekkimise hetkel, samuti arvestab SCADA süsteemi edastatava andmekvaliteediga ja sätestatud piirangutega (sildid, väljaarvamised). Isetaastuva võrgu lahendust saab kasutada automaatses, pool-automaaitses ning manuaalses režiimis. Automaatse režiimi korraldab tuvastab FLISR ise rikke tekke ning teostab vajalikke veakohta eraldavaid ja

tervetele võrguosadele toidet taastavaid lülitusi ilma inimsekkumiseta. Pool-automaatne režiim teeb automaatselt toiminguid, milleks luba antud, ning ülejäänud mooduli osade puhul annab operaatorile juhised või ootab enne teostamist kinnitust. Manuaalse režiimi puhul teostatakse FLISR lahendusi korralduse peale ja soovitud mahus, samuti saab seda kasutada iga fiidri puhul sõltumata rikke tuvastamise ja asukoha määramise automaatika ning kaugjuhitavate lülitusseadmete olemasolust. FLISR-i töövoos keskne komponent on katkestustöötlusteenus (OPS – *Outage Processing Service*), mis vastutab süsteemi katkestuskirjete loomise, nende täiendamise/ajakohastamise, FLISR-i rakenduste käivitamise, FLISR-i rakenduste täitmiseks sisendi ettevalmistamise jms eest. Seda kõigi FLISR-i töörežiimide puhul. Kõiki kirjeldatud FLISR osarakendusi on võimalik käitada ka eraldiseisvana, hetkeseisuga kasutatakse manuaalselt rikke asukoha rakendust fiidritel, kus toitva alajaama võimsuslüliti registreerib lühisvoolu. Mõõdetud lühisvoolu väärtus sisestatakse käsitsi süsteemi, valitakse element ning määratakse rikke tüüp. Arvutustulemustest lähtuvalt on dispetšeril võimalus teha järgnevaid otsuseid rikkebrigaadi suunamise või lülitustoimingute osas. Normaaloleku taastamise (RN) rakenduse tegevust antud töö raames ei käsitleta, sest normaaloleku taastamine ei oma otseselt analüüsitavaatele kvaliteedinäitajatele mõju ning see tegevus toimub pärast rikke likvideerimist. Samuti on rikke ja selle likvideerimise iseloomust lähtuvalt tänase töökorralduse juures toimingud, mille integreerimine automaatsetesse lülitamistesse on keeruline. Näiteks juhi katkemisel või katkestamisel tuleb teostada faseerimine ehk faasjärjestuse ühtivuse kontroll. Taaslülitusautomaatika (TAR) rakenduse tegevust samuti antud magistritöö raames ei käsitleta, sest selline lahendus on eraldiseisvana Elektrilevi jaotusvõrgus juba kasutusel olnud pikalt.

3.1 Rikke asukoht (FL)

Rikke asukoha (FL) rakendus proovib fiidril määrata väikseima võimaliku rikkeline lõigu ning võtab arvesse erinevaid kaitselemente, mis rikke korral reageerivad (rikkeindikaatorid, rikke(häire)salvestid, rikkevoolu mõõtmise võimalusega releed). Vea asukoha määramine toimub automaatselt kui see on nii sätestatud ja tuvastab rikke (tavaliselt rakendunud võimsuslüliti + lisatingimus(ed)), kuid saab teostada ka manuaalselt ja suletud lüliti korral. FL rakendus annab sisukaid tulemusi ainult juhul, kui võrgus on piisavalt asjakohased seadmed, mis tuvastavad rikkevoolu läbimist või salvestavad lühisvoolu, pinget ja faasinurkade väärtusi. Sellisteks seadmeteks on põhiliselt rikkeindikaator (kaugloetav, tuvastab lühisvoolu läbimist, võib (ei pea) lühisvoolu mõõta); releekaitsega lülitusseadmed (peavad olema kaugjuhitavad, edastama mõõteandmeid) ning voolutrafod, mis suudavad mõõta lühisvoolu ja edastada mõõteandmeid SCADA-le. Asukoha arvutamiseks kasutatavad meetodid (4) on

rikkeindikaatori, rikkevoolu, rikke impedantsi ja reaktantsi meetod. Seadistamisel on võimalik valida üks või mitu meetodit ning nende osakaalud lõpptulemuses, sõltuvalt konkreetse võrguosa iseloomust. Kõigi meetodite puhul on esimeseks sammuks potentsiaalsete rikkeliste võrguelementide määramine, milleks on kõik valitud või väljalülitunud kaitseelementid allavoolu jäävad võrguelemendid. Elementide määramisel toimub kaardistamine liikudes rakendunud võimsuslülitist allavoolu ning peatudes normaallahutuspunktide, jaotustrafode ning ise valitud elementide juures (nt sulavkaitsmed).

Rikkeindikaatori meetod põhineb analüüsitava fiidri rikkeindikaatorite olekul ning indikatsioonidel, kas lühisvool on indikaatorit läbinud või mitte. Selle meetodi täpsus sõltub otseselt võrku paigaldatud indikaatorite arvust ning tihedusest – mida rohkem neid on paigaldatud, seda täpsema asukoha meetod annab. Kui rikkeindikaatoreid on vähe, siis maa-ala on samuti suur. Kui fiidril puuduvad rikkeindikaatorid ja valitakse asukoha tuvastamiseks see meetod, siis tulemuseks on terve fiider. Süsteemi on võimalik seadistama arvestama ka indikaatoreid, mis ei edasta näitu SCADA süsteemi, kuid sellisel juhul on lahendus aeglane ning seda ei soovitata. Rikkeindikaatori näitu ei võeta arvesse, kui signaali staatus on kahtlane (telemeetria aegunud, vastakad andmed) või SCADA süsteemis on indikaatorile lisatud talitlushäire märgis.

Rikkevoolu meetod kasutab rikke asukoha määramiseks mõõdetud lühisvoolu väärtust ning mikroprotsessor baasil kaitsereleede või häiresalvestiste poolt edastatud rikke tüüpi (faasidevaheline, maalühis jne). Voolu faasori väärtus võetakse viimase lühisvoolu tsüklist enne võimsuslüliti rakendumist. Seejärel teostab tarkvara lühisvoolu arvutuse/simulatsiooni eelnevalt seatud sätete, mõõteandmete ja võrgu topoloogia, eesmärk on leida võrgus punktid, kus oleks arvutuslik lühisvool ligilähedane mõõdetud väärtusele. Võrk jagatakse sektsioonideks ja igale hargnemisele või sektsioonile leitakse lühisvoolu väärtus sektsiooni alguses ning lõpus. Seejärel võrreldakse, kas mõõdetud väärtus jäi eelnevalt kirjeldatud vahemiku. Olenevalt konkreetse fiidri iseloomust on tavaliselt sektsioone üks või mõni, kus arvutuslik voolu väärtus ühtib mõõdetud väärtusega.

Rikke impedantsi meetod põhineb vea tekke hetkel mõõdetud pingel ja voolu väärtustel ning voolu tüübil. Erinevuseks rikkevoolu meetodiga võrreldes on see, et väärtused tuleb süsteemil teisendada komplekskujule, mille abil leitakse näivtakistus arvutuslikult, samuti tuleb arvesse võtta faasi. Sarnaselt rikkevoolu meetodiga teostab süsteem simulatsiooni ning määrab igale võrgu sektsioonile maksimaalse ning minimaalse väärtuse ning võrdleb mõõdetud (arvutusliku) näivtakistuse väärtusega, mille abil

leitakse tavaliselt üks võrgu sektsioon, kus rike toimus. Meetod eeldab häiresalvesti või targa mikroprotsessori baasil kaitsereleede olemasolu.

Rikke asukoha rakendus teeb rikke tuvastamisel hetketõmmise võrgumudelist, topoloogiast ja signaalidest, mis seotud vigase fiidriga. Pärast analüüsimist on rakenduse väljundiks lõigud, kus arvutustulemustest lähtuvalt lisatud vea esinemise tõenäosus. Rikkekohta arvutuse tulemus reaalse rikke korral on esitatud Lisas 1. Edasised FLISR rakendused võtavad aluseks suurima vea esinemise protsendiga lõigu, juhul kui lõike on mitu.

3.2 Rikke lokaliseerimine (FLL)

Rikke lokaliseerimise (FLL) rakendust kasutatakse minimaalse rikkeline ala määramiseks teostades (või manuaalse režiimi puhul soovitades) lülitamistoiminguid, mis iteratiivselt viivad minimaalse võrguosani. Lokaliseerimise põhiidee põhineb rikke asukoha rakenduse poolt kindlaks määratud huvipakkuv tsooni osadeks jaotamisel ja proovipingestamisel. Algoritm eeldab, et tegemist on ühe veakohaga ning kui toimub huvipakkuva tsooni sees ebaedukas proovipingestamine ja võimsuslülitid rakendub, siis loetakse vea asukoht pingestatud võrguosa siseseks ning katsetamata võrguosa loetakse terveks. Tüüpilise lahenduse ja küllaltki madala automatiseerimistaseme juures teostab veakoha lokaliseerimine kiirelt kaugjuhitavate lülitite abil vigase võrguosa eraldamise ning täpsem lokaliseerimine jääb rikkebrigadide ning dispetšeri teha, kasutades käsijuhtimisega lüliteid. Vea lokaliseerimise rakenduse ajendiks on sarnased sätted nagu vea asukohal, kuid siin on kohustuslik pingetu võrguosa ehk rakendunud võimsuslülitid. Alglähend baseerub FL tulemustel: kui veakoha arvutus on teostatud, siis arvutustulemused võimalike rikkeline elementidega on FLL sisendiks; kui veakoha arvutus ei ole tehtud (puuduvad indikaatorid, mõõteandmed), siis lokaliseeritakse allavoolu proovipingestades. FLL ei vaja käitamiseks eriseadmete olemasolu võrgus, algoritmi töötamiseks on vajalik sideühendus kaugjuhitavate lülitusseadmetega ja võrgu reaalseisu topoloogiat. Eelnevalt on võimalik seadistada, milliseid lülitusseadmeid lahenduse juures tohib kasutada (võimalik selekteerida sobivad või valida kõik), eelistatud meetod on kasutada ainult kaugjuhitavaid lüliteid. Veakoha lokaliseerimiseks on kolm meetodit: vastandumise (*dychotomy*), korrapärane (*orderly*) ja süvaotsingu (*deep search*) meetod. Vastandumise meetodi korral proovipingestatakse võrku võrdsete osade kaupa. Osadeks jaotamist saab eelnevalt seadistada kahel moel: liinipikkuste järgi võrdseteks osadeks või rikke asukoha (FL) tulemustest lähtuvalt võrdseteks osadeks lõigus, kus rakendus vea asukohaks määrab. Korrapärase meetodi puhul toimub proovipingestamine järk-järgult fiidri algusest, pingestades allavoolu üha suuremaid võrguosasid. Kirjeldatud kaks meetodit toimivad ainult manuaalse töörežiimi

puhul, süvaotsingu meetod on automaatse FLISR ainus kasutusesolev meetod ning kasutab rikkekoha lokaliseermiseks ainult kaugjuhitavaid lüliteid. Süvaotsingu meetodi puhul avab süsteem kõik kaugjuhitavad lülid väljalülitunud fiidril või konkreetsel võrguosas, võttes arvesse eelnevalt seadistatud tingimusi lülite sobivuse osas, rakendunud lüliti kaitstavat tsooni ja rikke asukoha (FL) tulemusi. Seejärel suletakse neid järk-järgult allavoolu liikudes, kuni võimsuslüliti rakendub uuesti. Uuesti rakendumise puhul loetakse vigaseks võrguosaks viimase sisselülitatud lüliti ja sellele järgneva avatud lüliti vaheline ala. Rakenduse viimane osa on võimsuslüliti uuesti rakendumise järel viimasena sisselülitatud kommutatsiooniseadme avamine ja sellest ülesvoolu fiidri pingestamine.

3.3 Rikke eraldamine võrgust (FI)

Rikke võrgust eraldamise rakenduse eesmärk on eelnevalt paika pandud lülitusseadmete alusel minimaalse riket sisaldava võrguosa eraldamine, mis võimaldab riket sisaldavast võrguosast allavoolu jäävatele tarbijatele võimalusel elektrivarustus taastada. Rakendust on võimalik sisendparameetrite alusel seadistada väga erinevalt, näiteks, et lahendus: võtaks arvesse kaitselahutuspõhimõtteid (visuaalselt nähtav lahutus) ja seda tagavaid seadmeid; eraldaks vigast võrguosa ainult potentsiaalsetest reservtoite suundadest; ei teostaks lahendust tundliku maaühenduse korral; isoleeriks faasi kaupa või eraldi (lüliti tüübist olenevalt); arvestaks võrku installeeritud tootmiseseadmeid saartalitluste jaoks. Vaadeldava võrgu automatiseerimise tasemest ja töökorraldusest lähtuvalt ei käsitleta antud töös rikke võrgust eraldamise (FI) rakenduse võimalusi, sest keskendutakse FLISR mooduli mõjule, kui see juhiks automaatselt kaugjuhitavaid lülitusseadmeid. Eelnevalt kirjeldatud rikke lokaliseerimise meetoditest kasutab automaatne lahendus süvaotsingu meetodit, kus avatakse kõik kaugjuhitavad lülid veakohta sisaldavas fiidris või võrguosas. Selliselt talitades teostab rikke lokaliseerimise rakendus juba rikke võrgust eraldamise, sest veakohast allavoolu jääv esimene kaugjuhitav lüliti on juba avatud ja edasisi toiminguid automaatselt teha ei saa.

3.4 Tarbijatele toite taastamine (SR)

Toite taastamise (SR) rakenduse eesmärk on leida optimaalsed lahendused rikkejärgselt pingetuks jäänud ning riket mittesisaldavate võrguosade pingestamiseks. Mooduli osa on võimalik seadistada arvestama väga paljude erinevate tingimustega ja leidma nende alusel parima võimaliku variandi, hinnates talitlustingimusi pärast lahendust. Samuti võimaldab rakendus nn. lihtsa variandi puudumisel sätestatud kriteeriumite alusel taastama toite osaliselt, teostama ümberlülitusi erinevatest allikatest taastamiseks,

taastama märgitud prioriteetsetele klientidele või saarte kaupa. Elektrilevi võrgu projekteerimispõhimõtetest lähtuvalt on fiidrid normaallahutuspunktidest täielikult ehk terves ulatuses reserveeritavad, mis tähendab, et vaadeldavas võrguosas leiab toite taastamise rakendus lihtsa lahenduse või puudub võimalus rikkekohast allavoolu tarbijatele toite taastamiseks (tupikfiider, normaallahutuspunkt puudub või sealt edasi pingetu). Kui normaallahutuspunkt on kaugjuhitav, saab toimuda toite taastamine automaatselt.

4 JAOTUSVÕRGU ÜHE PIIRKONNA JUHTIMINE JA FLISR POTENTIAAL

Käesoleva peatüki esimeses osas antakse lühikirjeldus võrgu juhtija tegevustest keskpinge rikkeliste katkestuste lahendamisel. Peatüki teises osas kirjeldatakse valitud piirkonna keskpinge võrku FLISR moodulile sobivuse ja rakendamise potentsiaali osas, samuti antakse ülevaade rikete statistikast ning mõjust kvaliteedinäitajatele. Kolmandas osas kirjeldatakse teostatud katsetusi ja neljandas esitatakse tulemused, järeldused. Peatükis kasutatud skeemidel on kasutatud *Elektrilevi OÜ* tingmärke.

4.1 Jaotusvõrgu keskpinge rikete lahendamine

Jaotusvõrgu juhtimine rikete lahendamisel on täna suures osas manuaalne tegevus, mida juhib võrgu dispetšer. Dispetšer saab indikatsiooni keskpinge rikkelisest katkestusest SCADA süsteemist, kui mõni kohtsüsteem edastab lüliti asendi muutuse või muu alarmi. Eksisteerib ka võimalus, et keskpinge katkestusest tuleb teavitus klienditeatena ja SCADA süsteemist pole alarme läbi käinud, näiteks mõne keskpinge alajaama trafo fiidri või väiksema haruliini sulavkaitse rakendumise korral, kuid sellised sündmused omavad vähe mõju kvaliteedinäitajatele ning FLISR moodulil ei ole üldjuhul võimalik mõju vähendada. Rikke lahendamise kirjeldamisel käsitletakse sündmusi, mille korral jaotusvõrgu suuremas alajaamas või võrguosas rakendub releekaitsest võimsuslüliti ja pingetuks jääb keskpinge fiider tervenisti või selle osa. Selliste sündmuste korral tuleb dispetšeri SCADA tööjaama alarm ja infosüsteemi DMS tekitatakse rikke menetlemiseks sündmus, samuti muutub skeemihaldusprogrammis võrgu skeem muutes automaatselt sideühendusega lülitite asendit vastavaks reaalsusega. Järgnevalt tuleb dispetšeril teha endale SCADA alarmide ja signaalide abil teha selgeks, mis lüliti rakendus ja milline võrguosa jäi pingetuks. Olenevalt, kas rakendunud lülitil on aktiivne TLA, toimub automaatselt või dispetšeri käsijuhtimisel väljalülitunud võrguosa esimene proovipingestamine. TLA on töös tavaliselt fiidritel, kus suur osa fiidrist on keskpinge õhuliinis, mis tähendab suuremat mööduvate lühiste tõenäosust. Juhul kui TLA on tööst välja viidud või rakendunud lülitil ei ole sellist võimekust, siis on proovipingestamise otsus ja teostus dispetšeri otsustada konkreetsest sündmusest, signaalide sisust ja välja lülitunud võrguosast lähtuvalt. Kui proovipingestamine on edukas ehk uuesti rakendumist ei esine, siis on toitekatkestus tarbijatele lõppenud ja edasisi tegevusi (mis omavad otsest mõju kvaliteedinäitajatele) ei tehta ning sündmus antud käsitluses lõppenud. Ebaeduka proovipingestamise või selle tegemata jätmisel on järgmiseks tegevuseks dispetšeril kaugelt veakoha

lokaliseerimine. See tähendab lihtsustatult, et dispetšer vaatab skeemilt rakendunud lüliti tagajärjel pingetuks jäänud võrguosa ja kaugjuhitavate lülitusseadmete olemasolul seksioneerib võrguosa väiksemateks osadeks, mida proovipingestada. Kaugjuhitavate lülitite, mis seksioneerivad väljalülitunud võrguosa, olemasolul saab teha kindlaks, kas rike esineb lülitist ülesvoolu fiidri alguse suunas või mitte. Juhul kui on kaugjuhitavaid (ja sobivate lülitusseadmetega) normaallahutuspunkte, saab proovipingestada ka fiidri lahutuspunkti(de)st allavoolu jäävat võrguosa. Teine tegevus, mida kaugjuhtimisega saab teha, on mõningatel juhtudel tarbijatele elektrivarustuse taastamine. Selle jaoks on vajalik kaugjuhitava normaallahutuspunkti olemasolu lisaks telejuhtimisega seksioneerimisele. Nimetatud tegevused on sellised, mida dispetšer teostab infosüsteemides ja kasutab SCADA-ga sidestatud ning kaugjuhtimise võimekusega lülitusseadmed. Nende puhul sõltub kiirus, optimeerimine ja valikute õigus dispetšeri väljaõppest, töökogemusest ning võrgu hetkeolukorrast tingitud töömahust, mida mõjutab suuresti näiteks tormised ilmastikuolud ja rikete arv. Selliseid toiminguid, mis sisaldavad endast kaugjuhitavate lülitusseadmete lülitamist ja alarmide analüüsi, on võimalik automatiseerida ja teostada töömahust sõltumata ühtse kiirusega ning seda FLISR moodul endast sisuliselt kujutab. Kui kaugjuhtimise võimekus väljalülitunud fiidril puudub või see on ammendanud oma potentsiaali (kaugjuhitavate elementide vahel vigane võrguosa, tarbijad toidetud võimalikus mahus), siis järgnevad tegevused hõlmavad endast operatiivpersonali kasutamist ja lülitustoiminguid käsijuhtimisel. Sisuliselt on tegevused sama põhimõttega: kasutades rikke asukohale viitavaid vahendeid (mõõtmised, rikkeindikaatorid, klienditeated) üritatakse minimeerida rikkalise võrguosaga elektrilises ühenduses oleva võrgu mahtu kasutades selleks kommutatsiooniseadmeid; tervete ja rikkekohaga mitte ühenduses olevate võrguosade taaspingestamine võimalusel, kasutades ümberlülitusi ja normaallahutuspunkte.

