

TEHISINTELLEKTI JA IEC 61850 PÕHINE DIFERENTSIAALKAITSE: ÜLEKANDEVÕRGU RELEEKAITSE KONTSEPTSIOON

ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND IEC 61850 BASED DIFFERENTIAL PROTECTION: A CONCEPT FOR RELAY PROTECTION IN TRANSMISSION NETWORK

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Hans Konrad Klaos

Üliõpilaskood: 183190AAVM

Marko Tealane, doktorant-

Juhendaja: nooremteadur

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.

"....." 2021

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 2021

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Hans Konrad Klaos

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Tehisintellekti ja IEC 61850 põhine diferentsiaalkaitse: ülekandevõrgu releekaitse kontseptsioon,

mille juhendaja on Marko Tealane,

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 loominguulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Hans Konrad Klaos

Lõputöö liik: Magistritöö

Töö pealkiri: Tehisintellekti ja IEC 61850 põhine diferentsiaalkaitse: ülekandevõrgu releekaitse kontseptsioon

Kuupäev:
18.05.2021

79 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja: doktorant-nooremteadur Marko Tealane

Sisu kirjeldus:

Töös uuritakse releekaitse kontseptsiooni, mis hõlmab laiapõhjalise diferentsiaalkaitse rakendamise võimalikkust 110 kV ülekandevõrgus. Eesmärgiks on kasutada IEC 61850 toega IED-de mõõteandmeid lähteinfona tsentraalseadmetes, mis teostavad vaadeldavas võrguosas diferentsiaalvoolu arvutust. Tehisintellektiga sidumine annab seal juures võimaluse mõõteväärtuste analüüsimiseks ja rikke olukorras asendamiseks, võttes aluseks vaadeldava elektrivõrgu mõõteandmed. Analüüs rajaneb teadusartiklitel ja läbi viidud laboratoorsete katsetuste tulemusel.

Märksõnad: IEC 61850-90-5, R-GOOSE, R-SV releekaitse, WAPS, ülekandevõrk, tehisintellekt

ABSTRACT

Author: Hans Konrad Klaos

Type of the work: Master Thesis

Title: Artificial intelligence and IEC 61850 based differential protection: A concept for relay protection in transmission network

Date: 18.05.2021

79 pages (the number of thesis pages including appendices)

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor(s) of the thesis: junior researcher Marko Tealane

Abstract:

This thesis covers a concept for 110kV high-voltage power grid relay protection. The main idea is to implement a wide-area protection system, which is based on differential protection, IEC 61850 communication protocol and machine learning techniques with the help of the existing relay protection system. The existing relay protection supports mostly IEC 61850 standard protocols so it's possible to use phasor measurements from IED-s which are sent to central units. The central units are calculating differential currents and in case of a fault are sending regarding trip signal to the IED-s. The machine learning techniques are used for measurement supervision and estimation in case of communication and other failures. The thesis is based on science articles and laboratory experimentation results.

Keywords: IEC 61850-90-5, R-GOOSE, R-SV, power system protection, WAPS, transmission network, artificial intelligence

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Tehisintellekti ja IEC 61850 põhine diferentsiaalkaitse: ülekandevõrgu releekaitse kontseptsioon**

Lõputöö teema inglise keeles: **Artificial intelligence and IEC 61850 based differential protection: A concept for relay protection in transmission network**

Üliõpilane: **Hans Konrad Klaos, 183190AAVM**

Eriala: **Elektroenergeetika**

Lõputöö liik: **magistritöö**

Lõputöö juhendaja: **Marko Tealane, marko.tealane@taltech.ee**

Lõputöö ülesande kehtivusaeg: **31.01.2022**

Lõputöö esitamise tähtaeg: **18.05.2021**

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Aastast 2021 on Eesti Vabariigis 1000 MW reguleeritava võimsusega elektrienergia tootmisvõimsusi, millele lisandub 1000 MW põhja-lõuna suunas välisühendusi. Venemaa ühend-elektrisüsteemist (IPS/UPS) eraldumine on kavas aastal 2025. Seoses Euroopa Liidu kliima-regulatsiooni eesmärkide täitmisega on kavas rajada Eesti Vabariigi territooriumile mitmeid suuremaid tuuleparke, mis on avatud elektriturul konkurentsivõimelisemad võrreldes kasutusel olevate põlevkivi elektrijaamadega. Seoses uueneva elektrienergia tootmiskontseptsiooniga muutuvad süsteemi lühisvoolud väiksemaks ja tekib vajadus ülekandevõrgu releekaitse ümber seadistada, kuid on risk, et sellest ei piisa. Ka suurte tuuleparkide (100+ MW) lühisvõimsus on väga väike, ülekandevõrgu lühise korral on tõenäoline lähimate tuuleparkide võrgust eraldumine ja sellele järgnev võimsuste puudujääk. Eesti elektrivõrgus napib kiirelt reguleeritavat võimsust ja on võimalik laiem elektrisüsteemi avarii, mille tulemusel tekivad tarbijatel elektrikatkestused. On oluline selliste riskide realiseerumise tõenäosust minimeerida ja välja töötada lühiste selektiivseks väljalülitamiseks releekaitse kontseptsioon, mis oleks töökindel muutunud oludes.

2. Töö eesmärk

Käesolevas töös vaadeldakse releekaitse kontseptsiooni, mis käsitleb elektrivõrgu reservkaitsena tsentraliseeritud laiapõhjalist diferentsiaalkaitset, mida on täiendatud masinõppe algoritmidega, et tagada süsteemi töökindlus ja õige rakendumine. Vaadeldav laiapõhjaline diferentsiaalkaitse kasutab IED-de poolt IEC 61850 protokolliga edastatud mõõteväärtuseid, mille alusel toimib seire ja tuvastades lühise saab avariilise võrguosaga piirnevatele IED-dele väljalülitamise käsud. Töö eesmärk on uurida kontseptsiooni toimet ja võrrelda selle eeliseid ning puudejääke tänase lahendusega.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Kontseptsiooni rakendatavus IED-sid kasutades.
- Releekaitse-tsentraalseadme vaheline andmeside kiirus: diferentsiaalkaitse kiireks rakendumiseks lühise korral on vajalik, et mõõtmistulemused jõuaksid allikast serverisse vähima tehniliselt võimaliku aja jooksul. Kui kiiresti suudab vaadeldav WAPS lühise tuvastada ja selle välja lülitada?
- Toimekindluse uurimine andmeedastus ja muude probleemide korral.
- Võrdlus traditsiooniliste kaitsetega.