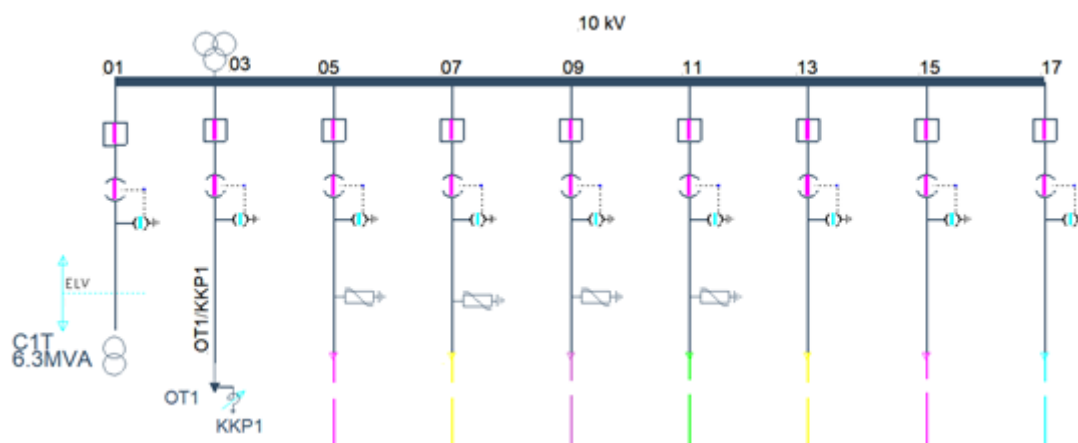
4.2 Valitud piirkonna ülevaade

Analüüsitav võrguosa asub Saare juhtimispiirkonnas. Vaadeldakse Leisi, Orissaare ja Valjala piirkonnaalajaamadest väljuvaid keskpinge fiidreid. Esimeses alapeatükis on antud lühikirjeldus kõigist vaadeldavate piirkonnaalajaamade väljuvatest fiidritest FLISR moodulile oluliste osade (kaugjuhtimine, mõõteandmed) näol, samuti kaardistatud on fiidri toitel olevate alajaamade ning tarbimispunktide kogused hindamaks mõju kvaliteedinäitajatele. Kaardistatud on kõik telejuhitavad elemendid hindamaks, kas fiidril on võimalik rakendada FLISR moodulit automaatseks toite taastamiseks. Lisaks antakse ülevaade fiidril paiknevatest rikkeindikaatoritest ja häiresalvestitest. Moodulile sobivate fiidrite jaoks on joonistatud fiidri piirkonnaskeemid, kus on kajastatud ainult elemendid, mida FLISR saab rakendustes kasutada. Käesoleva osa tegemiseks on

kasutatud ettevõtte skeemihaldusprogrammi DMS, sealt pärinevad alajaamade joonised, fiidrite tarbimisandmed ja seadmete omadused. Teises alapeatükis on kirjeldatud mooduli kasutuselevõtu hindamise algoritmi ja antud ülevaade vaadeldava võrguosa mooduliga hõlmatavust (seotud alajaamad, kliendipunktid). Kolmandas alapeatükis on kirjeldatud valitud võrguosa rikete statistikat ja mõju kvaliteedinäitajatele.

4.2.1 Väljuvate fiidrite kaardistus

Valjala 110/10 piirkonnaalajaama *Elektrilevile* kuuluv osa koosneb ühest 10 kV keskpinge sektsioonist, mis on ühe põhivõrguettevõttele kuuluva 110/10 kV trafo toitel. Keskpinge sektsioonil on üks trafo fiider, üks kaarekustuspooli ja alajaama omatarbe fiider ning 7 väljuvat fiidrit, mille ees on releekaitsega võimsuslülitid ning millele viidatakse joonisel 4.1 esitatud tunnuste abil (05, 07, ..., 17).

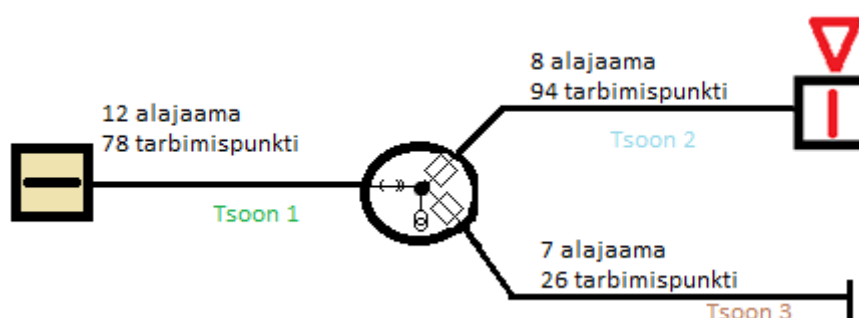


Joonis 4.1 - Valjala 110/10 keskpinge sektsioon

Kõik Valjala 110/10 väljuvate fiidrite ees olevad võimsuslülitid on SCADA süsteemis juhitavad ja edastavad oleku- ning mõõteandmeid. Samuti on kõigil väljuvate fiidrite lahtritel võimekus registreerida lühisvoolu suurust, mille alusel saab FLISR süsteem automaatselt teostada rikke asukoht (FL) rakendust ja anda väljundina vea tõenäosust võrguosades.

Fiider 05 koosneb nii õhu- kui kaabelliinidest. Fiidri toitel on 32 alajaama ning 287 tarbimispunkti. Reservtoite võimalusi ehk normaallahutuspunkte on 3. Nendest esimene on käsijuhtimisega lahkülüti, mille nimivool on 25 A; teine reservtoite võimalus (Leisi fiider 10 toitel) on fiidri ühes alajaamas paiknev võimsuslüliti, mis on kaugjuhitav ja nimivooluga 630 A; kolmas normaallahutuspunkt on hargnemisel alajaamas paiknev käsijuhtimisega koormuslahklüliti. Fiidril ei paikne ühtegi kaugjuhitavat elementi, rikkeindikaatorit ega häiresalvestit, mistõttu ei oma see täiendavate tegevusteta FLISR kasutamise potentsiaali.

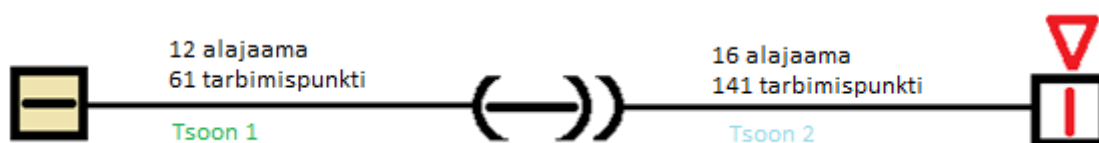
Fiider 07 koosneb toitel on 28 alajaama ning 205 tarbimispunkti. Normaallahutuspunkte on fiidril üks, milleks on kaugjuhitav võimsuslüliti nimivooluga 630 A. Fiidril on üks rikkeindikaator, mis ei ole kaugloetav ja paikneb fiidri lõpus - sellest edasi lahutuspunktini on 2 alajaama. Fiidri hargnemisel on kaugjuhtimisel alajaam, mis on võimeline võrguosa sektsioneerima, alajaama asukoht on selline, et sellest ülesvoolu jääb 12 alajaama ja 78 tarbimispunkti. Hargnemiste ees on releekaitsega võimsuslülitid, ühe haru toitel on 7 alajaama ja 26 tarbimispunkti ning tegemist on tupikharuga; alajaamast mööda teist haru allavoolu on 8 alajaama ja 94 tarbimispunkti ning haru lõpus eelnevalt kirjeldatud normaallahutuspunkt. Fiidri FLISR juhtimisvõimekust iseloomustav skeem on esitatud alltoodud joonisel 4.2.



Joonis 4.2 – Valjala fiider 07

Fiider 09 toitel on 21 alajaama ning 233 tarbimispunkti. Normaallahutuspunkte on üks ja seal paiknev lüliti on käsijuhtimisega lahküliti. Fiidril puuduvad telejuhitavad lülitusseadmed, rikkeindikaatorid ning rikkesalvestid. FLISR mooduli potentsiaal puudub.

Fiider 11 toitel on 28 alajaama ning 202 tarbimispunkti. Fiidri keskel on kaugjuhitav 25 A nimivooluga lahküliti, mis sektsioneerib fiidri kaheks: ülesvoolu jääb 12 alajaama ja 61 tarbimispunkti; allavoolu 16 alajaama ja 141 tarbimispunkti. Normaallahutuspunkt on telejuhitav 630 A nimivooluga võimsuslüliti, mille teine pool on sõltumatu piirkonnaalajaama, mida antud töös ei käsitleta, toitel. Rikkeindikaatoreid ega häiresalvesteid fiidril ei ole. Fiidri FLISR skeem on esitatud joonisel 4.3.



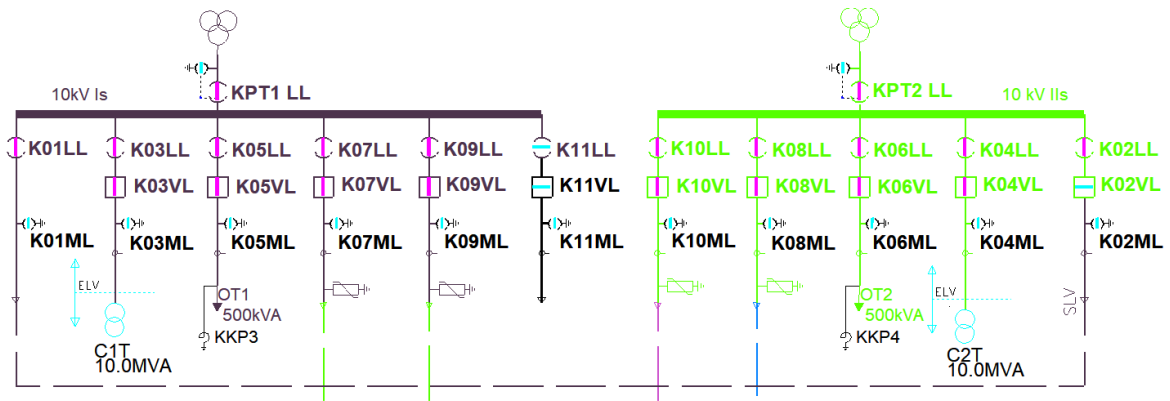
Joonis 4.3 - Valjala fiider 11

Fiider 13 toitel on 28 alajaama ning 270 tarbimispunkti. Tegemist on niinimetatud tupikfiidriga, millel puuduvad normaallahutuspunktid. See tähendab, et rikkelisest võrguosast allavoolu jäävatele tarbimispunktile üldjuhul (mõnel juhul võimalik toita mobiilse generaatori abil) kestab katkestus rikke likvideerimiseni. Fiidri magistraalliini hargnemisel kaheks paikneb kaugjuhitav alajaam, millel on 630 A nimivooluga releekaitsega varustatud võimsuslülitid hargnemiste ees. Kaugjuhitavast alajaamast ülesvoolu jääb 6 alajaama (61 tarbimispunkti), ühel hargnemisel 5 alajaama (91 tarbimispunkti) ja teisel hargnemisel 16 alajaama (102 tarbimispunkt). Kaugjuhitava alajaama enda toitel on 16 tarbimispunkti. Fiidril 13 puuduvad muud telejuhitavad elemendid, rikkeindikaatorid ja häiresalvestid. FLISR moodulil pole võimalik võrku kaitseelementidest allavoolu väiksemateks jaotada, samuti puudub reservtoite võimalus, mistõttu ei saa seda kasutusele võtta ja potentsiaalne mõju oleks ainult rikel, kus veakoht alajaamast edasi, kuid rakendub fiidri võimsuslülitid (täheks ebaselektiivsust, tõenäosus väike).

Fiider 15 toitel on 24 alajaama ning 324 tarbimispunkti. Võrguosas on kaks normaallahutuspunkti, neist üks on fiidri algusest allavoolu vaadates kolmandas alajaamas paikneva käsijuhtimisega koormuslahklüliti. Teine normaallahutuspunkt on kaugjuhitav lahklüliti, mille nimivool on 200 A. Fiidril ei ole ühtegi rikkeindikaatorit, samuti puuduvad kaugjuhitavad lülitusseadmed ja muud telemeetriaseadmed, mis tähendab ebasobivust FLISR moodulile.

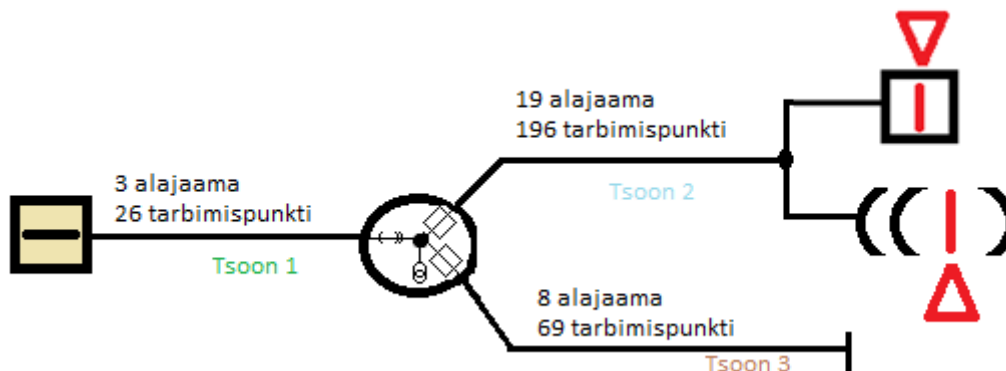
Fiider 17 toitel on 15 alajaama ja 132 tarbimispunkti. Normaallahutuspunkte on kaks, millest üks on käsijuhtimisega lahklüliti (nimivool 25 A) ning teine fiidri lõpus paiknevas alajaamas olev käsijuhtimisega koormuslahklüliti. Fiidril puuduvad rikkeindikaatorid, häiresalvestid ning telejuhitavad lülitusseadmed. Telejuhtimisega sektsioneerimise ja ümberlülitamiste võimekuse puudumisel ei ole sellel fiidril FLISR mooduli isetaastumise lahendus rakendatav.

Leisi 110/35/10 piirkonnaalajaama puhul vaadeldakse ainult 10 kV osa. *Elektrilevi* omandis olev 10 kV osa koosneb kahest sektsioonist, mis on omavahel reserveeritavad sektsioonidevahelise ühenduse ja sealsete lülitusseadmete kaudu. Alajaamal on mõlemal sektsioonil üks trafo fiider (erinevad trafod), üks omatarbe ja kaarekustutuspooli fiider. Väljuvaid fiidreid on kokku neli, mille eesolevad võimsuslülitid ja sinna juurde kuuluvad seadmed omavad lühisvoolu mõõtmise ning registreerimise võimekust, mis on eelduseks rikke asukoha määramisele. Fiidritele viidatakse joonisel 4.4 esitatud tunnuste (03, 05, ..., 10) abil.



Joonis 4.4 - Leisi 110/35/10 keskpinge (10 kV) seksioonid

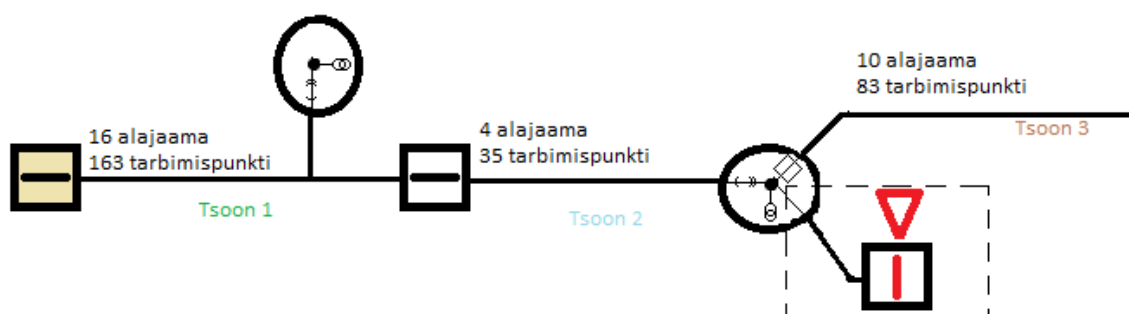
Fiider 07 toitel on 31 alajaama ning 294 tarbimispunkti. Toitealajaamast vaadates allavoolu neljanda alajaama latilt toimub fiidri hargnemine kaheks. Antud alajaam on kaugjuhitav ja hargnemiste ees on relekaitsega võimsuslülid. Hargnemisele eelnevas võrguosas normaallahutuspunkte ei ole. Ühe alajaamast allavoolu jääva haru toitel on 8 alajaama ja 69 tarbimispunkti, haru lõpus on normaallahutuspunkt käsijuhtimisel alajaamas koormuslahklüliti näol. Teise haru toitel on 19 alajaama ja 196 tarbimispunkti. Teise harul on kaks normaallahutuspunkti, millest mõlemad on kaugjuhitavad: võimsuslüliti (Orissaare 10135 toitel) ja koormuslahklüliti (Orissaare 10155). Peale hargnemisel paikneva kaugjuhitava alajaama ning kahe telejuhitava lahutuspunkti SCADA süsteemiga ühendatud seadmeid fiidril ei ole, samuti puuduvad rikkeindikaatorid ja häiresalvestid. Fiidril on FLISR mooduli kasutamise potentsiaal ning joonistatud piirkonnamudel on esitatud joonisel 4.5.



Joonis 4.5 - Leisi fiider 07

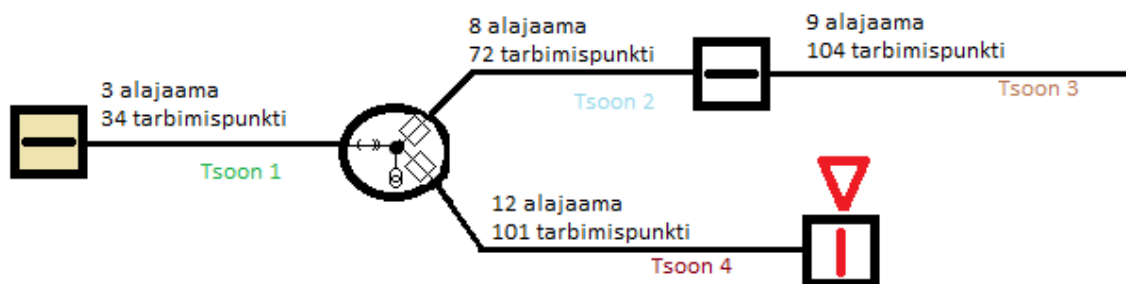
Fiider 09 toitel on 8 alajaama ja 174 tarbimispunkti. Fiidril puuduvad kaugjuhtimisega lülitusseadmed, rikkeindikaatorid ning häiresalvestid. Normaallahutuspunkte on fiidril 3 ja need kõik on käsijuhtimisega lahklülid (kahe puhul nimivool 630 A, ühe puhul 200 A). FLISR potentsiaal puudub.

Fiider 10 toitel on 31 alajaama ja 306 tarbimispunkti. Kaks alajaama on kaugjuhitavad, neist üks asub haruliini lõpus ning reservtoite võimalus puudub, samuti ei lähe alajaamast keskpinge võrk edasi. Teine kaugjuhitav alajaam paikneb magistraali keskel, sellest edasi allavoolu on 10 alajaama 83 tarbimispunktiga. Samuti paikneb nimetatud alajaamas fiidri ainus normaallahutuspunkt kaugjuhitava 630 A nimivooluga võimsuslüliti näol. Fiidri keskel on kaugjuhitav lahuspunkt, millel on pingetrafo ja releekaitsega varustatud võimsuslüliti. Lahutuspunkt seksioneerib fiidri kaheks: ülesvoolu jääb 16 alajaama ja 163 tarbimispunkti; allavoolu 15 alajaama ning 143 tarbimispunkti. Piirkonnamudel on esitatud joonisel 4.6.



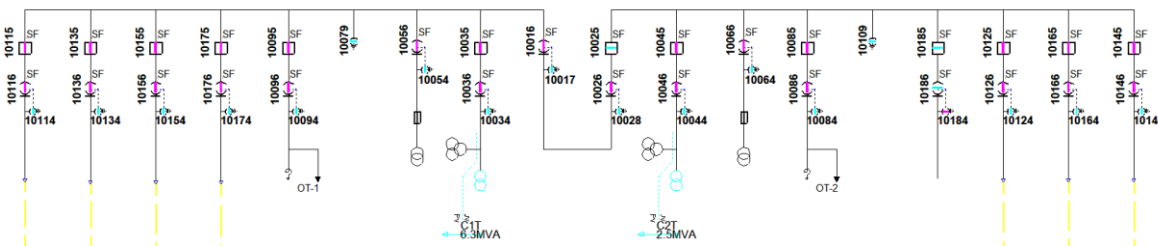
Joonis 4.6 - Leisi fiider 10

Fiider 08 toitel on 33 alajaama ja 317 tarbimispunkti. Fiidri hargnemisel on kaugjuhitav alajaam, haruliinide ees on releekaitsega võimsuslülitid. Ühel hargnemisel on 17 alajaama 176 tarbimispunktiga. Harul on seda seksioneeriv kaugjuhitav lahuspunkt, millest allavoolu jääb 9 alajaama 104 tarbimispunktiga ning üks rikkeindikaator, mis ei ole kaugloetav. Tegemist on tupikharuga ja reservtoite võimalus puudub. Teise haru toitel on 12 alajaama ja 101 tarbimispunkti. Haru lõpus on kaugjuhitav normaallahutuspunkt, kus asub 630 A nimivooluga võimsuslüliti. Enne kaugjuhitavat alajaama ülesvoolu on kolm normaallahutuspunkti, kus fiider 08 saab kokku sama alajaama fiider 09-ga. Normaallahutuspunktid on käsijuhtimisega lahkülitid. Fiidril rohkem telejuhitavaid või kaugloetavaid elemente ei ole. FLISR potentsiaali kirjeldav piirkonnamudel on esitatud joonisel 4.7.



Joonis 4.7 - Leisi fiider 08

Orissaare 110/10 piirkonnaalajaama keskpinge osa koosneb kahest 10 kV sektsioonist, mis saavad toidet kahest põhivõrguettevõtte trafost. Alajaamal on lisaks trafo, kaarekustutuspooli ja omatarbe fiidritele ning sektsioonidevahelisele ühendusele kokku seitse väljuvat fiidrit, mis on lühisvoolu registreerimise võimekusega rikke asukoha tuvastamiseks. Väljuvatele fiidritele viidatakse joonisel 4.8 esitatud võimsuslüliti tunnuse (10115, ..., 10175) abil.

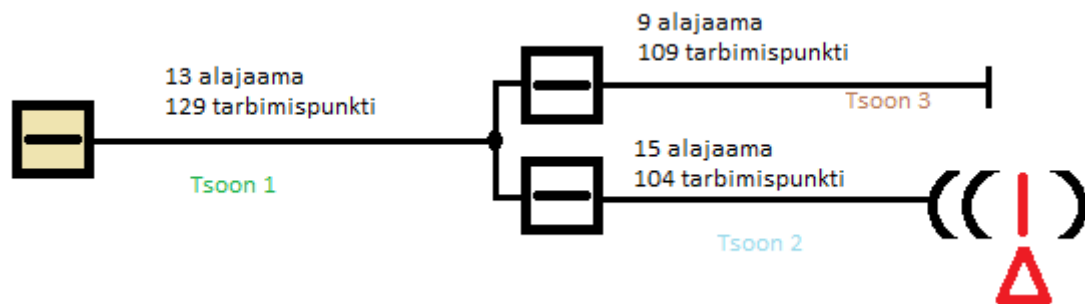


Joonis 4.8 - Orissaare 110/10 keskpinge sektsioonid

Fiider 10115 toitel on 11 alajaama ja 263 tarbimispunkti. Fiider koosneb täies ulatuses kaabelliinidest ja sellel puuduvad rikkeindikaatorid, häiresalvestid ning kaugjuhitavad elemendid. Fiidril on üks reservtoite võimalus normaallahutuspunkti näol, milleks on alajaamas paiknev koormuslahklüliti (Orissaare 10145 toitel). Puudub FLISR mooduli kasutamise potentsiaal.

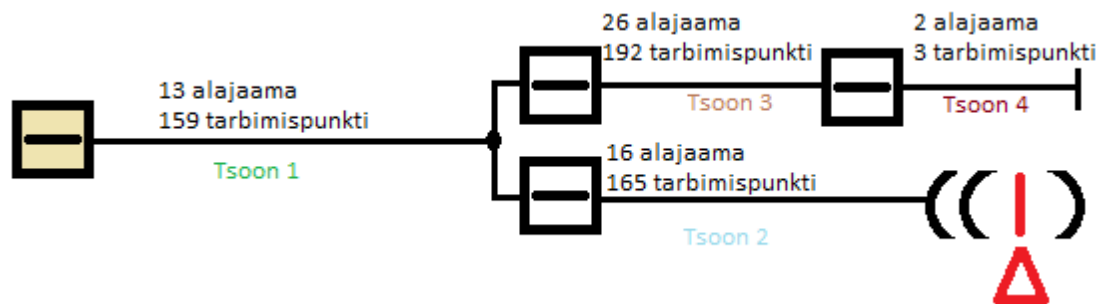
Fiider 10135 toitel on 23 alajaama ja 205 tarbimispunkti. Sellel on kaks normaallahutuspunkti, millest üks on pealülitist allavoolu esimeses alajaamas olev käsijuhtimisel koormuslahklüliti. Teine lahuspunkt paikneb fiidri lõpus ning on kaugjuhtimisega võimsuslüliti. Fiidril on kaks rikkeindikaatorit, mis ei ole kumbki kaugloetav. Häiresalvestit fiidril ei ole, samuti puuduvad kaugjuhitavad lülitusseadmed, mis tähendab, et FLISR mooduli kasutuselevõtt ei oma otsest mõju.

Fiider 10155 toitel on 37 alajaama ja 339 tarbimispunkti. Magistraalliini hargnemisel kaheks on mõlema haru ees lahuspunktid, mis on releekaitsega võimsuslülitid. Hargnemisest ülesvoolu jääb 13 alajaama, ühel harul 9 alajaama (106 tarbimispunkti) ning teisel harul 15 alajaama (104 tarbimispunkti). 9 alajaamaga haru on tupik ja reservtoite võimalus puudub, samuti puuduvad telejuhitavad elemendid. 13 alajaamaga haru lõpus on fiidri ainus normaallahutuspunkt, mis on kaugjuhitav koormuslahklüliti. Haru peal paikneb üks rikkeindikaator, mis ei ole kaugloetav. Häiresalvestit fiidril ei ole. Fiidri piirkonnamuudel on esitatud joonisel 4.9.



Joonis 4.9 - Orissaare fiider 10155

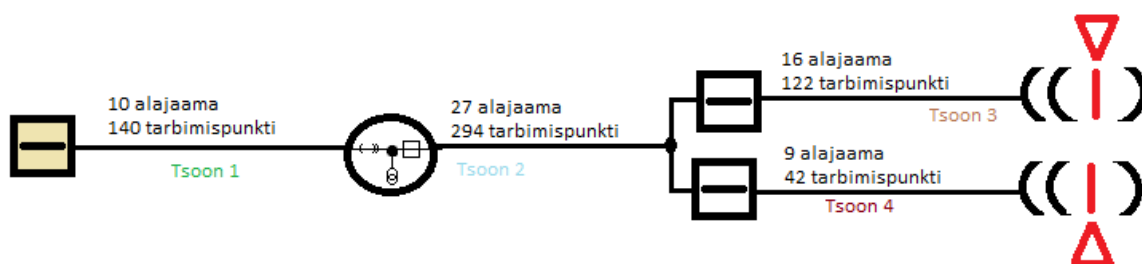
Fiider 10175 toitel on 57 alajaama ja 519 tarbimispunkti. Fiidril on kolm sektsioneerivat lahutuspunkti. Üks asub magistraalliini hargnemisel ning on ühe haru ees, sellest allavoolu jääb 16 alajaama (165 tarbimispunkti). Lahutuspunkt on releekaitsega kaugjuhitav võimsuslüliti, harul on kaks rikkeindikaatorit (ei ole kaugloetav) ning üks normaallahutuspunkt, milleks on kaugjuhitav koormuslahklüliti (Orissaare 10125). Magistraalliini teise haru peal on jadamisi kaks kaugjuhitavat lahutuspunkti võimsuslülite näol: esimesest allavoolu jääb 26 alajaama (192 tarbimispunkti), teisest allavoolu 2 alajaama (3 tarbimispunkti). Tegemist on tupikharuga, puudub normaallahutuspunkt. Kahe lahutuspunkti vahelises võrguosas on üks rikkeindikaator, mis ei ole kaugloetav. Magistraalliini hargnemisest ülesvoolu on kaks normaallahutuspunkti, mis on mõlemad käsijuhtimisega lülitid. Häiresalvesteid fiidril ei ole. FLISR moodulile sobiv fiider.



Joonis 4.10 - Orissaare fiider 10175

Fiider 10125 toitel on 63 alajaama ja 599 tarbimispunkti. Fiider suundub läbi kaugjuhitava alajaama (1 tarbimispunkti), mis on funktsioonilt nagu sektsioneeriv lahutuspunkt. Alajaamast ülesvoolu fiidri alguseni on 10 alajaama (140 tarbimispunkti), üks rikkeindikaator (ei ole kaugloetav) ja puuduvad normaallahutuspunktid. Alajaamast edasi mineva fiidri ees on kaugjuhitav releekaitsega võimsuslüliti, rikkeindikaator ning sellest allavoolu jääb 52 alajaama (458 tarbimispunkti). Ühe hargnemise ees lahutuspunkt, mis on kaugjuhitav releekaitsega võimsuslüliti. Haru peal on 9 alajaama, 42 tarbimispunkti, üks rikkeindikaator (ei ole kaugloetav) ning haru lõpus on

normaallahutuspunkt, kus on kaugjuhitav koormuslahklüliti. Fiidri kolmas lahutuspunkt on kaugjuhitav releekaitse võimsuslüliti, millest allavoolu jääb 16 alajaama (122 tarbimispunkti) ja kaugjuhitav normaallahutuspunkt (200 A koormuslahklüliti, Orissaare 10175). Kaugjuhitava alajaama ja nimetatud lahutuspunktide vahele jäävas võrguosas on 27 alajaama 294 tarbimispunktiga ning üks rikkeindikaator (ei ole kaugloetav). Normaallahutuspunkte selles võrguosas ei ole. FLISR mooduli juhitud piirkonnas on esitatud joonisel 4.11.



Joonis 4.11 - Orissaare fiider 10125

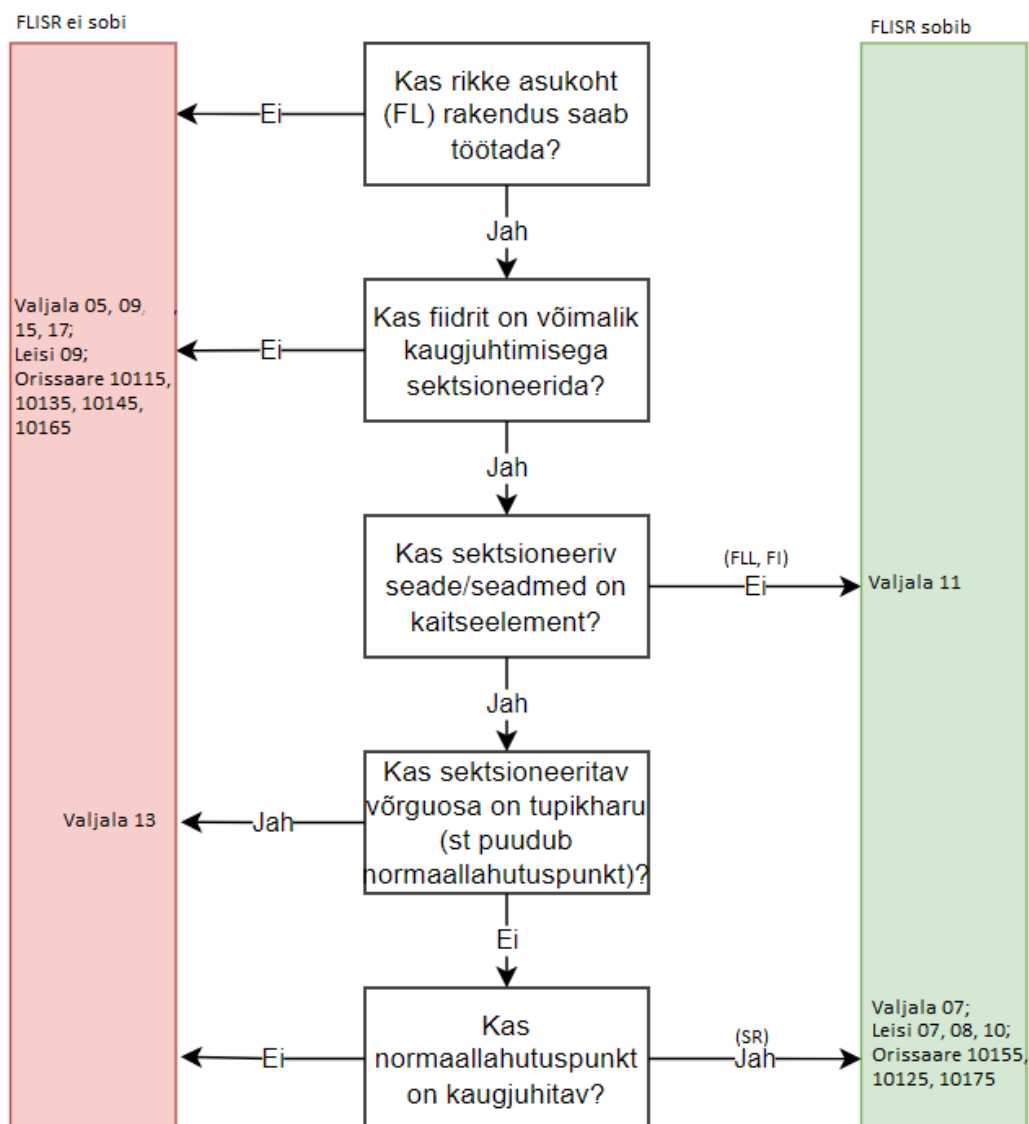
Fiider 10145 toitel on 2 alajaama ja 59 tarbimispunkti. Fiidri kõik liinid on kaabelliinid. Sellel ei ole ühtegi rikkeindikaatorit, kaugjuhitavat elementi ega häiresalvestit. Olemas on kaks normaallahutuspunkti, mis on käsijuhtimisega koormuslahklülid. FLISR mooduli kasutuselevõtu potentsiaal tänases seisukorras puudub.