4. Lähteandmed

Lähteandmetena kasutan teadlaste poolt IEEE-s ja teistes taolistes interneti keskkondades avaldatud artikleid, kus on käsitletud WAPS releekaitse kontseptsioonide väljapakutud lahendusi. Kasutan seadmete tehnilisi manuaale, IEC standardid, õppematerjale.

Katsetused teostan Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika releekaitse laboris.

5. Uurimismeetodid

Metoodika põhineb hüpoteesi püstitusest, tõestamise osa kirjanduse analüüsist, modelleerimisest, mõõtmistest, katsetest ja töö tulemused selguvad katsetustel saadud tulemuste analüüsist, mille põhjal saab otsustada, kas väljapakutud kontseptsioon õigustab laia põhjalist rakendust või mitte. Vajalikud releekaitse konfiguratsioonid valmistan DIGSI5 7.80 tarkvaraga.

6. Graafiline osa

Selgitavad joonised on töö põhiosas. Kontseptsiooni põhimõtet kirjeldavad joonised asuvad lisas.

7. Töö struktuur

1. Teoreetilised alused
 - 1.1 Tänapäevane releekaitse kontseptsioon
 - 1.2 IEC 61850 sidevõrk
 - 1.3 Tehisintellekt elektrialal
2. Releekaitse kontseptsioon
 - 2.1 IEC 61850 põhinev diferentsiaalkaitse
 - 2.2 Tehisintellekti põhinev releekaitse
 - 2.3 Võrdlus tänapäevaga
3. Katsesüsteemi rajamine
 - 3.1 Kontseptsiooni testimine
 - 3.2 Rakendusüüri
 - 3.3 Tulemused
4. Kokkuvõte

8. Kasutatud kirjanduse allikad

M. K. Jena, S. R. Samantaray: „Data-Mining-Based Intelligent Differential Relaying for Transmission Lines Including UPFC and Wind Farms“ IEEE (2016)

V. Telukunta, J. Pradhan, A. Agrawal, M. Singh, S. G. Srivani: „ Protection Challenges Under Bulk Penetration of Renewable Energy Resources in Power Systems: A Review“ IEEE (2017)

E. Casagrande, W. L. Woon, H. H. Zeineldin, D. Svetinovic „A differential sequence component protection scheme for microgrids with inverter-based distributed generators“ IEEE (2014)

M. K. Jena, S. R. Samantaray, and L. Tripathy „Decision tree induced fuzzy rule based differential relaying for transmission line including unified power flow controller and windfarms“ IET Generation, Transmission & Distribution (2014)

ja teised teemat käsitlevad artiklid.

9. Lõputöö konsultandid

Puuduvad.

10. Töö etapid ja ajakava

Kirjanduse kogumine ja läbitöötamine – kevad 2020

Lähteandmete kogumine – kevad 2020

Teoreetilise osa kirjutamine – kevad 2020

Modelleerimise teostamine ja konfigureerimine – 18.01.2021

Katsetamine labori seadmetega – 31.01.2021

Algoritmi ülesehitus ja katsetamine – 28.02.2021

Uuringu tulemuste kirjeldamine – 17.03.2021

Järelduste kirjutamine – 31.03.2021

Kokkuvõtte koostamine – 07.04.2021

Töö esimene versioon valmis – 26.04.2021

Juhendajale läbilugemiseks saatmine – 26.04.2021

Paranduste sisseviimine – aprill, mai 2021

Kaitsmistaotluse esitamise lõpptähtaeg – 10.05.2021

Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine – 2021 kevad 10.05.2021

Töö lõplik versioon valmis – 2021 kevad 18.05.2021

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	12
Lühendite ja tähiste loetelu	13
SISSEJUHATUS	14
1. TEOREETILISED ALUSED	16
1.1 Tänapäevane releekaitse kontseptsioon	16
1.1.1 Selektiivsus	16
1.1.2 Kaitsefunktsioonid	17
1.1.3 Liini piki-diferentsiaalkaitse	18
1.2 IEC 61850 sidevõrk	19
1.2.1 IEC 61850 sidevõrgu arhitektuur	20
1.2.2 IEC 61850 informatsiooni mudel	21
1.2.3 Aja sünkronisatsioon	22
1.2.4 Latentsus	23
1.3 Tehisintellekt elektrialal	24
1.3.1 Masinõpe algoritmid releekaitstes	25
1.3.2 Masinõpe rakendused releekaitstes	26
2. RELEEKAITSE KONTSEPTSIOON	29
2.1 IEC 61850 põhine diferentsiaalkaitse	29
2.1.1 Rakendusviited	30
2.1.2 Diferentsiaalkaitse algoritm	31
2.1.3 Informatsiooni puudumine	32
2.1.4 Sidekanalite läbilaskevõime	34
2.2 Tehisintellekti põhine releekaitse	35
2.2.1 Tsentraalseadmete ja IED vaheline varundatus	36
2.3 Võrdlus olemasoleva kontseptsiooniga	38
3. ALGORITMI ARENDUS	39
3.1 Rakendustestid	39
3.1.1 Mudeli diferentsiaalkaitse algoritm	40
3.1.2 Liin 1 rakendustest 1: normaalrežiim	43
3.1.3 Liin 1 rakendustest 2: BRK2 siderike	45
3.1.4 Liin 1 rakendustest 3: BRK2 ja BRK3 siderike	49
3.1.5 Liin 1 rakendustest 4: SRC1 väljas, BRK2 ja BRK3 siderike	52
3.2 Tulemuste uuring	55