Fiider 10165 toitel on 2 alajaama ja 6 tarbimispunkti, sellel puuduvad kaugjuhitavad elemendid, rikkeindikaatorid ja häiresalvesti. Fiidril on üks normaallahutuspunkt, mis ei ole kaugjuhitav. FLISR moodul ei ole võimeline lahendama ilma täiendavate investeeringute tegemist sellele fiidritele.

4.2.2 FLISR rakenduse kasutuselevõtu sobivuse hindamise kirjeldamine

FLISR mooduli isetaastumise kasutuselevõtu hindamiseks on eelnevas alapeatükis kaardistatud kõik fiidrite kaugjuhitavad elemendid, rikkeindikaatorid, häiresalvestid ja normaallahutuspunktid ning seal paiknevad lülid. Automaatse isetaastumise esimeseks eelduseks on, et süsteem oleks võimeline fiidri kohta tegema veakoha arvutuse. See tingimus on täidetud kõigil fiidritel, sest kõik antud piirkonnaalajaamades paiknevad väljuvate fiidrite seadmed registreerivad ja edastavad lühisvoolu suurust, mille abil saab teostada rikke asukoht (FL) rakendus lahenduse. Teine eeldus on kaugjuhitavate lülitite olemasolu vähemalt sellises mahus, et fiidrit oleks võimalik sektsioneerida kaheks osaks. See tähendab, et minimaalselt peab fiidril olema üks kaugjuhitav lülitusseade.

FLISR kasutuselevõtu võimaluste hindamist kirjeldab alljärgneval joonisel 4.12 esitatud algoritm, kus vähemalt üks fiidri osa või haru peab vastama kirjeldatud tingimustele:



Joonis 4.12 - FLISR mooduli sobivuse hindamise algoritm

Joonisel 4.12 on ühtlasi ka kajastatud, millise algoritmi sammu juures vaadeldud fiidrite sobivus või mitesobivus määrati. Need jaotuvad nelja gruppi. Esimene mitesobivate grupp on selline, kus fiidril puuduvad kaugjuhitavad elemendid võrgu seksioneerimiseks. Sellisel juhul ei saa FLISR lahendus pärast rikke asukoha tuvastamist automaatselt ühtegi sammu ette võtta, sest pole võimalik jaotada võrku eri osadeks. Teine mitesobivate grupp on selline, kus fiidril on küll kaugjuhitav lülitusseade, kuid seksioneeriv lüliti on kaitseelement (antud juhul releekaitsega võimsuslüliti) ning fiidrist lahutatavatel võrguosadel puudub reservtoite võimalus. Sellisel juhul on sisuliselt kaks võimalust: kui rike tekib lülitist allavoolu, siis võimsuslüliti

rakendub ning FLISR ei saa veakohta kitsendada ega tarbijaid toita; kui rike tekib lülitist ülesvoolu, siis rakendub fiidri võimsuslülitist ning moodulil samuti pole võimalik ühtegi edasist sammu teha. Eksisteerib küll võimalus, et rike tekib lülitist allavoolu ning rakendub fiidri lülitist piirkonnaalajaamas, kuid sellisel juhul on tegemist võimsuslülitist tõrke, mõõteandmete vea või muu anormaalse olukorraga, mille puhul mooduli tegevus on raskendatud. Esimene sobivate grupp on selline, kus kaugjuhitav lahutuspunkt ei oma kaitsefunktsionaalsust, mis tähendab, et rikke korral nimetatud lülitusseadme allavoolu, rakendub fiidri võimsuslülitist ja FLISR lahendusel on võimalik võrguosa eraldada ning rikke asukoha arvutuse alusel lülitist ülesvoolu pingestada. Teine sobivate grupp on selline, kus nii lahutuspunkt kui normaallahutuspunkt on telejuhitavad, mis annab FLISR moodulile võimaluse töötada. Analüüsiti kolme piirkonnaalajaama väljuvaid fiidreid (18 tk), mille toitel 474 alajaama ja 4734 tarbimispunkti. Nendest 8 (44,4 %) puhul on esmase hinnangu alusel ilma täiendavate investeeringuteta võimalik kasutada FLISR mooduli funktsionaalsust. Moodulile sobivate fiidrite toitel on vaadeldavast võrguosast 65 % KP/MP alajaamadest ja 59 % tarbimispunktidest. Sellest võib järeldada, et võrguinvesteeringuid, mille tulemusel on fiidri automatiseerimise tase piisav moodulile, on olnud suunatud suuremate kliendiarvudega fiidritele. Samuti moonutab keskmiseid suurusi Orissaare fiider 10145 ja 10165, mille toitel on suurtarbijate ja sellest tulenevalt fiidriga elektrilises ühenduses olevate alajaamade ja tavatarbijate arv väiksem. Kliendipunktide ja alajaamade arvud fiidrite lõikes ning isetaastuva võrgu lahenduse kasutuselevõtu sobivuse alusel liigitatud andmed esitatakse järgnevas tabelites:

Tabel 4.1 - Fiidrite ülevaade, kus mooduli kasutuselevõtt eeldab täiendavaid tegevusi

FLISR rakendamine ei oma mõju			
Alajaam	Fiidri tunnus	Alajaamade arv	Tarbimispunktide arv
Leisi 110/35/10	09	8	174
Orissaare 110/10	10115	11	263
Orissaare 110/10	10135	23	205
Orissaare 110/10	10145	2	59
Orissaare 110/10	10165	2	6
Valjala 110/10	05	32	287
Valjala 110/10	09	21	233
Valjala 110/10	13	28	270
Valjala 110/10	15	24	324
Valjala 110/10	17	15	132
Kokku:		166	1953

Tabel 4.2 - Fiidrite ülevaade, kus mooduli kasutuselevõtt on potentsiaalselt võimalik

FLISR rakendamine omab potentsiaalselt mõju			
Alajaam	Fiidri tunnus	Alajaamade arv	Tarbimispunktide arv
Leisi 110/35/10	07	31	294
Leisi 110/35/10	08	33	317
Leisi 110/35/10	10	31	306
Orissaare 110/10	10125	63	599
Orissaare 110/10	10155	37	339
Orissaare 110/10	10175	57	519
Valjala 110/10	07	28	205
Valjala 110/10	11	28	202
Kokku:		308	2781

Esitatud tabelite abil saab järeldada, et automatiseerimise tase FLISR mooduli rakendamiseks on piisav nendel fiidritel, kus alajaamade ning tarbimispunktide arv on suurem – sobivatel keskmine alajaamade arv 38,5, keskmine tarbimispunktide arv 347,6; mitesobivatel keskmine alajaamade arv 16,6, tarbimispunktide arv 195,3.

4.2.3 Möödunud rikete statistika

Käesolevas peatükis esitatakse valitud piirkonnaalajaama väljuvate fiidrite rikete statistika ja nende SAIDI aastate lõikes. Andmed pärinevad ettevõtte kasutatavatest töörakendustest ning vaadeldud on rikkeid, kus märgitud võrguosaks piirkonnaalajaama väljuv fiider. Vaadeldi ainult kliendikatkestusega keskpinge rikkeid, mille kestvus oli üle 3 minuti ehk tegemist oli püsirikkega (TLA ebaedukas).

Valjala 110/10 piirkonnaalajaama väljuvate fiidrite rikete statistika aastatel 2016-2020 on esitatud alljärgnevas tabelis:

Tabel 4.3 – Valjala piirkonnaalajaama rikete statistika

Fiider	2016		2017		2018		2019		2020	
	Rikete arv	SAIDI kokku	Rikete arv	SAIDI kokku	Rikete arv	SAIDI kokku	Rikete arv	SAIDI kokku	Rikete arv	SAIDI kokku
05	3	0,1192	4	0,2375	2	0,4784	7	0,4938	3	0,0524
07	4	0,1690	9	0,2584	4	0,3562	5	0,2552	8	0,2828
09	2	0,0524	2	0,0171	2	0,3777	1	0,0632	2	0,0560
11	8	0,1225	8	0,2158	8	0,3127	9	0,3504	8	0,3386
13	7	0,8179	3	0,0685	6	0,3545	2	0,0630	4	0,1489
15	1	0,0032	3	0,0719	2	0,0124	1	0,0156	5	0,0324
17	3	0,0301	0	0	0	0	1	0,00498	4	0,06289
Kokku:	28	1,3145	29	0,8693	24	1,8917	26	1,2461	34	0,9740

Leisi 110/35/10 piirkonnaalajaama väljuvate fiidrite statistika on esitatud tabelis:

Tabel 4.4 – Leisi piirkonnaalajaam rikete statistika

	2016		2017		2018		2019		2020	
Fiider	Rikete arv	SAIDI kokku	Rikete arv	SAIDI kokku	Rikete arv	SAIDI kokku	Rikete arv	SAIDI kokku	Rikete arv	SAIDI kokku
07	4	0,1106	2	0,0012	4	0,0671	2	0,1001	4	0,0349
09	1	0,0067	1	0,0025	0	0	0	0,0000	0	0
08	3	0,0875	8	0,3998	6	0,3641	2	0,1014	5	0,1729
10	4	0,3017	1	0,0145	7	0,2252	5	0,3307	5	0,1985
Kokku:	12	0,5065	12	0,4180	17	0,6565	9	0,5322	14	0,4063

Orissaare 110/10 piirkonnaalajaama väljuvate fiidrite statistika:

Tabel 4.5 – Orissaare piirkonnaalajaama rikete statistika

	2016		2017		2018		2019		2020	
Fiider	Rikete arv	SAIDI kokku	Rikete arv	SAIDI kokku	Rikete arv	SAIDI kokku	Rikete arv	SAIDI kokku	Rikete arv	SAIDI kokku
10115	1	0,0312	0	0	0	0	0	0	0	0
10135	2	0,1222	1	0,1405	1	0,0265	1	0,0287	1	0,0361
10155	6	0,1359	1	0,1018	5	0,2501	2	0,0062	2	0,0205
10175	5	0,4566	6	0,2322	7	0,1213	0	0	3	0,0250
10125	7	0,1585	4	0,3148	4	0,0130	0	0	6	0,0272
10145	3	0,0299	0	0	0	0	1	0,0001	1	0,0012
10165	0	0	1	0,0001	0	0	0	0	0	0
Kokku:	24	0,9343	13	0,7893	17	0,4110	4	0,0349	13	0,1100

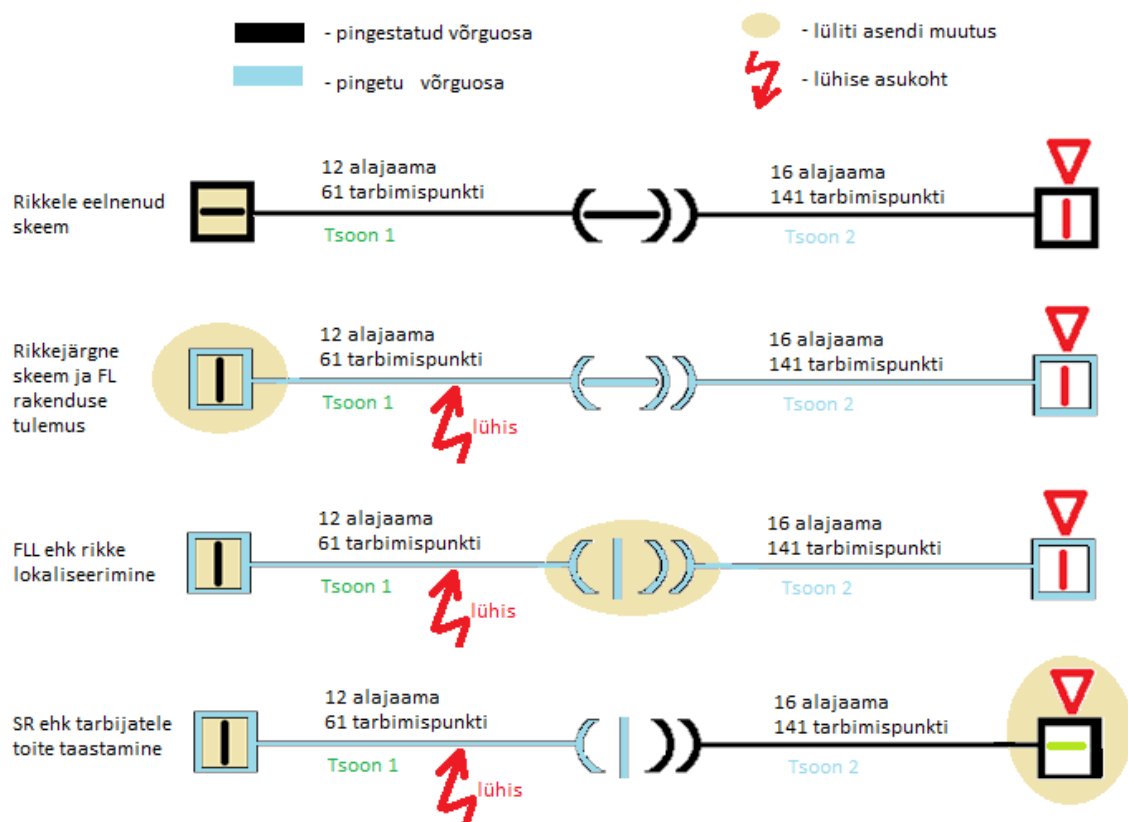
Keskmiselt on vaadeldavate fiidrite panus olnud kogu *Elektrilevi* võrgu SAIDI statistikasse 1,46 % (2016 - 1,69 %; 2017 - 1,98 %; 2018 - 2,09%; 2019 - 0,67 %; 2020 - 0,86 %). Võttes aluseks, et antud võrguosa toitel on 4 734 tarbimispunkti (0,88 % *Elektrilevi* tarbijatest), siis võib öelda, et tegemist on keskmisest kehvema varustuskindluse piirkonnaga. Valdavalt on rikete põhjusteks juhtme, sideme või masti rike, mille on esile kutsunud puude ja okste murdumine liinile. See tähendab, et rikete tõenäosus ja sagedus suureneb tormiste ilmastikuolude esinemisel, mil on ka dispetšeri töömaht suur ja esimese katkestust korrigeeriva lülituse aeg võib olla üsna pikk. Järgnevas alapeatükis vaadeldakse millist mõju kvaliteedinäitajatele avaldaks FLISR mooduli kasutuselevõtt valitud piirkonnas rikete lahendamisel.

4.3 Mooduli katsetamine reaalsete möödunud sündmustega

Eelnevate peatükkide alusel saab järeldada, et FLISR mooduli tegevus võimaldab vähendada eelkõige keskpinge rikete menetlusaega ja taastada telejuhitavuse alusel sektioneeritud võrgu tervetele osade elektrivarustus kiiremini kui inimene. FLISR mooduli tegevuse hindamiseks analüüsitakse 2022. aasta esimese kvartali rikkeid, mis toimunud valitud piirkonnaalajaamade eelnevalt kaardistatud moodulile sobivatel fiidritel. Rikete valimisse kuuluvad ajaraamistikus toimunud rikked, kus on rakendunud piirkonnaalajaama või osadel fiidritel (Leisi 08, 10; Orissaare 10125) keskosa võimsuslüli releekaitsest (katkestuse looja ei ole dispetšer), rikke pingeaeg on 10 kV ja katkestuse kestvus on üle 3 minuti ehk tegemist on keskpinge püsirikkega. Rikete lahendamisel võetakse aluseks, et rikke asukoha rakendus on suutnud kõigil juhtudel määrata õigesti viga sisaldava tsooni ja taastamist vaadeldakse rikke tekkimisel olnud reaalses skeemis. Hüpooteetilise lahenduse juures võetakse aluseks konservatiivselt, et iga FLISR rakenduse (FL, FI, SR) käitamine on kestvusega 1 minut. Hinnatakse rikete lahendust kuni esimese käsijuhtimisel lülitamiseni lülitamiste registris, sest see tähendab rikkebrigaadi kohalejõudmist ja võrreldakse katkestuse mõju kvaliteedinäitajatele tegeliku ning teoreetilise FLISR lahenduse juures. Hinnatakse kliendi katkestuste kogukestvust, mis on SAIDI arvutamiseks vajalik suurus ja mille ühik on minut. Suuruse arvutuskäik on selline, kus korrutatakse katkestatud tarbijate kogus katkestatud minutitega. Saadud numbri SAIDI väärtuse leidmiseks jagatakse leitud kogukestvus koguklientide arvuga.