3.2.1 Maksimaalne rakendusaeg	56
3.2.2 Minimaalne rakendusaeg	56
3.2.3 Parendamise võimalused	57
3.2.4 Järeldused	59
KOKKUVÕTE	61
KASUTATUD KIRJANDUS	64
LISAD	66
L1.1 IED PÕHIMÕTTESKEEM	67
L1.2 DIFERENTSIAALKAITSE RAKENDUMISE AJAD	68
L1.3 LATENTSUSE PÕHJUSED JA VÄHENDAMISE VÕIMALUSED	69
L2.1 DIFERENTSIAALKAITSE ALGORITM	70
L3.1 RSCAD ELEKTRIVÕRGU SKEEM	71
L3.2 ALGORITMI TEST: LIIN 1 (10 %), L1-MAA LÜHIS, RIKKED PUUDUVAD	72
L3.3 ALGORITMI TEST: LIIN 1 (40%), L3-MAA LÜHIS, RIKKED PUUDUVAD	73
L3.4 ALGORITMI TEST: LIIN 1 (10 %), L1-MAA LÜHIS, BRK2 RIKE	74
L3.5 ALGORITMI TEST: LIIN 1 (85%), L1-L3 LÜHIS, BRK2 RIKE	75
L3.6 ALGORITMI TEST: LIIN 1 (40%), L1 LÜHIS, BRK2 JA BRK3 RIKE	76
L3.7 ALGORITMI TEST: LIIN 1 (10 %), L1-L3 LÜHIS, BRK2 JA BRK3 RIKE	77
L3.8 ALGORITMI TEST: LIIN 1 (85%), L3 LÜHIS, BRK2 JA BRK3 RIKE, SRC1 VÄLJAS	78
L3.9 ALGORITMI TEST: LIIN 1 (40%), L1-L2-L3 LÜHIS, BRK2 JA BRK3 RIKE, SRC1 VÄLJAS	79

EESSÕNA

Aastast 2021 on Eesti Vabariigis 1000 MW reguleeritava võimsusega elektrienergia tootmisvõimsusi, millele lisandub 1000 MW põhja-lõuna suunas välisühendusi. Venemaa ühend-elektrisüsteemist (IPS/UPS) eraldumine on kavas aastal 2025. Seoses Euroopa Liidu kliima-regulatsiooni eesmärkide täitmisega on kavas rajada Eesti Vabariigi territooriumile mitmeid suuremaid tuuleparke, mis on avatud elektriturul konkurentsivõimelisemad võrreldes kasutusel olevate põlevkivi elektrijaamadega. Seoses uueneva elektrienergia tootmiskontseptsiooniga muutuvad süsteemi lühisvoolud väiksemaks ja tekib vajadus ülekandevõrgu releekaitse ümber seadistada, kuid on risk, et sellest ei piisa. Ka suurte tuuleparkide (100+ MW) lühisvõimsus on väga väike, ülekandevõrgu lühise korral on tõenäoline lähimate tuuleparkide võrgust eraldumine ja sellele järgnev tootmisvõimsuste puudujääk. Eesti elektrivõrgus napib kiirelt reguleeritavat võimsust ja on võimalik laiem elektrisüsteemi avarii, mille tulemusel tekivad tarbijatel elektrikatkestused. On oluline selliste riskide realiseerumise tõenäosust minimeerida ja välja töötada lühiste selektiivseks väljalülitamiseks releekaitse kontseptsioon, mis oleks töökindel muutunud oludes.

Lühendite ja tähiste loetelu

AJ – alajaam

DT - *Decision Tree*

GOOSE - *Generic Object Oriented Substation Event*

GPS - *Global Positioning System*

IEC 61850 – *International Electrotechnical Commission* poolt loodud IED side standard

IED – *Intelligent Electronic Device*

IEEE C37.94 – Liini piki-diferentsiaalkaitsete vaheline andmeside standard

IEEE C37.118 – Sünkrofaasorite edastamiseks loodud andmeside standard

IPS – *Integrated Power System*

IRIG-B – *Inter-range instrumentation group B*

MMS - *Manufacturing Message Specification*

NTP – *Network Time Protocol*

OSI model - *Open Systems Interconnection Model*

PMU – *Phasor Measurement Unit*

PPS – *Pulse Per Second*

PT – pingetrafo

PTPv2 – *Precision Time Protocol version 2*

R-GOOSE – *Routable GOOSE*

R-SV – *Routable SV*

RSTP - *Rapid Spanning Tree Protocol*

SCADA – *Supervisory Control and Data Acquisition*

SNMP – *Simple Network Management Protocol*

Sntp – *Simple Network Time Protocol*

SV – *Sampled Values*

TCP – *Transmission Control Protocol*

TS – tsentraalseade

UDP - *User Datagram Protocol*

UPFC – *Unified Power Flow Controller*

UPS – *Unified Power System of Russia*

VL – võimsuslüli

VLAN – *Virtual Local Area Network*

VLTK – võimsuslüli tõekekaitse

VPN – *Virtual Private Network*

VT – voolutrafo

WAPS – *Wide-Area Protection System*

SISSEJUHATUS

Käesolevas töös vaadeldakse releekaitse kontseptsiooni, mis käsitleb elektrivõrgu põhikaitsetena tsentraliseeritud laiapõhjalist diferentsiaalkaitset, mida on täiendatud masinõppe algoritmidega, et tagada süsteemi töökindlus ja õige rakendumine. Vaadeldav laiapõhjaline diferentsiaalkaitse kasutab IED-de poolt IEC 61850 protokolliga edastatud mõõteväärtuseid, mille alusel toimib seire, ja tuvastades lühise saabab avariilise võrguosaga piirnevatele IED-dele väljalülitamise käsud.

Vaadeldav skeem nõuab teoreetilisi aluseid releekaitsetes, sideprotokollides ja masinõppes, mida on vastavalt käsitletud esimese peatüki vastavates alapunktides. Teoreetilised alused käsitlevad kitsalt vaadeldavaid valdkondi ning erinevatest allikatest on välja toodud ainult vajalik, et käesolevat tööd põhjendada.

Teises peatükis käsitletakse süvitsi vaadeldavat kontseptsiooni ja antakse lugejale ülevaade arendatavast releekaitse kontseptsioonist. Selle tarbeks on analüüsitud IEC 61850 protokollide võimekust edastada mõõteväärtuseid ja uuritud võimalike probleemseid olukordi. Samas peatükis on analüüsitud sobivat diferentsiaalkaitse algoritmi, mis oleks toimiv ka olukorras, kus kõik mõõteväärtused ei ole kättesaadavad. Selle eesmärgiks on vaadeldava kaitse töökindluse suurendamine ning käsitleb ka olukorda, kus tsentraalseadme võimaliku rikke korral säiliks kaitse funktsionaalsus. Selle tagamiseks kasutatakse tsentraalseadmete varundamist, kus vigase tsentraalseadme kaitsetsoon jagatakse masinõppe algoritmi abil naaberpiirkondade tsentraalseadmete vahel.

Kolmandas peatükis töötatakse välja laiapõhjalise diferentsiaalkaitse algoritm, mille käigus tuuakse valemite ja loogika skeemide alusel välja olulised seosed töökindluse, selektiivsuse ja rakendumise loogika ülesehitusest. Läbi viidud algoritmi rakendustestide info ja nende analüüsi põhjal on koostatud hinnang releekaitse kontseptsiooni teostatavusest tehnilise ja majanduslike näitajate vaates.

Sarnast WAPS kontseptsiooni on kasutatud osades teaduslikes uuringutes, kus mõõteväärtusi edastatakse PMU-dega. Selline lähenemine ei ole aga käesolevas töös eelistatud lähenemine, sest näiteks Eesti 110 kV võrgus ei leidu PMU-sid ning nende paigaldamine vajab mahukat investeringut. Probleemiks osutub ka PMU-de kiiretoimeliste väljundreleede puudumine, mis on tarvilikud VL-dele käskude saatmiseks ja puudulik küberturvet PMU sünkrofaasorite andmeside protokollis IEEE C37.118. Lisaks tuleks tsentraalseadmetest käsud saata IED-le, kuid selline lähenemine suurendaks

tsentraalseadmega sides olevate seadmete hulka ligikaudu kaks korda ja on võimalik ülekoormuse põhjustaja. Taolise olukorra vältimiseks tuleks omakorda tsentraalseadmete arvu suurendada, mis võib muuta vaadeldava skeemi kokkuvõttes oluliselt kulukamaks, kui käesoleva töö releekaitse kontseptsiooni. Alternatiivina on võimalik kasutada IED-de siseste sünkrofaasorite edastamise funktsiooni, mida uuema põlvkonna seadmed võimaldavad, kuid see ei korvaks küberturbe puudulikkust. Seevastu IEC 61850-90-5 R-GOOSE ja R-SV andmeside protokoll sisaldab krüpteerimise ja autentimise võimalust, mistõttu on seda käesolevas töös peetud otstarbekamaks lahenduseks.

1. TEOREETILISED ALUSED

Esimeses peatükis käsitletakse teoreetilisi aluseid, et teises peatükis oleval reelekaitse kontseptsiooni ideed mõista. Selleks on läbi töötatud mitmed teaduslikud artiklid, mis käsitlevad reelekaitset, IEC 61850 sideprotokolli, tehisintellekti ja WAPS temaatikat.

1.1 Tänapäevane reelekaitse kontseptsioon

Elektrivõrgu rikete, lühiste ja kõik võimalike avariide kiire likvideerimine ning nende laienemise ärahoidmine on reelekaitse ülesanne. Praeguse aja elektrivõrgu reelekaitsetes kasutatakse digitaalseid kaitsereleesid ehk IED-sid. IED-d sisaldavad erinevaid kaitse-, juhtimis-, seire- ja automaatika funktsioone ja võimaldavad digitaalset informatsiooni vahetust juhtimiskeskusega.

Reelekaitse on ülesehitatud põhimõttel, et iga võrguosa oleks kaitstud võimaliku rikke korral (ka reelekaitse rikked – N-1 põhimõttel) ja süsteemist eraldatakse ainult rikkega võrguosa. Selleks kasutatakse mõõtetrafosid, mille abil muundatakse ja edastatakse IED-de jaoks mõõtetavas suuruses väärtused mõõtemoodulile, mille põhjal IED seirab reaajas kaitsetsoonis olevat elektrivõrgu osa, näiteks elektriliini, trafot, AJ latti, reaktorit jne.

Kui IED kaitsetsoonis juhtub avarii, lülitatakse rikkega võrguosa ees olev VL automaatselt välja ja saadetakse vastav info juhtimiskeskusele, kus operatiivpersonal sündmusele reageerib. Kaitsefunktsiooni käivituseks on sündmus elektrivõrgus, mis põhjustab pinget, voolu ja sageduse väärtuste anomaalia. Selliseks sündmuseks võib olla näiteks lühis, võrguelemendi ülekoormus, seadme rike või aktiivvõimsuse puudu- või ülejääk. IED tööpõhimõtet seletav joonis on näidatud lisas L1.1.

1.1.1 Selektiivsus

IED kaitsefunktsioonid jagunevad selektiivsuse suhtes kahte kategooriasse [1]:

1. Absoluutselt selektiivne kaitsefunktsioon - kaitse, mille toimimine ja objektiselektiivsus olenevad kaitseobjekti iga otsa elektriliste suuruste võrdlusest. (Näide: diferentsiaalkaitse)

2. Suhteliselt selektiivne kaitsefunktsioon - kaitse, mille toimimine ja objektiselektiivsus olenevad elektriliste suuruste mõõtmisest kaitseobjekti ühes otsas. Suhteliselt selektiivse kaitse objektiselektiivsus võib oleneda selle sätte väärtustest, eriti ajasättest. (Näide: distantskaitse, voolukaitse)

Absoluutselt selektiivsed kaitsed töötavad reeglina viiteta ehk hetkeliselt (nimetatakse ka hetkkaitseks), tavaliselt rakendusaeg sündmusest väljalülituseni 20 – 60 ms, kuna selline kaitsefunktsioon ei käivitu kaitsetsooni välistele sündmustele ja välja lülitatakse ainult rikkega võrguosa. Seevastu suhteliselt selektiivsed kaitsed toimivad tavaliselt viitega, et oleks tagatud kooskõlastatus teiste elektrivõrgu kaitsetega ja õige rakendumine. Tavaliselt kasutatakse absoluutselt selektiivseid kaitsesid põhikaitseks ja suhteliselt selektiivseid kaitsesid reserv- või varukaitsena (viimast kasutatakse näiteks pingeahelate rikked).