Metoodika näitena kirjeldatakse Valjala piirkonnaalajaam fiider 11 ühe rikke tegevused lahti, teiste rikete puhul esitatakse lahendus töö loetavuse huvides lühidamalt ja detailsem lahendus esitatud lõputöö lisadena. Rikke algus 17.02 kell 19:14:58, esimese käsijuhtimisel lülitamise kellaeg 21:03:21 (1h 48 min 23 sek pärast katkestuse algust), vahepealseid riket korrigeerivaid lülitamistoiminguid andmebaasid ja logid ei kajasta. Enne esimest käsijuhtimisel tehtud lülitamistoimingut oli katkestus 202 liitumispunktile kestvusega 108,38 minutit ehk katkestuse kogukestvus $202 * 108,38 = 21\,892,8$ minutit (SAIDI: $21\,892,76 / 533\,000 = 0,0411$ minutit). Katkestatud võimsus esimese lülitamisega on 365,66 kW, mis tähendab vaadeldavas ajaraamistikus andmata energiat $365,66 \text{ kW} * 1,81 \text{ h} = 661,8 \text{ kWh}$. Tõenäoline põhjus, miks enne brigaadi jõudmist korrigeerivaid lülitustoiminguid ei tehtud, on asjaolu, et tegemist on tormi ajal tekkinud rikkega ning samaaegsete rikkesündmuste arv oli 25. Sellistel hetkedel on dispetšeri töökoormus oluliselt suurenenud ja manuaalselt SCADA-s esimest riket korrigeeriva lülituseni võib minna kohati tunde, olenevalt olukorrast ja konkreetsest indiviidist.

Hüpoteetilise lahenduse juures eeldatakse, et kasutusele on võetud automaatne FLISR ja lahendus toimub süvaotsingu meetodil, ehk rikke tekkimisel avatakse kõik kaugjuhitavad lülitid ning hakatakse järk-järgult pingestama. Antud käsitluses võetakse aluseks, et ettevõtte ei ole teinud modifikatsioone FLISR lahendusele ja isetaastumine käib peatükis 3 kirjeldatud metoodika kohaselt. Hüpoteetilise lahenduse korral on rikke algusaeg sama ja ühe minuti pärast on rikke asukohta rakendus lõpetanud veakoha analüüsi. Konkreetse katkestuse rikke asukoht rakenduse arvutuse tulemus on esitatud Lisas 1. Rakendus tuvastas õigesti riket sisaldava tsooni ja täpsusklass on antud juhul selline, et rakendus oleks õige tsooni leidnud ka siis, kui kõik fiidri lülitusseadmed oleksid kaugjuhitavad ja tsoonide arv oleks mitmekordne. Seejärel toimub rikke lokaliseerimine ehk automaatse FLISR lahenduse juures avatakse kõik fiidri kaugjuhitavad lülitid ja proovipingestatakse osade kaupa. Antud juhul on fiidril enne normaallahutuspunkti ainult üks kaugjuhitav element, mis avatakse ja proovipingestatakse tsoon 1. Seejärel rakendub uuesti piirkonnaalajaamas fiidri võimsuslüliti, mis tähendab moodulile, et veakoha arvutus on õige ja tsoon 1 sisaldab riket. Moodul võtab eelduseks, et tegemist on ühe rikkega ning tsoon 2 on rikkevaba, mistõttu pingestatakse see kaugjuhitava normaallahutuspunkti kaudu, kui sealt teisele poole jääv võrguosa seda võimaldab (pingestatud, piirangud puuduvad). Mooduli töötamist kirjeldab allolev joonis 4.13:



Joonis 4.13 - FLISR näidisrikke lahendus

Iga järgneva sammu ajaline vahe kirjeldatud metoodika kohaselt on 1 minut. 19:14:58 tekib katkestus 202 tarbimispunktile; 19:15:58 on olemas rikke asukoha arvutus; 19:16:58 on avatud kaugjuhitavad lülitid ja toimunud ebaedukas tsoon 1 proovipingestamine; 19:17:58 on toidetud normaallahutuspunkti kaudu tsoon 2. Esimese käsijuhtimisel lülitustoimingu kellaaeg 21:03:21. Selliselt hinnates kujunevad katkestusminutit järgmiselt: $3 * 202 + 105,38 * 41 = 4\,926,6$ minutit (SAIDI 0,0092 minutit). Andmata energia on $365,66 \text{ kW} * 0,05 \text{ h} + 52,58 * 1,76 \text{ h} = 110,8 \text{ kWh}$.

Võrreldes konkreetse rikke tegelikku lahendust hüpoteetilisega, väheneb enne operatiivbrigaadi kohapeale jõudmist katkestuse kogukestvus 77,5 % ning andmata energia hulk 83,3 %. Samas suureneb võimsuslüli lühisele lülitamiste arv ühe võrra ning tsoon 1 tarbijatel toimub nn vilgutamine ehk lühiajaline pingestamine, kui võrguosa sisaldab riket. See tähendab võimsuslüli ressursi vähenemist ja proovipingestamine võib häirida tarbijate seadmeid. Nimetatud asjaolud tõstavad esile küsimuse, kas selliste võrguosade, kus automatiseerimise tase on küllaltki madal ja moodulile tekkivaid tsoone on vähe, on võimalik FLISR lahendus seadistada rikke asukoha (FL) tulemustest lähtuvalt jätta FLL osa vahele ning teostama rikke eraldamise ja tarbijatele toite taastamise rakendused.

Järgnevalt antakse ülevaade FLISR mooduli tegevustest valitud fiidrite rikete puhul, kui rakendunud on võimsuslüli piirkonnaalajaamas. Iga rikke puhul antakse ülevaade katkestuse kogukestvusest, lühisele lülitamiste arvust ja andmata energiast enne brigaadi kohapeale jõudmist. Andmata energia on tarbimispunkti eelneva aasta tarbimine jagatud 8760-ga ning korrutatud katkestuse kestvusega tundides, sellekohased andmed on kasutatud infosüsteemi eelnevalt sisestatud. Eelnevalt on mainitud, et metoodika kohaselt võetakse kasutusele lihtsustus, et iga FLISR mooduli etapp on kestvusega üks minut. See tähendab, et iga rakenduse tegevused on tabelis kirjeldatud üheminutilise ajaakna sees. Selline käsitlus on aktsepteeritav, sest tegelik etapi kiirus sõltub andmeedastus ja -töötlus võimekusest, kaugjuhitavate lülitite arvust ja omapäradest ning muudest tehnilistest omadustest. Rikke asukoht rakendus annab väljundi tavaliselt mõne sekundiga ning selline käsitlus annab piisavalt täpse ülevaate mõjust vaadeldavatele kvaliteedinäitajatele. Metoodika ei sobi hindamaks, millistel juhtudel jääb katkestus tarbijatele alla 3 minuti, mis on mõningate käsitluste kohaselt aeg, millest edasi loetakse katkestus püsirikkeks.

Valjala 110/10 piirkonnaalajaama **fiider 11** võimsuslüli rakendumisest tekkinud sobivaid rikkeid on vaadeldava ajaperioodi jooksul neli, nendest üks on esitatud näidisrikkena. Riketele omistatakse järjekorranumbrid, mille neile ülevaate tegemisel viidatakse.

Rike 2 (esitatud Lisa 2) puhul on tegemist tormirikkega (kuulutati välja eriolukord) ja esimene käsijuhtimisel lülitamine toimub 15 h ja 24 minutit pärast katkestuse algust, dispetšer alustab riket korrigeerivaid lülitusi 47 minutit pärast katkestuse algust. Dispetšer ei proovipingesta tervet fiidrit, seksioneerib kaugjuhitava lahutuspunkti abil ning pingestab tsoon 1 (joonis 4.3). Tsoon 2 jääb kontrollimata. Tõenäoliselt eeldati, et tsoon 2 sisaldab riket ja edasisi toiminguid enne rikkebrigaadi kohalejõudmist ei teatud. Riket ei leitud ning koostöös kohapealse lülitusmeeskonnaga pingestati terve fiider edukalt. Võimatu olemasolevate andmete põhjal hinnata, kas tegemist oli sellise mööduva lühisega, mis oleks möödunud olnud ka esimesel proovipingestamisel, seetõttu esitatakse 3 hüpoteetilist lahendust (rike tsoonis 1, tsoonis 2 või proovipingestamine edukas). Reaalse rikke puhul kogukatkestus 133 125,1 minutit (SAIDI 0,2498 minutit) ja andmata energia 5 129,6 kWh enne kohapealseid lülitusi, lühisele lülitamisi ei toimunud. Hüpoteetiliste lahenduste juures kogukatkestus vahemikus 413,5 kuni 130 450,8 minutit, andmata energia 11,3 kuni 4 838,6 kWh, lühisele lülitamisi 0 kuni 1.

Rike 3 (Lisa 3) puhul toimus võimsuslüliti rakendumisel edukas proovipingestamine 23 minutit ja 40 sekundit pärast rikke algust, kogukestvus 4 781,3 minutit (0,0090 minutit SAIDI), andmata energia 142,6 kWh. FLISR lahenduse korral kogukestvus 181,9 minutit (SAIDI 0,0003 minutit), andmata energia 5,9 kWh. Lühisele lülitamisi ei olnud kumbagi lahenduse juures.

Rike 4 (Lisa 4) reaalse lahenduse juures on toimunud ilma fiidrit seksioneerimata 2 ebaedukat proovipingestamist, mis mõlemad on toimunud vahetult enne esimest käsijuhtimisel lülitustoimingut. Proovipingestamised toimusid vahemikus 2h 29 min – 2h 32 min pärast katkestuse algust. Enne käsijuhtimisel lülitust oli kogukestvus 30 865,6 minutit (SAIDI 0,0579) ja andmata energia 932,4 kWh. FLISR hüpoteetilise lahenduse korral kogukestvus 21 756 minutit (SAIDI 0,0416) ja andmata energia 800,1 kWh, samuti vähenes lühisele lülitamiste arv ühe võrra.

Fiider 07 rikkeid on vaadeldava perioodi jooksul 6, nendest üks on kestvusega alla kolme minuti ja kahe puhul oleks olnud rike moodulile kõlbulik, aga samal ajal oli normaallahutuspunktist teisele poole jääv võrk pingetu, tegemist tormiaegsete riketega. Esimene käsitletav on rike 5 (lahendus Lisa 6), mille põhjustas juhtmekiu katkemine. Rikke asukoht rakenduse väljund on esitatud Lisa 5 all ja antud juhul oli täpsusklass väga hea – reaalne asukoht on üks mastivahe arvutatust allavoolu. Reaalse lahenduse juures toimub kiiresti ebaedukas proovipingestamine, seejärel 10 minutit pärast katkestuse algust lahutatakse tsoon 1 ja toimub taaskord ebaedukas proovipingestamine (2 lühisele lülitamine), misjärel toidetakse tsoon 2 ja 3

normaallahutuspunkti kaudu (13 minutit pärast katkestuse algust). Esimene käsijuhtimisel lülitamine 46 minutit algusest. Reaalse lahenduse vaadeldava osa kogukestvus 10 290,8 minutit (SAIDI 0,0193), andmata energia 328,3 kWh. Hüpooteetiline lahendus on sisuliselt sama, kuid kiirem ja üks tsoon 1 lühisele lülitamine vähem, kogukestvus 3 852,3 minutit (SAIDI 0,0072), andmata energia 310,9 kWh.

Rike 6 lahendused on esitatud lisa 7 juures. Antud rikke korral teostab dispetšer ebaeduka proovipingestamise tervele fiidri 1 min 20 sekundi jooksul pärast väljalülitumist. Seejärel võetakse kaugjuhitava alajaama sisend välja ning pingestatakse normaallahutuspunktist tsoonid 2 ja 3 neli minutit ja 32 sekundit pärast katkestuse algust. Esimese käsijuhtimisel lülitamise ja vaadeldava osa lõpu aeg on 81 minutit ja 23 sekundit katkestuse algusest. Hüpooteetilise lahenduse juures on lühisele lülitamiste arv sama (1 tk) ja lahenduse kiirus samuti võrreldav, erineb ainult proovipingestamise meetodika (reaalse korral terve fiider korruga, FLISR puhul tsoonide kaupa). Reaalse lahenduse kogukestvus 6 916,2 minutit (SAIDI 0,0129), andmata energia 545,1 kWh; hüpooteetilise lahenduse kogukestvus 6 627,2 minutit (SAIDI 0,0124), andmata energia 535,9 kWh.

Rike 7 on erandlik ja seda käsitletakse tulemuste all eraldi. Tegemist oli rikkega, mis tekkis tormi ajal ja dispetšeri lahendus oli järgnev: 5 minutit pärast katkestuse algust teostati tervele fiidri ebaedukas proovipingestamine; 55 minutit pärast katkestuse algust võeti kaugjuhitava alajaama sisend välja ja teostati tsoon 1 edukas proovipingestamine; seejärel võeti tsoon 2 ja 3 võimsuslülitid välja ning pingestati kaugjuhitav alajaam, pärast mida lülitati tsoon 2 ja 3 võimsuslülitid sisse. Uuesti ükski lüliti releekaitsest ei rakendunud ja kõik tarbijad olid pingestatud telelülitamistega 57 minutit pärast katkestuse algust. Antud rikke puhul oli esimene proovipingestamine ebaedukas, mis tähendab, et lühis ei olnud koheselt mööduv. Samas hilisem proovipingestamine oli edukas, mille alusel võib eeldada, et lühist põhjustas näiteks puuoks liinil ja tormised ilmastikutingimused eemaldasid selle lülitamiste vahepealsel ajal. SCADA logist välja võetud lühisvool on esitatud Lisas 8 (Rike 7 lühisvool), tegemist ühefaasilise maalühisega. Lõputöö ettevõtte poolse juhendaja poolt tagantjärgi teostatud rikke asukoht rakenduse väljund on esitatud Lisa 9 all, riket sisaldab tsoon 1. FLISR lahenduse juures oleks kõik rakenduse etapid teostatud esimese 5 minuti jooksul, mil lühise põhjus polnud möödunud/eemaldunud. Täpseid lahendusi kirjeldavad lülitamiste registrid on esitatud Lisas 10, kuid kokkuvõtvalt: reaalse rikke lahenduse juures SAIDI minuteid 0,0214; hüpooteetilise lahenduse korral taastati tsoon 2, 3 ja kaugjuhitava alajaama toide 3 minuti jooksul, tsoon 1 pingestamine brigaadi jõudmisel või edasiste tegevuste korral oleks pidanud toimuma 143,5 minuti jooksul, et FLISR isetaastuv lahendus ei omaks antud juhul kvaliteedinäitajatele negatiivset mõju.

Leisi 110/35/10 piirkonnaalajaama **fiider 07 ja 10** puhul ei ole 2022. aasta jooksul valimi kriteeriumitele vastavaid rikkeid esinenud ei ole. **Fiider 08** puhul on vaadeldava perioodi jooksul toimunud kolm väljalülitumist, nendest kahe puhul on proovipingestamine olnud edukas ja katkestuste kestvused 46 sekundit ning 2 minutit ja 18 sekundit, mistõttu ei vaadelda. Kolmandale viidatakse kui rike 8 (lahendus Lisa 12), selle katkestuse rikke asukoht rakenduse väljund on esitatud Lisa 11 all. Tegemist on samuti tormi tõttu välja kuulutatud eriolukorra rikkega ja antud juhul rikkekoha arvutus ei andnud õiget tulemust, sest rikkekohti oli korraka kolm. Neile viidatakse joonisel 4.7 kujutatud tsoonidega: tsoon 2 lõpus (vahetult enne lahtuspunkti) oli mast murdunud ja puu visangus; tsoon 3 lõpus (2 km enne tupikut) oli puu visangus; tsoon 4 lõpus (mõnisada meetrit enne normaallahutuspunkti) oli puu visangus. Tegemist erandliku rikkega, sest üheaegselt tekkinud rikete tulemusel on kaitseelementide selektiivsus häiritud, kaugjuhitavas alajaamas väljuvate haruliinide võimsuslüliti ei ole rakendunud ja rakendus fiidri võimsuslüliti. Proovipingestamise järel on rakendunud tsoon 2 võimsuslüliti samaaegselt piirkonnaalajaama omaga, millest võib eeldada, et rikked on tekkinud samal ajal. Reaalse katkestuse kogukestvus enne käsilülitamist oli 66 880,6 minutit (SAIDI 0,1255) ja andmata energia 1 647,7 kWh, lühisele lülitamisi üks. Hüpotetilise rikke lahenduse korral on katkestuse kogukestvus 59 287,5 minutit (SAIDI 0,1112), andmata energia 1539,1 kWh, lühisele lülitamiste arv kaks.

Orissaare 110/10 piirkonnaalajaama **fiider 10155 ja 10175** puhul puuduvad kirjeldatud kriteeriumitele vastavad püsirikked ajaraamistikus. **Fiider 10125** puhul toimus vaadeldava perioodi jooksul üks rikkeline katkestus – rike 9. Tegemist elektrivõrgu eriolukorra ajal toimunud rikkega. Antud katkestuse rikke asukoht rakenduse väljund kaardivaates on esitatud Lisa 13 all, arvutuse tulemus leidis õige tsooni (joonis 4.11, tsoon 2) ja tegelik rikkekoht (puu liinil) oli pakutud asukoha vahetus läheduses. Seda katkestust vaadeldakse (lahendused Lisa 14) 72 minutit pärast algust, sest siis jääb pingetuks tsoon 3 normaallahutuspunktist teisele poole jääv võrguosa ja 6 minutit hiljem juhtub sama tsoon 4-ga. Mõlemad normaallahutuspunktid edasi jäävad rikked olid sellises asukohas ja võrgu skeem selline, et isegi kui nendel fiidritel oleks FLISR, siis ei oleks sellest vaadeldavale rikkele kasu. Reaalse lahenduse juures teostatakse üks väljalülitunud võrguosa proovipingestamine ja taastatakse 17 minuti jooksul tsoon 4 toide, tsoon 3 taastamist ei ole proovitud. Katkestuse vaadeldava osa kogukestvus 30 650,8 minutit (SAIDI 0,0575), andmata energia 698,5 kWh, lühisele lülitamiste arv 1. Hüpotetilise lahenduse juures katkestuse taastatakse tsoon 3 ja 4 elektrivarustus kolme minuti jooksul, mistõttu kogukestvus 21 687,2 minutit (SAIDI 0,0409), andmata energia 390,5 kWh ja lühisele lülitamiste arv 1.

4.4 Tulemused

Tulemuste saamiseks analüüsiti valitud piirkonna FLISR moodulile sobivatel fiidrite 2022. aasta esimesel kolmel kuul reaalselt toimunud katkestusi. Vaadeldi kõiki toimunud keskpinge rikkeid, millest valiti välja sellised, mis eelduslikud oleksid moodulit käivitanud. Kokku analüüsiti 9 rikke lahendust, võrreldes reaalselt lahendust koostatud hüpoteetilise lahendusega, mis põhines kolmandas peatükis kirjeldatud FLISR mooduli automaatse isetaastumise töötamise põhimõtetel. Katsetulemusi koondav tabel on esitatud alljärgnevalt:

Tabel 4.6 – Analüüsitud rikete kvaliteedinäitajad

Tunnus	Päevane keskpinge rikete arv	Reaalsed lahendused				
		Kogu-kestvus (min)	Andmata energia (kWh)	Lühisele lülitamisi (tk)	SAIDI (min)	Pingetuid tarbijaid lõppemisel
Rike 1	8	21 892,8	661,8	1	0,0411	202
Rike 2	44	133 125,1	5 129,6	0	0,2498	141
Rike 3	37	4 781,3	142,6	0	0,0090	0
Rike 4	8	30 865,6	932,4	2	0,0579	202
Rike 5	1	10 290,8	328,3	2	0,0193	78
Rike 6	8	6 916,2	545,1	1	0,0129	78
Rike 8	17	66 880,6	1 647,7	1	0,1255	311
Rike 9	44	30 650,8	698,5	1	0,0575	416
Kokku:		305 403,2	10 086,0	8	0,5730	1428
Tunnus	Päevane keskpinge rikete arv	Hüpoteetilised lahendused				
		Kogu-kestvus (min)	Andmata energia (kWh)	Lühisele lülitamisi (tk)	SAIDI (min)	Pingetuid tarbijaid lõppemisel
Rike 1	8	4 926,6	110,8	1	0,0092	61
Rike 2*	44	56 722,6	825,4	1	0,1064	61
Rike 3	37	181,9	5,9	0	0,0003	0
Rike 4	8	21 756,0	800,1	1	0,0416	141
Rike 5	1	3 852,3	310,9	1	0,0072	78
Rike 6	8	6 627,2	535,9	1	0,0124	78
Rike 8	17	59 287,5	1 539,1	2	0,1112	277
Rike 9	44	21 687,2	390,5	1	0,0409	294
Kokku:		175 041,3	4 518,6	8	0,3292	990

* - Rike 2 korral kasutatakse keskmise möjuga hüpoteetilist lahendust

Tasub välja tuua, et enamik vaadeldud riketest toimusid erakordsetes tingimustes ja tormioludes, kus rikete arv ning dispetšeri töökoormus oli suur, mistõttu ei ole kohane tulemusi üks-üheselt tavaolukorda laiendada. Vaadeldud riketest 5 (rike 2, 3, 7, 8 ja 9)

toimusid oludes, kus oli juhtimispiirkonnas ööpäeva jooksul mõõdetud maksimaalne tuulekiirus ületas projekteerimismorme 25 m/s (28,2 – 33,1 m/s); kolmel juhul (rike 1, 4 ja 6) oli tuulekiirus normi piires, kuid tormine ilm (23,3 – 24,6 m/s) ja ühel juhul (rike 5) tavapärane (13,7 m/s) [34]. Samas teiste võrguettevõtjate kogemuse põhjal (ptk 2.3) tulebki isetaastuva lahenduse põhiline kvaliteedinäitajate parendamine tormistes oludes. Seda kinnitab ka rike 5 analüüs, kus dispetšeri ja FLISR mooduli teostatud kaugjuhitavaid lüliteid kasutavad lahendused erinevad sisuliselt minimaalselt, erineb lahenduse kiirus ligi 10 minutit.

Tabelis ei ole esitatud rike 7 lahendust, sest antud rikke puhul oli tegemist ajas mööduva lühisega (lühist põhjustav asjaolu kadus 6 – 55 minutit pärast esialgset väljalülitust) ja polnud võimalik teostada hüpoteetilist lahendust vaadeldava osa lõpuni, sest see oleks põhinenud hinnangulisel rikkebrigaadi jõudmise ajal ja eelduslikul lahendusel. Samas tõstatab potentsiaalse puuduse FLISR lahenduse kasutusele võtmisel, sest dispetšeril puudub alus proovipingestada mooduli lahenduse käigus rikkaliseks määratud ja eraldatud võrguosa. Sellised juhtumid on pigem harva esinevad, kuid tormistes oludes võib lühist ja väljalülitumist põhjustanud näiteks murdunud puu tuule mõjul õhuliini pealt maha kukkuda. Kui võrguelemendid ei saanud kahjustada, siis võib olla hilisem proovipingestamine edukas. Käesolevas magistritöös käsitletakse juhtumit kui erandit ja edaspidi analüüsis ei kajastata, teema vajab eraldiseisvat analüüsi ning sellekohane ettepanek on esitatud kokkuvõttes võrguettevõtjale.

Lõputöö ja katsetamise tulemuste analüüs:

- Vaadeldud võrguosa automatiseerimise tase on küllaltki madal, fiidreid saab telejuhitavuse alusel seksioneerida kaheks kuni neljaks tsooniks. Samuti ei ole ligi 55 % vaadeldud võrgust võimalik rakendada FLISR isetaastuvat lahendust.
- FLISR mooduli kasutuselevõtt vähendas analüüsitud rikete vaadeldava osa kogukestvust 4 – 96 % (vastavalt 77,5 %; 57,4 %; 96,2 %; 29,5 %; 62,7 %; 4,2 %; 11,4 % ja 29,2 %), keskmiselt ligi 46 %. Kokku vähenes vaadeldud rikete kogukestvus 130 361,9 minutit. Analüüsitud rikete mõju SAIDI arväärtusele oli 1,3832 minutit, millest vaadeldav osa (käsijuhtimisel lülitamiseni) andis 41,4 % (0,5730 minutit). Hüpoteetilise lahenduse juures oleks antud rikete SAIDI olnud hinnanguliselt 1,1394 minutit ehk vähenemine 17,6 %.
- Võimsuslülitite lühisele lülitamiste arv varieerus sõltuvalt rikkest - mõnel juhul vähenes, mõnel kasvas. Analüüsitud ja lahendatud rikete korral kokku jäi lühisele lülitamiste arv samaks. Tuginedes peatükile 3 võib öelda, et võrgu automatiseerimise suurema taseme korral väheneks lühisele lülitamiste arv, sest

FLISR moodul avab rikke asukoha (FL) rakenduse väljundi alusel huvipakkuvas tsoonis kaugjuhitavad lülid ja proovipingestab järk-järgult. Antud võrguosas automatiseerimise tasemest lähtuvalt seda ei juhtunud, seega võib järeldada, et lühisele lülitamiste arvu vähendamiseks tuleks suunata täiendavaid investeeringuid võrgu automatiseerimiseks.

- Andmata energia hulk analüüsitud rikete põhjal vähenes kokku 5 567,4 kWh, keskmiselt 695,9 kWh rikke kohta. Võttes arvesse, et hajusasutuses on rikke põhjusel andmata energia hind 4,48 €/kWh [20], siis antud rikete korral vaadeldava perioodi jooksul oleks otsene majanduslik mõju FLISR rakendamisel 24 822,96 € kolme piirkonnaalajaama väljuvate fiidrite baasil.
- Katsetuse käigus analüüsitud rikete põhjal võib öelda, et mooduli veakoha arvutuse täpsusklass on piisav. Kõigil rikutel, kus oli kättesaadav rikke asukoht (FL) rakenduse tulemus, oli see tuvastanud õige tsooni. Ühel juhul oli tegemist mitme rikkekohaga, sellisel juhul tuvastas rakendus õigesti ühe riket sisaldava tsooni.
- Analüüsitud rikutel vähenes telejuhtimisega lülitamistega summaarne pingetute tarbijate arv vaadeldava osa lõpus 31,1 % (reaalsete lahenduste juures 1428 tarbimispunkti, hüpoteetiliste korral 990 tarbimispunkti). Vähenemine on tingitud tõenäoliselt tormioludest valimisse kuulunud rikete korral, tavaolukorras saab dispetšer samad lülitused tehtud, mis moodul. Tasub välja tuua ka mööndus, et reaalsete lahendamiste juures võis esineda telejuhtimisel tõrkeid (andmeside häiritud, võimsuslüliti tõrge, SCADA häiring, juhtimiskäsk täitmata). Infosüsteemides ja andmebaasides sellekohaseid märkeid või logisid autor ei tuvastanud, kuid teoreetiline võimalus säilib ja see võib moonutada tulemusi.
- Tänapäevase automatiseerimistaseme juures sai analüüsitud võrguosas moodulit kasutada 18st fiidrist 8 puhul ehk rakendamise määr on 44 %. Neil kaheksal fiidril toimus analüüsitud ajaperioodi (01.-03.2022) jooksul 30 keskpinge riket, millest 9 (30 %) oleks käivitanud FLISR mooduli isetaastumise lahenduse, st välja lülitus fiider tervenisti või osa, mida on võimalik moodulil seksioneerida. Mooduli käsitluses sobivatel rikutel oli keskmisest suurem mõju - 30 rikke SAIDI kokku on 2,99 minutit; katsetel lahendatud rikutel 1,38 minutit (46 %).

Katkestuse esimestel hetkedel, mil väljalülitunud kliendipunktide arv on kõige suurem, kasvab kogukestvuse, SAIDI ja andmata energia väärtused väga kiiresti. Võttes arvesse eelnevalt kirjeldatud katsetulemusi ja asjaolu, et analüüsitud rikete toimumise päevadel on rikete mõjul tulnud 79,04 % kogu esimese kolme kuu SAIDI-st antud

juhtimispiirkonnas ning võttes aluseks, et juhtimispiirkonna teiste piirkonnaalajaamade väljuvate fiidrite automatiseerimise tase on sarnane, siis võib hinnanguliselt öelda, et FLISR mooduli kasutuselevõtt aitab vähendada SAIDI väärtust vähemalt 6,1 % selles juhtimispiirkonnas ($100 \% \text{ (kõik rikked)} \times 79,04 \% \text{ (tormipäevade mõju SAIDI-le)} \times 44 \% \text{ (FLISR rakendamise määr)} \times 17,6 \% \text{ (FLISR lahenduse mõju SAIDI-le)}$). Tegelik mõju on hinnanguliselt suurem, sest tegelikult aitab see kvaliteedinäitajaid parendada ka tavaoludes. Suur osa SAIDI mõjust vaadeldud rikete juures tuleb pärast seda, kui kaugjuhtimise potentsiaal on end ammendanud ja edasisi tegevusi peab tegema operatiivpersonal, mida FLISR kasutuselevõtt ei mõjuta. Samas näitab see tulemus, et targad lahendused on võimelised oluliselt mõjutama SAIDI väärtust ilma täiendavate investeeringuteta võrku (tänapäevase automatiseerimise taseme juures, tänapäevase SCADA võimekuse juures).

Praktilise osa käigus tuli esile asjaolu, et fiider FLISR mooduli automaatsele lahendusele sobivaks muuta, on vaja sisuliselt ainult kahte kaugjuhitavat lülitit: fiidrit sektioneerivat lülitit ja normaallahutuspunkti. Suurel osal vaadeldud fiidritest jäi puudu ainult üks nimetatud elementidest, et käsitletud automaatse isetaastumise lahenduse minimaalsed tingimused oleks täidetud. Minimaalsete tingimuste juures omab mooduli kasutamine juba olulist mõju, arvestades, et suur osa SAIDI-st tuleb tormide ajal, mil rikkeid korrigeerivate lülituste aeg rikke algusest võib dispetšeri ülekoormuse tõttu toimuda küllaltki hilja. Lisaks võib öelda, et vaadeldud piirkonna automatiseerimistase on küllaltki madal, vaadeldavas võrguosas on moodul võimeline sektioneerima fiidri kahte kuni nelja tsooni. Selle tulemusel saab toimuda kiire toite taastamine ainult tervete tsoonide toitel olevatele klientidele ja reeglina on riket sisaldav tsoon klientide arvult suur. Kaugjuhitavate kommutatsiooniseadmete lisandumisel võrku võib FLISR mooduli kasutusele võtmisel positiivne mõju kvaliteedinäitajatele oluliselt kasvada, sest mida väiksemateks tsoonideks on moodul võimeline fiider jagama, seda suuremale osale on võimalik kiirete lülituste toimel elektrivarustus taastada.

KOKKUVÕTE

Rahuldamiseks ühiskondlike ootusi ja tarbijate kasvavaid vajadusi, on oluline jaotusvõrguettevõtjatel parandada rikete lokaliseerimiskiirust ja katkestuste kestvust ning ulatust. Hea võimalus rikete mõju vähendamiseks on SCADA-l ja kaugjuhitavatel lülitusseadmetel põhinev isetaastuva võrgu lahendus, mis rikke tekkimisel suudab weakoha arvutuste tulemusel tuvastada vigase võrguosa ning kiiresti kaugjuhitavate lülititega eraldada rikkalise osa ja taastada elektrivarustus tervete tsoonide tarbijatele. Selliseid lahendusi on lähiriikide jaotusvõrguettevõtjad edukalt mitmeid aastaid kasutanud ja nende kasutusjuhtumite tulemused on olnud head. Eriti suurt mõju avaldavad nimetatud lahendused tormiste ilmastikuolude esinemisel, mille mõjul tuleb suur osa terve aasta SAIDI väärtusest.

Elektrilevi OÜ võrgu juhtimiseks sellest aastast kasutatav uus SCADA süsteem on võimeline FLISR mooduli rakendamisel teostama isetaastumist. Töös analüüsiti ühes juhtimispiirkonnas kolme piirkonnaalajaama ja nende väljuvaid fiidreid. Kõigil vaadeldud fiidritel saab kasutada vea asukoha (FL) rakendust rikkalise võrguosa tuvastamiseks, kuid see põhineb lühisvoolu järgi arvutamisel. Ükski analüüsitavaesse võrguosasse lisatud rikkeindikaator ei olnud kaugloetav. Automaatse isetaastumise jaoks peab fiider sisaldama kaugjuhitavaid lüliteid vähemalt sellises mahus, et oleks moodulil oleks võimalik väljalülitunud võrguosa tsoonideks jaotada. Selleks, et tervete tsoonide tarbijatele elektrivarustus taastada, peab olema fiidril kaugjuhitav(ad) normaallahutuspunkt(id). Analüüsi tulemusel rakenduks FLISR mooduli automaatne lahendus 30 % keskpinge riketest ja automaatset töörežiimi on võimalik lahendada 44 % fiidritest. FLISR mooduli automaatsel rakendamisel seda võimaldavatel fiidritel oleks hinnanguline SAIDI vähenemine 17,6 % antud fiidrite riketel. Selle toob endaga kaasa asjaolu, fiidritel, kus FLISR automaatne isetaastumine on võimalik, väheneb katkestuse kogukestvus keskmiselt 46 %. Tasub välja tuua, et vaadeldud ajaperiood (01.-03.2022) on olnud erakordselt tormine ja kõik antud ajaperioodil hüpoteetiliselt lahendatud rikked toimusid tormiste ilmastikuolude esinemisel, mis tähendab, et töö tulemused kvaliteedinäitajate vähenemise osas ei pruugi olla adekvaatselt laiendatavad tavaoludesse, sest dispetšeri lahendused tavaolukorras on tõenäoliselt oluliselt kiiremad valimis olevates ricketes kajastatutega. Samas annab tehtud töö hea ülevaate FLISR mooduli rakendamise eeldustest ja töötamise põhimõtetest, mis kehtivad ka tavaolukorras. Samuti toob see välja isetaastuva lahenduse vajaduse, sest erakordsete ilmastikuolude ajal tekkinud rikete mõjul tuleb suur osa SAIDI aastasest väärtusest.

Magistritöö autori soovitusel ettevõtjale on esitatud järgnevate tegevuste näol:

- FLISR mooduli rikke asukoht (FL) rakendus automaatselt tööle panna kõigis seda võimaldavatel lülitel, et tekiks parem arusaam veakoha arvutuse täpsusest ja kitsaskohtadest, mille tulemusel saaks vajadusel ette võtta seda parendavaid tegevusi (rikkeindikaatorite lisamine, mooduli seadistamine meetodi valiku ja osakaalude osas). Samuti aitaks see dispetšeril teadlikumalt teostada proovipingestamist ja vähendada eelduslikud lühisele lülitamiste arvu;
- Lisaks automaatsele veakoha arvutamisele rakendada fiidritel tööle manuaalne FLISR, mis teeb lülitusettepanekuid, kuid automaatselt neid täitma ei asu. See aitab võrguettevõtte töötajatel võrrelda enda väljaõppel põhinevat lahendust mooduli pakutavaga, samuti tuvastada võimalikke erinevusi ja probleeme;
- Keskpinge fiidrite kaardistamine FLISR mooduli juhitavuse ja töötamise alusel, hinnata tekkivaid tsoone ja analüüsida nende tsoonide rikke tõenäosust, seotud klientide arvu ning selle suhet. Kaardistamise tulemusel on võimalik tuvastada võrguosad, kus saab võrdlemisi väikese investeeringuga (ühe või paari lülitusseadme kaugjuhitavaks muutmisel, kaugjuhitava seadme vastu asendamisel) töösse rakendada FLISR automaatse isetaastumise lahenduse;
- Analüüsida, kui suure osakaaluga on sellised keskpinge rikked, kus esmane proovipingestamine on ebaedukas, kuid mõne aja möödudes lühise põhjus kaob (sarnaselt lahendatud rikkele 5). Vajadusel kaaluda töökorraldust, et tormistel oludel õhuliinidega võrguosas teostada teine proovipingestamine mõne aja möödudes (ka FLISR mooduli kasutusele võtmisel).