1.1.2 Kaitsefunktsioonid

IED kaitsefunktsioonid jagunevad kaitstava elemendi suhtes kahte kategooriasse [1]:

1. Elemendikaitse – kaitsefunktsioonid, mille ülesanne on avariiline võrguosa eraldada ning seeläbi ära hoida suuremad kahjustused sündmuspaigal ja avarii laienemine tervele võrguosale. Enamus IED elemendikaitsesid seadistatakse vastavalt kaitsetsooni minimaalse ja maksimaalse lühisvoolu põhjal tehtud sätetarvustele, erandiks on näiteks trafode tehnoloogilised kaitsesid.
2. Süsteemikaitse – kaitsefunktsioonid, mille ülesanne on kaitsta elektrivõrku aktiivvõimsuse üle- või puudujäägi ja asünkroonkäigu eest. IED süsteemikaitsesid seadistatakse, lähtudes süsteemi stabiilsus kriteeriumitest, ja on juhtimiskeskuse operatiivpersonalilt poolt töösse ja tööst välja juhitud.

IED põhilised elemendikaitsesid on:

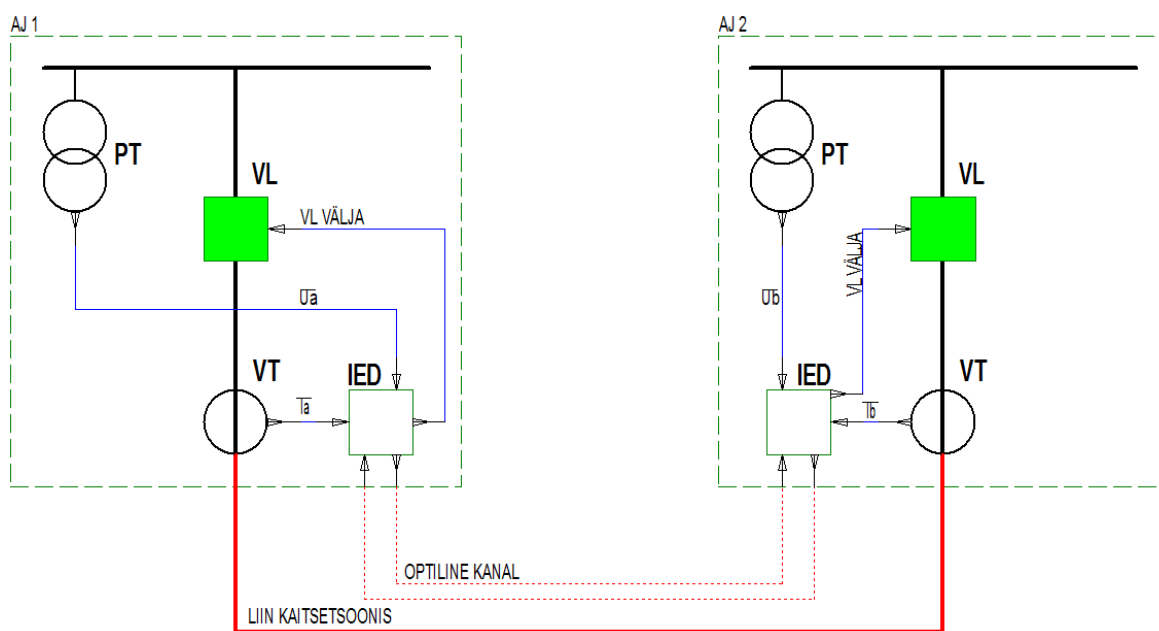
- Liigvoolukaitse – suhteliselt selektiivne suunatud (pinge ahelate olemasolul) või suunamata kaitse, mis rakendub viitega või viiteta, kui IED poolt mõõdetud voolu väärtus ületab sätte väärtuse. Põhikaitseks kasutatakse jaotusvõrgus, reserv- või varukaitsena põhivõrgus. Õige rakendumise põhiliseks eelduseks on, et kaitsetsoonis arvutuslik lühisvool on samaväärne tegeliku lühisvooluga.
- Distantskaitse – suhteliselt või (sidekanali olemasolul) absoluutselt selektiivne suunatud kaitse, mis rakendub viitega või viiteta, kui IED arvutab lühisvoolu ja -pinge alusel lühiskoha takistuseks väiksema suuruse, kui sätestatud näivtakistus (või aktiiv- ja reaktiivtakistus). Põhikaitseks kasutatakse põhivõrgus liinide kaitseks, reservkaitsena trafode kaitseks, harvem leiab kasutust

jaotusvõrgus. Õige rakendamise põhiliseks eelduseks on, et kaitsetsoonis olev arvutuslik takistus on samaväärne tegeliku takistusega.

- Diferentsiaalkaitse – absoluutselt selektiivne kaitse, mis rakendub viiteta, kui kaitsetsooni sisenevate ja väljuvate voolufaasorite erinevus ületab sätestatud väärtust. Põhikaitkena kasutatakse põhivõrgus liinide, trafode ja AJ lattide kaitseks, jaotusvõrgus kasutatakse trafode põhikaitseks. Õige rakendamise põhiliseks eelduseks on kaitsetsooni kõikide otste voolu väärtuste olemasolu.

1.1.3 Liini piki-diferentsiaalkaitse

Diferentsiaalkaitse vajab seireks kaitsetsooni kõikide otste voolu mõõteväärtuseid. Trafo diferentsiaalkaitse puhul on võimalik kõik mõõtmised füüsiliselt ühendada IED-ga, sest AJ sisesed vahemaad on üldjuhul lühikesed. Liini piki-diferentsiaalkaitsel (joonisel 1.1), kasutatakse lahendust, kus liini lõppudes paiknevad IED-d edastavad teineteisele mõõteväärtuseid üle optilise sidekanali, kasutades selleks IEEE C37.94 protokollit.



Joonis 1.1. Liini piki-diferentsiaalkaitse

AJ 1 IED mõõdab esimeses liini otsas voolu \bar{I}_a ja AJ 2 IED mõõdab teises liini otsas voolu \bar{I}_b . Nende kahe mõõteväärtuse erinevust ehk diferentsiaalvoolu I_{diff} kirjeldab valem 1.1:

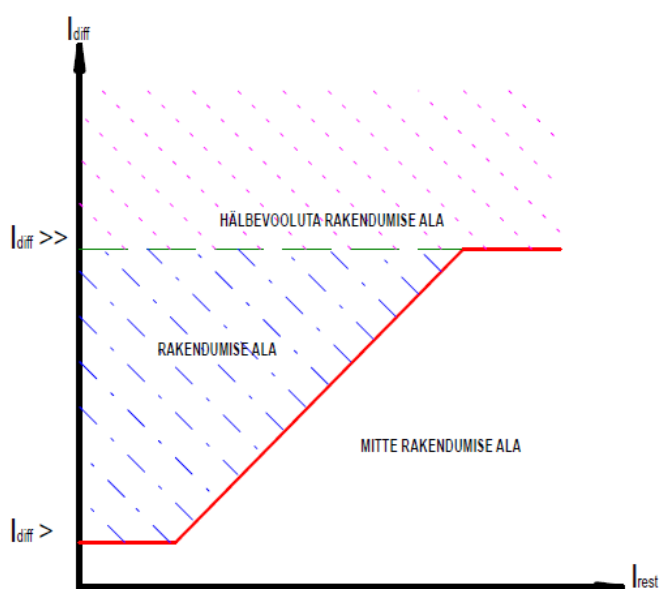
$$I_{diff} = |\bar{I}_a - \bar{I}_b| \quad (1.1)$$

\bar{I}_a ja \bar{I}_b ei ole kunagi täiesti võrdsed, sest liini parameetrid nagu mahtuvus, kaod, paralleel-liinide puhul ka induktioon, mõõtetrafode ja IED mõõtevead mõjutavad voolu

vektorite väärtusi. Selleks, et vältida valerakendumist arvutab diferentsiaalkaitse hálbevoolu I_{rest} , mida on kirjeldab valem 1.2:

$$I_{rest} = |\bar{I}_a| + |\bar{I}_b| \quad (1.2)$$

Arvutatud väärtustest I_{diff} ja I_{rest} moodustub sõltuva sättega karakteristik, mida on kirjeldatud joonisel 1.2 graafikul. [2]



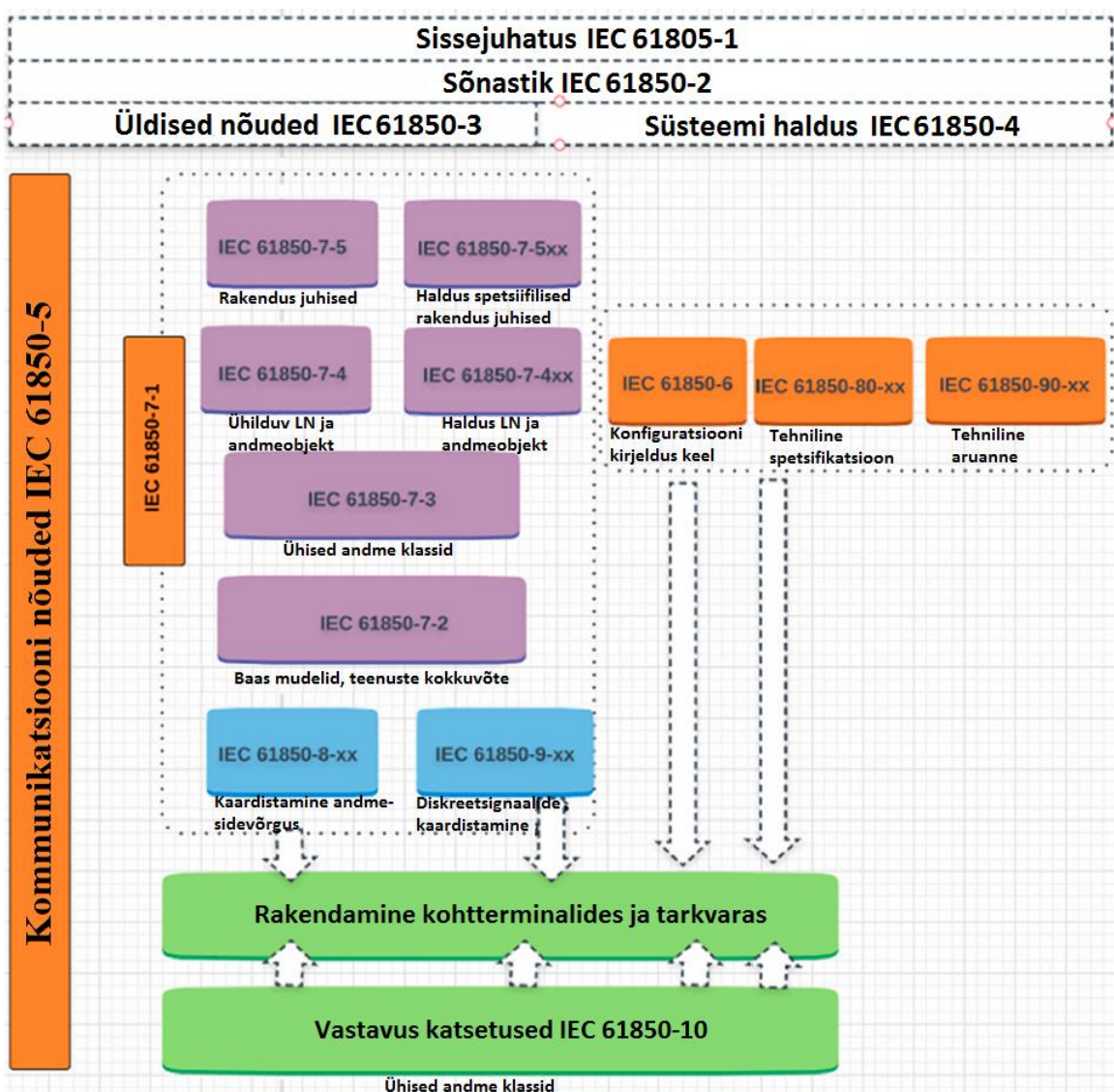
Graafik 1.2. Diferentsiaalkaitse karakteristik

Graafikust järeldub, et mida suurem on pidurdusvool, seda suurem peab olema I_{diff} , et kaitse rakenduks. Suure I_{diff} korral, mida tähistab graafikul säte $I_{diff} >>$, kaitse ei arvuta hálbevoolu ja toimub kohene rakendumine. Releekaitse testid (lisa L1.2), näitavad, et hálbevooluta rakendumine toimub 20 ms alates sündmusest kuni väljalülituskäsu saatmiseni, samas kui sättest $I_{diff} >>$ väiksema ja sättest $I_{diff} >$ suurema I_{diff} korral rakendub kaitse 30 ms jooksul.