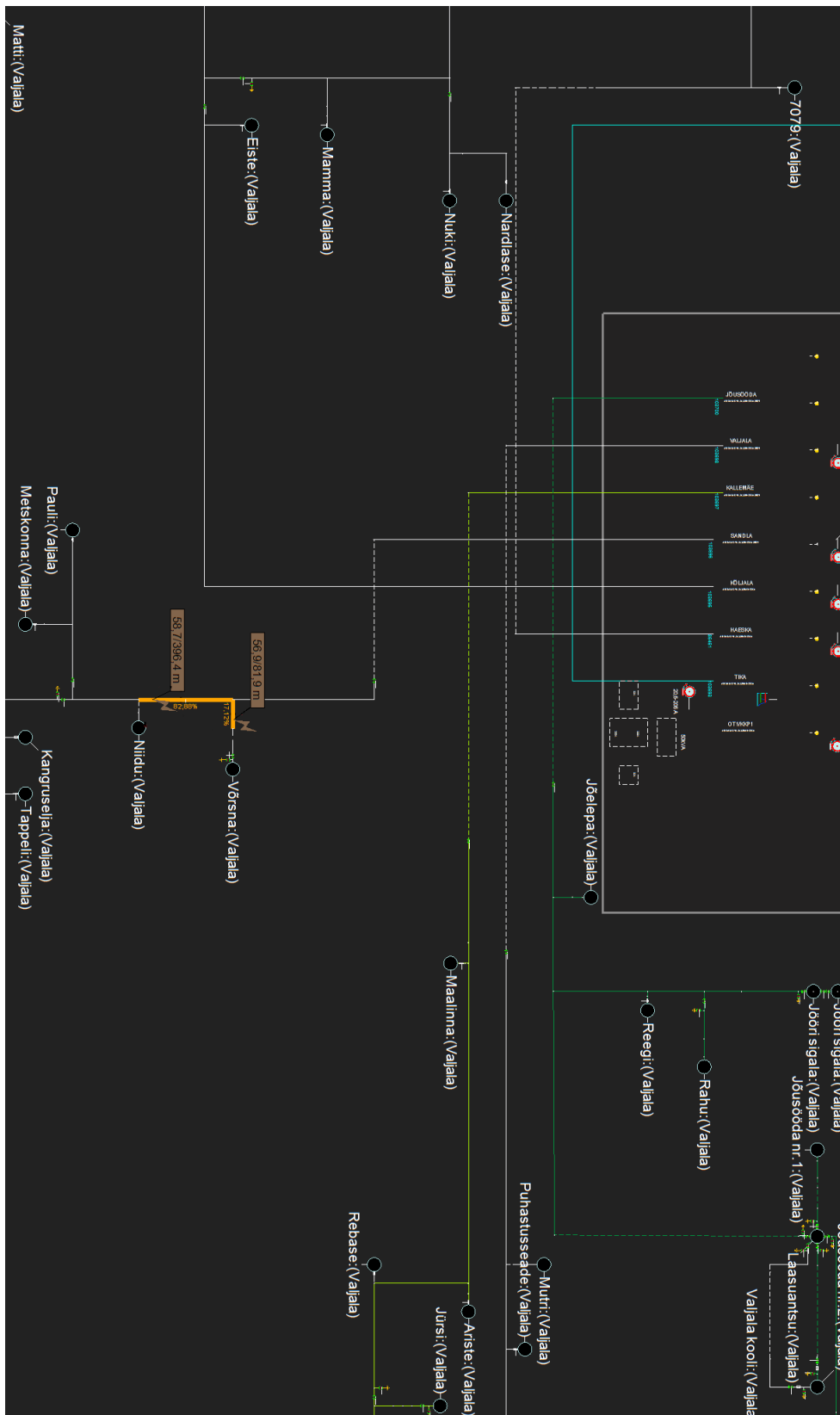
Käesolev magistritöö koostati arvestades võrgu hetkeseisu ja automatiseerimise taset, edasine uurimisteema võiks olla keskmisele keskpinge fiidritele FLISR mooduli rakendamiseks optimaalse automatiseerimistaseme leidmine, mis võtaks arvesse investeerimisvõimekust, rikke asukoha arvutuse täpsusklassi erinevate rikete ja võrgutüüpide puhul, normaallahutuspunktide paiknemist ja tekkivate tsoonide tarbimisandmeid (kliendipunktide arvud, iseloomud ja prioriteedid).

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Elering, „Elektituru käsiraamat 2.1.1,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://elering.ee/elektrituru-kasiraamat/2-eesti-elektrisusteem/21-euroopa-ja-eesti-elektrisusteemi-ulevaade/211>.
- [2] Energiatalgud, „Elektivõrk,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://energiatalgud.ee/Elektrivõrk>. [Kasutatud 19 02 2022].
- [3] Konkurentsiamet, „Aruanne elektri- ja gaasiturust Eestis,” https://www.konkurentsiamet.ee/sites/default/files/Dokumentide-failid/euroopa_aruanne_2021.pdf, Tallinn, 2021.
- [4] Elering AS, „Eleringile kuuluvad liinid,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://elering.ee/eleringile-kuuluvad-liinid>. [Kasutatud 21 02 2022].
- [5] Elektrilevi OÜ, „Ettevõttest,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.elektrilevi.ee/et/ettevotest/elektrilevi-tutvustus>. [Kasutatud 22 02 2022].
- [6] Viru Keemia Grupp, „Võrguteenuse müük,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.vkg.ee/vorguteenuse-muuk/>. [Kasutatud 22 02 2022].
- [7] Elering AS, „EESTI TARBIJATE ELEKTRIVARUSTUSKINDLUSE ARUANNE AASTANI 2030,” Tallinn, 2021.
- [8] Elering AS, „Juhtimiskeskus,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://elering.ee/juhtimiskeskus>. [Kasutatud 06 03 2022].
- [9] Enefit Connect OÜ, „J384 JAOTUSVÕRGU TALITLUSE JUHTIMISE JUHEND,” 2021.
- [10] M. Meldorf, T. Tikk ja J. Kilter, Elektrivõrgu operatiivjuhtimissüsteem, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2010.
- [11] „SCADA Systems for Electrical Distribution,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.electricaltechnology.org/2015/09/scada-systems-for-electrical-distribution.html>. [Kasutatud 06 03 2022].
- [12] Elering AS, „Eleringi elektrivõrgu töökindlus oli eelmisel aastal maksimumi lähedal,” 18 01 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://elering.ee/eleringi-elektrivorgu-tookindlus-oli-eelmisel-aastal-maksimumi-lahedal>. [Kasutatud 06 03 2022].
- [13] Majandus- ja kommunikatsiooniminister, „Võrguteenuste kvaliteedinõuded ja võrgutasude vähendamise tingimused kvaliteedinõuete rikkumise korral,” Eesti Vabariik, 2021 10 01. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/1039867?leiaKehtiv>. [Kasutatud 06 03 2022].
- [14] Konkurentsiamet, „Järeivalve,” 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.konkurentsiamet.ee/et/elekter-maagaas/elekter/jarelevalve>. [Kasutatud 12 03 2022].
- [15] European Environmental Agency, „Wind Storms,” 4 10 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/storms-2/assessment>. [Kasutatud 22 3 2022].
- [16] TalTech Elektroenergeetika ja Mehhatroonika Instituut, „ELEKTRIVÕRKUDE JA TEISTE INFRASTRUKTUURIDE HALDAMISE VORMIDEST TÄNA JA TULEVIKUS,” Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2018.
- [17] R. Silva, E. Alves, R. Ferreira, J. Villar ja C. Gouveia, „Characterization of TSO and DSO Grid System Services and TSO-DSO Basic Coordination Mechanisms in the Current Decarbonization Context,” *MDPI Energies*, kd. 14, nr 4451, pp. 4-15, 2021.
- [18] EUROOPA PARLAMENT JA NÕUKOGU, „DIREKTIIV 2005/89/EÜ elektrienergia varustuskindluse ja infrastruktuuriinvesteeringute kohta,” Euroopa Liidu Teataja, 2006.

- [19] Eesti Vabariigi Valitsus, „Energiamajanduse arengukava aastani 2030,“ Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, 2017.
- [20] M. Hopfensitz ja H. Spitzer, „Analysis of distribution network balanced reliability level on the basis of total society production in Estonia,“ *entellgenio*, 2018.
- [21] I. Palu, P. Raesaar, J. Valtin, K. Kull ja T. Trummal, „Jaotusvõrgu tasakaalustatud varustuskindluse tase ühiskondliku kogutoodangu alusel,“ Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2018.
- [22] A. Jain ja R. Mishra, „Changes & Challenges in Smart Grid towards Smarter Grid,“ *IEEE International Conference on "Electrical Power and Energy Systems"*, 2016.
- [23] T. Lehtla, „Tulevik - otsapidi tarkvõrkude küljes,“ *Energeetika*, kd. 2, pp. 33-37, 2012.
- [24] R. W. Uluski, „The Role of Advanced Distribution Automation in the Smart Grid,“ IEEE, Raleigh, 2010.
- [25] M. Cinar ja A. Kaygusuz, „Self-Healing In Smart Grid: A Review,“ *BEU Journal of Science*, kd. 7, nr 2, pp. 492-503, 2018.
- [26] D. Sarathkumar, M. Srinivasan, A. A. Stonier, R. Samikannu, N. R. Dasari ja R. A. Raj, „A Technical Review on Self-Healing Control Strategy for Smart Grid Power Systems,“ %1 *International Virtual Conference on Robotics, Automation, Intelligent Systems and Energy (IVC RAISE 2020)*, Erode, 2020.
- [27] M. Cinar, „Self-Healing Methods in Smart Grids,“ *International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)*, kd. 24, nr 1, pp. 264-269, 2020.
- [28] C. Angelo ja P. Selejan, „TECHNOLOGIES OF THE SELF HEALING GRID,“ %1 *22nd International Conference on Electricity Distribution*, Stockholm, 2013.
- [29] F. Mekic, K. Alloway, C. Angelo ja R. Goodin, „FAULT DETECTION ISOLATION AND RESTORATION ON THE FEEDER (FDIR): PICK YOUR TECHNOLOGY,“ *International Conference on Electricity Distribution*, Frankfurt, 2011.
- [30] C. Krieger, S. Behardien ja J.-C. Retonda-Modiya, „A Detailed Analysis of the Generic Object-Oriented Substation Event Message Structure in an IEC 61850 Standard-Based Substation Automation System,“ *International Journal of Computers, Communications & Control (IJCCC)*, kd. 8, nr 5, 2013.
- [31] E. J. Coster, W. C. M. Kerstens ja O. Schroedel, „Implementation of an Automatic FLIR-scheme in a 20 kV Distribution Grid,“ *12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014)*, 2014.
- [32] J. Kuru, T. Ihonen ja J. Haikonen, „Control-Center-Based Automatic Fault Isolation and Restoration System for Rural Medium Voltage Networks,“ *CIREN*, Stockholm, 2013.
- [33] J. Kuru, T. Väre, S. Vehmasvaara ja H. Paananen, „STORM-PROOF AUTOMATIC FAULT ISOLATION AND RESTORATION SYSTEM FOR MEDIUM VOLTAGE NETWORKS,“ *CIREN*, Madrid, 2019.
- [34] Keskkonnaagentuur, „Vaatlusandmed,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.ilmateenistus.ee/ilm/ilmavaatlused/vaatlusandmed/oopaevaandmed/>. [Kasutatud 13 05 2022].
- [35] *International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, „ABOUT CIREN,“ <http://www.cired2019.org/page/about-cired>.
- [36] Keskkonnaagentuur, „Vaatlusandmed,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.ilmateenistus.ee/ilm/ilmavaatlused/vaatlusandmed/oopaevaandmed/>.

LISA 1 – Rikke asukoht (FL) väljund



LISA 2 – Rike 2 lahendus

Reaalne rike 2 lahendus

Kaugjuhitav lülitus	Lülituse kellaeg	Katkestatud kliendipunkte	Katkestuse kestvus (min)	Lahtiühendatud võimsus	Lühisele lülitamisi
PAJ VL välja	17.01.2022 09:01:06	202	00:00	365,66	0
Tsoon 1&2 vaheline LP välja	17.01.2022 09:48:36	202	47:30	365,66	0
PAJ VL sisse	17.01.2022 09:49:05	141	47:59	313,08	0
Käsijuhtimisel lülitamine	18.01.2022 00:25:12	141	924:06	313,08	-

Hüpoteetiline rike 2 lahendus 1

	Kaugjuhitav lülitus	Lülituse kellaeg	Katkestatud kliendipunkte	Katkestuse kestvus (min)	Lahtiühendatud võimsus	Lühisele lülitamisi
FL	PAJ VL välja	17.01.2022 09:01:06	202	00:00	365,66	0
	Tsoon 1&2 vaheline LP välja	17.01.2022 09:02:06	202	01:00	365,66	0
	PAJ VL sisse	17.01.2022 09:03:06	141	02:00	313,08	0
FLL/FI	Tsoon 1&2 vaheline LP sisse	17.01.2022 09:03:36	0	02:30	0	1
	PAJ VL välja	17.01.2022 09:03:36	202	02:30	365,66	1
	Tsoon 1&2 vaheline LP välja	17.01.2022 09:03:56	202	02:50	365,66	1
SR	PAJ VL sisse	17.01.2022 09:04:06	141	03:00	313,08	1
	Käsijuhtimisel lülitamine	18.01.2022 00:25:12	141	924:06	313,08	1

Hüpoteetiline rike 2 lahendus 2

	Kaugjuhitav lülitus	Lülituse kellaeg	Katkestatud kliendipunkte	Katkestuse kestvus (min)	Lahtiühendatud võimsus	Lühisele lülitamisi
FL	PAJ VL välja	17.01.2022 09:01:06	202	00:00	365,66	0
	Tsoon 1&2 vaheline LP välja	17.01.2022 09:02:06	202	01:00	365,66	0
FLL/FI/SR	PAJ VL sisse	17.01.2022 09:03:06	141	02:00	313,08	0
	Tsoon 1&2 vaheline LP sisse	17.01.2022 09:03:36	0	02:30	0	0

Hüpoteetiline rike 2 lahendus 3

	Kaugjuhitav lülitus	Lülituse kellaeg	Katkestatud kliendipunkte	Katkestuse kestvus (min)	Lahtiühendatud võimsus	Lühisele lülitamisi
FL	PAJ VL välja	17.01.2022 09:01:06	202	00:00	365,66	0
	Tsoon 1&2 vaheline LP välja	17.01.2022 09:02:06	202	01:00	365,66	0
FLL/FI	PAJ VL sisse	17.01.2022 09:03:06	141	02:00	313,08	1
	PAJ VL välja	17.01.2022 09:03:06	202	02:00	0	1
	Tsoon 1&2 vaheline LP välja	17.01.2022 09:03:36	202	02:30	365,66	1
SR	Normaallahutus-punkt sisse	17.01.2022 09:03:56	61	02:50	52,58	1
	Käsijuhtimisel lülitamine	18.01.2022 00:25:12	61	924:06	52,58	1

LISA 3 – Rike 3 lahendus

Reaalne rike 3 lahendus					
Kaugjuhitav lülitus	Lülituse kellaeg	Kliendipunkte	Katkestuse kestvus (min)	Lahtiühendatud võimsus	Lühisele lülitamisi
PAJ VL välja	26.03.2022 19:16:30	202	00:00	365,66	0
PAJ VL sisse	26.03.2022 19:40:10	0	23:40	0	0
Hüpoteetiline rike 3 lahendus					
Kaugjuhitav lülitus	Lülituse kellaeg	Kliendipunkte	Katkestuse kestvus (min)	Lahtiühendatud võimsus	Lühisele lülitamisi
FL PAJ VL välja	26.03.2022 19:16:30	202	00:00	365,66	0
Tsoon 1&2 vaheline LP välja	26.03.2022 19:16:50	202	00:20	365,66	0
FLL/FI/SR PAJ VL sisse	26.03.2022 19:17:10	141	00:40	313,58	0
Tsoon 1&2 vaheline LP sisse	26.03.2022 19:17:30	0	01:00	0	0

LISA 4 – Rike 4 lahendus

Reaalne rike 4 lahendus					
Kaugjuhitav lülitus	Lülituse kellaeg	Katkestatud kliendipunkte	Katkestuse kestvus (min)	Lahtiühendatud võimsus	Lühisele lülitamisi
PAJ VL välja	27.03.2022 00:11:36	202	00:00	365,66	0
PAJ VL sisse	27.03.2022 02:40:50	0	149:14	365,66	1
PAJ VL välja	27.03.2022 02:42:20	202	150:44	365,66	1
PAJ VL sisse	27.03.2022 02:42:38	0	151:02	365,66	2
PAJ VL välja	27.03.2022 02:44:24	202	152:48	365,66	2
Käsijuhtimisel lülitus	27.03.2022 02:44:36	202	153:00	365,66	2
Hüpoteetiline rike 4 lahendus					
Kaugjuhitav lülitus	Lülituse kellaeg	Katkestatud kliendipunkte	Katkestuse kestvus (min)	Lahtiühendatud võimsus	Lühisele lülitamisi
FL PAJ VL välja	27.03.2022 00:11:36	202	00:00	365,66	0
Tsoon 1&2 vaheline LP välja	27.03.2022 00:12:36	202	01:00	365,66	0
PAJ VL sisse	27.03.2022 00:12:56	141	01:20	313,08	0
Tsoon 1&2 vaheline LP sisse	27.03.2022 00:13:16	0	01:40	0	1
PAJ VL välja	27.03.2022 00:13:16	202	01:40	365,66	1
FLL/FI Tsoon 1&2 vaheline LP välja	27.03.2022 00:13:36	202	02:00	365,66	1
SR PAJ VL sisse	27.03.2022 00:14:36	141	03:00	313,08	1
Käsijuhtimisel lülitus	27.03.2022 02:44:36	141	153:00	313,08	1