1.2 IEC 61850 sidevõrk

Suur osa tänapäeva IED-sid kasutab sideprotokollina IEC 61850 standardit, mille struktuur on kirjeldatud joonisel 1.3. [3] Standardi põhised sideprotokolli kasutatakse üldjuhul AJ sisevõrgus aga võimaldab ka AJ ja juhtimiskeskuse vahelist andmevahetust. Eesti elektrivõrkudes on IEC 61850 protokoll rakendatud MMS edastamisel IED – RTU vahelises suhtluses, GOOSE kasutatakse jaotusvõrgu AJ-des ning SV kasutamine on

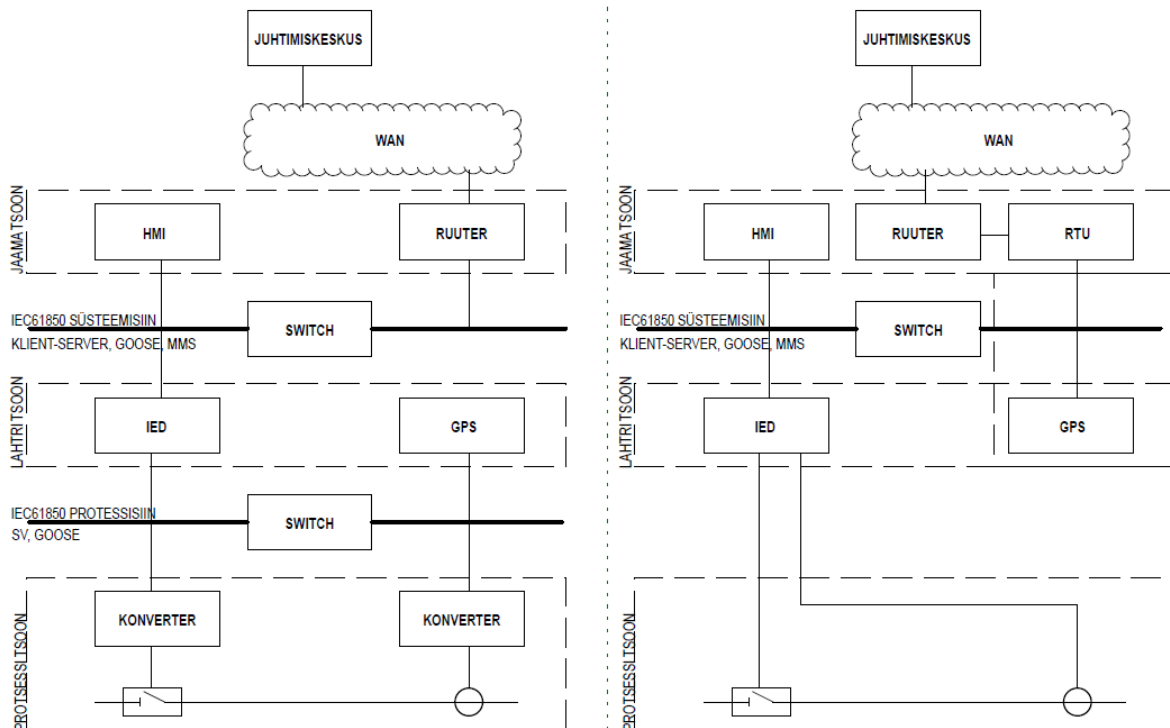
Eestis pigem erandlik. Järgnevas osas on kirjeldatud IEC 61850 standardi teoreetilist osa, mida on vaja teada käesoleva töö mõistmiseks.



Joonis 1.3. IEC 61850 struktuur [3]

1.2.1 IEC 61850 sidevõrgu arhitektuur

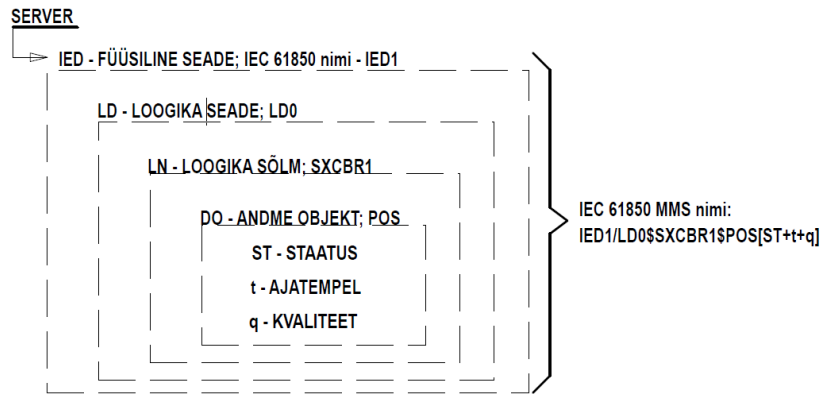
IEC 61850 standard defineerib kaks informatsiooni siini, milleks on süsteemisiin (*Station Bus*) ja protsessisiin (*Process Bus*). Protsessisiinis suunatakse protsessitsooni digitaalsed signaalid vastava lahtritsooni IED-le. IED analüüsib, arvutab ja edastab informatsiooni süsteemisiini, kus toimub informatsiooni vahetus operatiivpersonaliga ja protsessisiini, näiteks juhtimise käsud. [4] IEC 61850 arhitektuuri kirjeldab joonise 1.4 vasak pool, seevastu parem pool kirjeldab Eesti AJ-de tegelikku sidevõrgu arhitektuuri.