LISA 5 – Rike 5 FL väljund



LISA 6 – Rike 5 lahendus

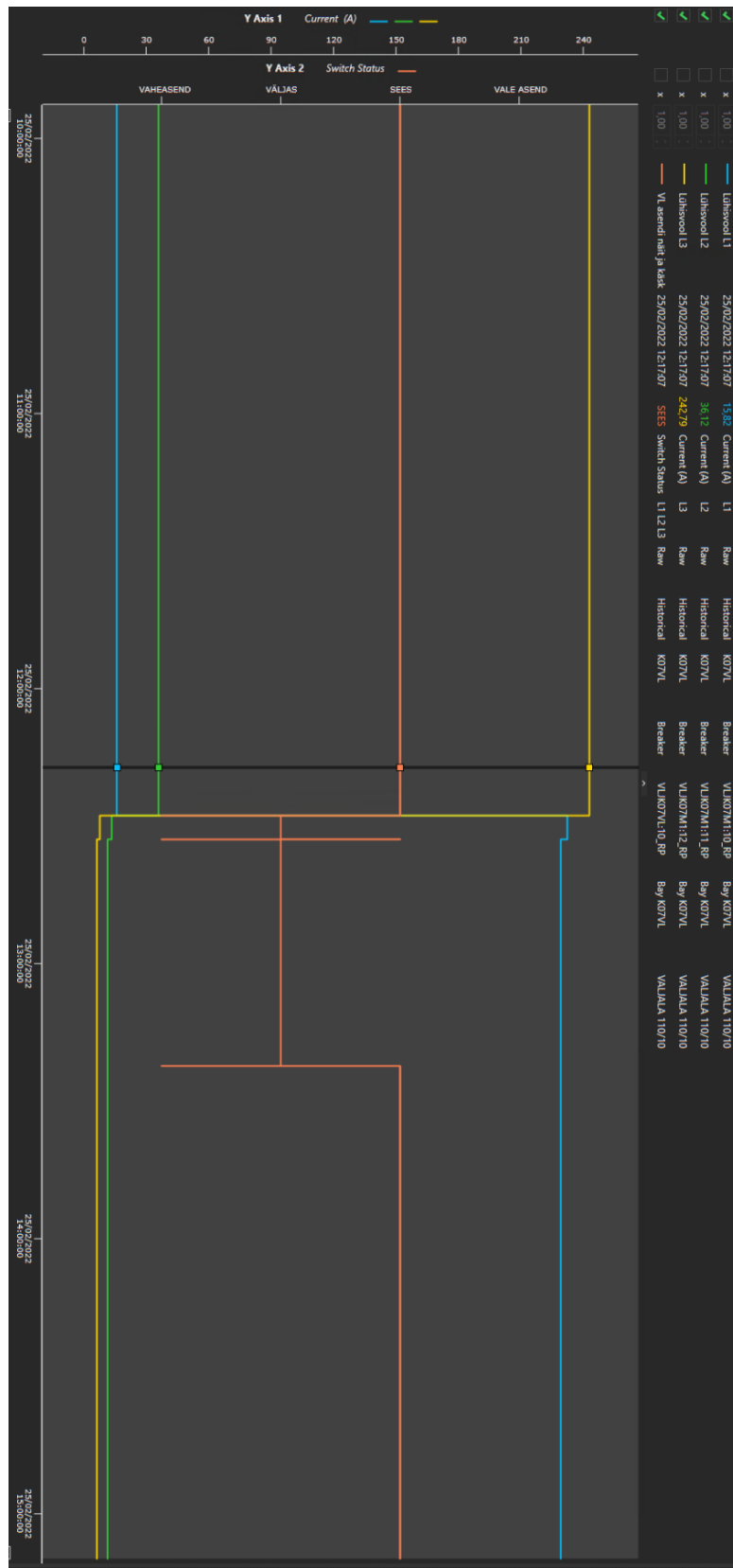
Reaalne rike 5 lahendus

	Kaugjuhitav lülitus	Lülituse kellaeg	Katkestatud kliendipunkte	Katkestuse kestvus (min)	Lahtiühendatud võimsus	Lühisele lülitamisi
	PAJ VL välja	05.01.2022 14:26:50	205	00:00	540,14	0
	PAJ VL sisse	05.01.2022 14:26:57	0	00:07	0	1
	PAJ VL välja	05.01.2022 14:26:58	205	00:08	540,14	1
	AJ sisend välja	05.01.2022 14:37:10	205	10:20	540,14	1
	PAJ VL sisse	05.01.2022 14:37:44	0	10:54	0	2
	PAJ VL välja	05.01.2022 14:37:45	205	10:55	540,14	2
	Tsoon 2 normaallahutus-punkt sisse	05.01.2022 14:40:27	78	13:37	392,13	2
	Käsijuhtimisel lülitamine	05.01.2022 15:13:31	78	46:41	392,13	2
Hüpoteetiline rike 5 lahendus						
	Kaugjuhitav lülitus	Lülituse kellaeg	Katkestatud kliendipunkte	Katkestuse kestvus (min)	Lahtiühendatud võimsus	Lühisele lülitamisi
FL	PAJ VL välja	05.01.2022 14:26:50	205	00:00	540,14	0
	AJ sisend välja	05.01.2022 14:27:50	205	01:00	540,14	0
	Tsoon 2 VL välja	05.01.2022 14:28:00	205	01:10	540,14	0
	Tsoon 3 VL välja	05.01.2022 14:28:15	205	01:25	540,14	0
	PAJ VL sisse	05.01.2022 14:28:40	0	01:50	0	1
FLL/FI	PAJ VL välja	05.01.2022 14:28:40	205	01:50	540,14	1
	Tsoon 2 normaallahutus-punkt sisse	05.01.2022 14:28:50	111	02:00	428,93	1
	Tsoon 2 VL sisse	05.01.2022 14:29:20	104	02:30	421,99	1
SR	Tsoon 3 VL sisse	05.01.2022 14:29:50	78	03:00	392,13	1
	Käsijuhtimisel lülitamine	05.01.2022 15:13:31	78	46:41	392,13	1

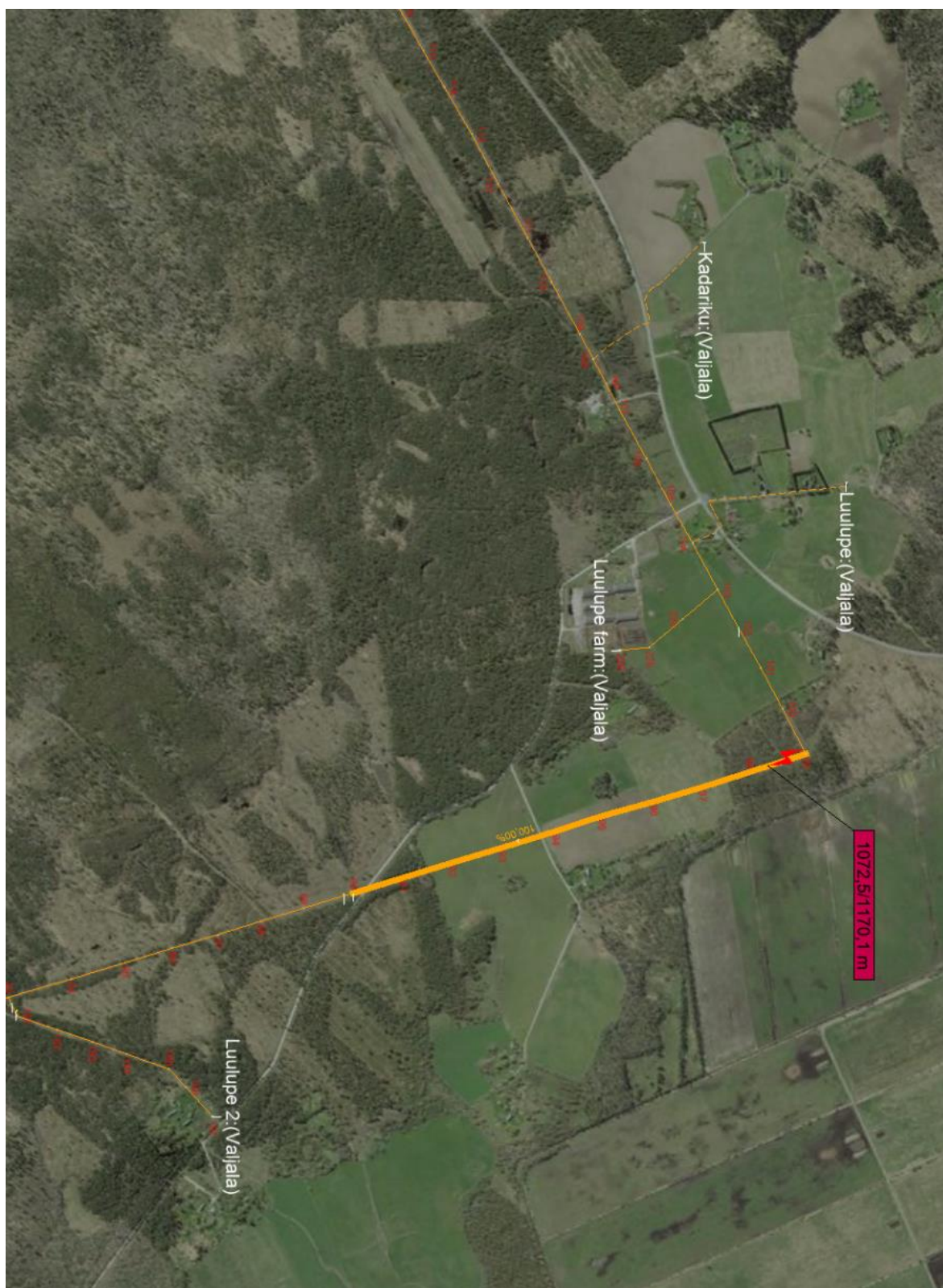
LISA 7 – Rike 6 lahendus

Reaalne rike 6 lahendus						
	Kaugjuhitav lülitus	Lülituse kellaeg	Katkestatud kliendipunkte	Katkestuse kestvus (min)	Lahtiühendatud võimsus	Lühisele lülitamisi
	PAJ VL välja	17.02.2022 17:36:48	205	00:00	540,14	0
	PAJ VL sisse	17.02.2022 17:38:09	0	01:21	0	1
	PAJ VL välja	17.02.2022 17:38:09	205	01:21	540,14	1
	AJ sisend välja	17.02.2022 17:39:45	205	02:57	540,14	1
	Tsoon 2 normaallahutus-punkt sisse	17.02.2022 17:41:20	78	04:32	392,13	1
	Käsijuhtimisel lülitamine	17.02.2022 18:58:11	78	81:23	392,13	1
Hüpoteetiline rike 6 lahendus						
	Kaugjuhitav lülitus	Lülituse kellaeg	Katkestatud kliendipunkte	Katkestuse kestvus (min)	Lahtiühendatud võimsus	Lühisele lülitamisi
FL	PAJ VL välja	17.02.2022 17:36:48	205	00:00	540,14	0
	AJ sisend välja	17.02.2022 17:37:48	205	01:00	540,14	0
	Tsoon 2 VL välja	17.02.2022 17:37:58	205	01:10	540,14	0
	Tsoon 3 VL välja	17.02.2022 17:38:08	205	01:20	540,14	0
	PAJ VL sisse	17.02.2022 17:38:28	0	01:40	0	1
FLL/FI	PAJ VL välja	17.02.2022 17:38:28	205	01:40	540,14	1
	Tsoon 2 normaallahutus-punkt sisse	17.02.2022 17:38:48	111	02:00	428,93	1
	Tsoon 2 VL sisse	17.02.2022 17:39:18	104	02:30	421,99	1
SR	Tsoon 3 VL sisse	17.02.2022 17:39:48	78	03:00	392,13	1
	Käsijuhtimisel lülitamine	17.02.2022 18:58:11	78	81:23	392,13	1

LISA 8 – Rike 7 lühisvool



LISA 9 – Rike 7 FL (simulatsioon) väljund



LISA 10 – Rike 7 lahendus

Reaalne rike 7 lahendus

Kaugjuhitav lülitus	Lülituse kellaeg	Katkestatud kliendipunkte	Katkestuse kestvus (min)	Lahtiühendatud võimsus	Lühisele lülitamisi
PAJ VL välja	25.02.2022 12:27:43	205	00:00	540,14	0
PAJ VL sisse	25.02.2022 12:32:51	0	05:08	0	1
PAJ VL välja	25.02.2022 12:32:54	205	05:11	540,14	1
AJ sisend välja	25.02.2022 13:21:46	205	54:03	540,14	1
PAJ VL sisse	25.02.2022 13:22:20	127	54:37	148,01	1
Tsoon 2 VL välja	25.02.2022 13:22:51	127	55:08	148,01	1
Tsoon 3 VL välja	25.02.2022 13:22:59	127	55:16	148,01	1
AJ sisend sisse	25.02.2022 13:23:14	120	55:31	141,07	1
Tsoon 2 VL sisse	25.02.2022 13:24:26	26	56:43	29,86	1
Tsoon 3 VL sisse	25.02.2022 13:25:02	0	57:19	0	1

Hüpoteetiline rike 7 lahendus

	Kaugjuhitav lülitus	Lülituse kellaeg	Katkestatud kliendipunkte	Katkestuse kestvus (min)	Lahtiühendatud võimsus	Lühisele lülitamisi
FL	PAJ VL välja	25.02.2022 12:27:43	205	00:00	540,14	0
	AJ sisend välja	25.02.2022 12:28:43	205	01:00	540,14	0
	Tsoon 2 VL välja	25.02.2022 12:28:53	205	01:10	540,14	0
	Tsoon 3 VL välja	25.02.2022 12:29:03	205	01:20	540,14	0
FLL/FI	PAJ VL sisse	25.02.2022 12:29:13	0	01:30	0	1
	PAJ VL välja	25.02.2022 12:29:13	205	01:30	540,14	1
SR	Tsoon 2 normaallahutus-punkt sisse	25.02.2022 12:29:43	111	02:00	428,93	1
	Tsoon 2 VL sisse	25.02.2022 12:30:43	104	03:00	421,99	1
	Tsoon 3 VL sisse	25.02.2022 12:30:43	78	03:00	392,13	1
	Käsijuhtimisel lülitamine vm lahendus	-	78	-	392,13	1

LISA 12 – Rike 8 lahendus

Reaalne rike 8 lahendus					
Kaugjuhitav lülitus	Lülituse kellaeg	Katkestatud kliendipunkte	Katkestuse kestvus (min)	Lahtiühendatud võimsus	Lühisele lülitamisi
PAJ VL välja	17.01.2022 07:27:37	311	00:00	462,29	0
PAJ VL sisse	17.01.2022 07:28:49	0	01:12	0	1
Tsoon 2 VL välja	17.01.2022 07:28:52	176	01:15	269,16	1
PAJ VL välja	17.01.2022 07:28:52	311	01:15	193,13	1
Tsoon 4 VL välja	17.01.2022 09:53:36	311	145:59	462,29	1
Käsijuhtimisel lülitus	17.01.2022 11:01:28	311	213:51	462,29	1
Hüpoteetiline rike 8 lahendus					
Kaugjuhitav lülitus	Lülituse kellaeg	Katkestatud kliendipunkte	Katkestuse kestvus (min)	Lahtiühendatud võimsus	Lühisele lülitamisi
FL PAJ VL välja	17.01.2022 07:27:37	311	00:00	462,29	0
Tsoon 2 VL välja	17.01.2022 07:28:37	311	01:00	462,29	0
Tsoon 3 VL välja	17.01.2022 07:28:37	311	01:00	462,29	0
Tsoon 4 VL välja	17.01.2022 07:28:37	311	01:00	462,29	0
FLL/FI/SR PAJ VL sisse	17.01.2022 07:29:07	277	01:30	429,35	0
Tsoon 4 VL sisse	17.01.2022 07:29:25	176	01:48	269,16	1
Tsoon 4 VL välja	17.01.2022 07:29:25	277	01:48	429,35	1
Tsoon 2 VL sisse	17.01.2022 07:30:37	101	03:00	160,19	2
Tsoon 2 VL välja	17.01.2022 07:30:37	277	03:00	429,35	2
Käsijuhtimisel lülitus	17.01.2022 11:01:28	277	213:51	429,35	2

LISA 13 – Rike 9 FL väljund



LISA 14 – Rike 9 lahendus

Reaalne rike 9 lahendus					
Kaugjuhitav lülitus	Lülituse kellaeg	Katkestatud kliendipunkte	Katkestuse kestvus (min)	Lahtiühendatud võimsus	Lühisele lülitamisi
Tsoon 2 VL välja	26.03.2022 11:57:57	458	00:00	531,13	0
Tsoon 2 VL sisse	26.03.2022 11:59:57	0	02:00	0	1
Tsoon 2 VL välja	26.03.2022 11:59:58	458	02:01	531,13	1
Tsoon 4 VL välja	26.03.2022 12:14:08	458	16:11	531,13	1
Tsoon 4 normaallahutus-punkt sisse	26.03.2022 12:14:38	416	16:41	458,14	1
Vaadeldava osa lõpp	26.03.2022 13:10:15	416	72:18	458,14	1
Hüpoteetiline rike 9 lahendus					
Kaugjuhitav lülitus	Lülituse kellaeg	Katkestatud kliendipunkte	Katkestuse kestvus (min)	Lahtiühendatud võimsus	Lühisele lülitamisi
FL Tsoon 2 VL välja	26.03.2022 11:57:57	458	00:00	531,13	0
Tsoon 3 VL välja	26.03.2022 11:58:57	458	01:00	531,13	0
FLL/FI Tsoon 4 VL välja	26.03.2022 11:59:27	458	01:30	531,13	0
Tsoon 2 VL sisse	26.03.2022 11:59:57	164	02:00	218,96	1
Tsoon 2 VL välja	26.03.2022 11:59:57	458	02:00	531,13	1
SR Tsoon 3 normaallahutus-punkt sisse	26.03.2022 12:00:27	336	02:30	385,16	1
Tsoon 4 normaallahutus-punkt sisse	26.03.2022 12:00:57	294	03:00	312,17	1
Vaadeldava osa lõpp	26.03.2022 13:10:15	294	72:18	312,17	1