Joonis 1.4. IEC 61850 arhitektuur

1.2.2 IEC 61850 informatsiooni mudel

IEC 61850 server-klient andmevahetus põhineb IP võrku saadetavatel ja vastuvõetavatel andmepakettidel MMS, mis on defineeritud standardiseeritud informatsiooni mudeliga ja TCP/IP protokollina. Iga IED omab kindlat IP aadressi ja nime, mille alusel on defineeritud füüsiline seade. Füüsiline seade koosneb ühest või mitmest loogika seadmest ehk *Logical Device* (LD). Loogika seade sisaldab ühte või mitmeid loogika sõlmesid ehk *Logical Node* (LN), mis on seotud kindla lülitusseadme, mõõtmis-, kaitsefunktsiooni või informatsiooni blokiga. Loogika sõlmed koosnevad mitmetest andme objektidest ehk *Data Object* (DO), mis sisaldavad loogika sõlme andmeid nagu lülitusseadme asendit, mõõteväärtuseid, kaitsefunktsiooni olekut jne. Andme objektid sisaldavad andme omadusi ehk *Data Attribute* (DA), milleks on andme ajatempel, staatus, kvaliteet jne. [5] IEC 61850 informatsiooni mudelit kirjeldab joonis 1.5.



Joonis 1.5. IEC 61850 informatsiooni mudel

IEC 61850-8-1 GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Event*) informatsiooni mudel on sarnane, kuid erineb MMS-st selle poolest, et informatsiooni edastatakse andmeside võrku OSI raammudelis kanalikihis (kiht 2) UDP/IP protokollina ja IED-d seadistatakse informatsiooni vastu võtma. IEC 61850-9-2 SV (*sampled values*) informatsiooni mudel sisaldab diskreetsignaalina mõõteväärtuseid UDP/IP protokollina. GOOSE ja SV on ettenähtud AJ siseste signaalide ja mõõtmiste edastamiseks IED-de vahel, kuid IEC 61850-90-5 standard annab võimaluse saata GOOSE sõnumeid ja SV mõõteväärtuseid krüpteerimise ja autentimise võimalusega üle WAN võrgu kasutades selleks OSI raammudeli transport kihti (kiht 5), näiteks ühest AJ-st teise, kasutades selleks VLAN ja VPN ühendusi. [6]

1.2.3 Aja sünkronisatsioon

IED sündmuste salvestamisel, edastamisel ja seadmete juhtimisel on oluline, et info oleks samas ajas. IED aja vastavusse viimiseks ehk ajasünkroniseerimiseks kasutatakse GPS satelliitide poolt saadetud rahvusvahelist aatomiaega (TAI), mida võtab vastu AJ GPS vastuvõtja täpsusega ± 250 ns [7]. GPS vastuvõtja poolt edastatakse sobiva protokolliga aeg IED-le. IEC 61850 protokollil puhul on selleks üldjuhul SNTP, mille signaali on võimalik saata LAN ühenduse kaudu IED-le, kui selles on ajaserveriks määratud GPS vastuvõtja IP aadress. SNTP täpsuseks on 1 ms, mis tähendab et ei sobi IEC 61850-9-2 SV puhul kasutamiseks, kus täpsus nõue on $1 \mu\text{s}$ ajaserveri signaalil ja koos sidevõrgu latentsusega $4 \mu\text{s}$. Vastavat täpsust suudetakse tagada IRIG-B, PPS ja PTPv2 ajasünkronisatsiooni protokollidega, mida toetavad ka enamused Eesti 110 kV AJ-des paigaldatud ajaserverid (näiteks Meinberg M500) ja IED-d.

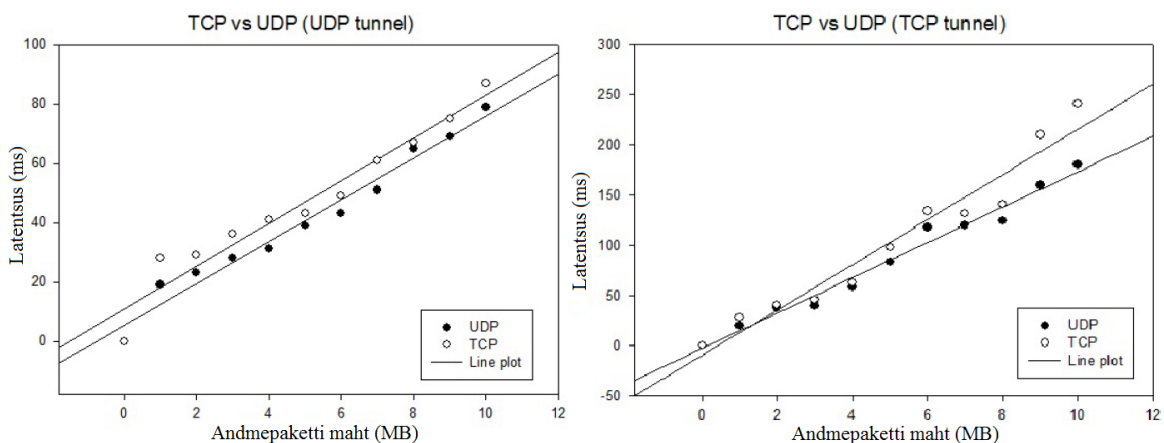
Kui IED saadab või võtab vastu sündmuse paketi, siis saadetavas/vastuvõetavas IEC 61850 MMS/GOOSE/SV paketi sisaldub ajatempel, mis annab infot sündmuse toimumise ajast. Sündmuseks võib siin juures olla iga signaal, mõõteväärtus või

juhtimiskorraldus, mida on IED seadistatud registreerima.

1.2.4 Latentsus

Latentsus ehk *latency* on hilistuse aeg (ms), mis kulub andmepaketil jõudmaks saatjast vastuvõtjani. Üle WAN-i liikuvatel andmepakettidel on arvestatavalt suur latentsus. Allikas [8] on analüüsitud latentsuse põhjuseid ja nende vähendamise võimalusi, selle kokkuvõtte on näidatud lisas L1.3. Kuna valdav osa latentsusest tuleneb sidevõrgu eripäradest ei ole nende täpsem analüüsimine käesolevas töös asjakohane. Küll tasub siin juures analüüsida latentsuse suurust IEC 61850-90-5 R-GOOSE ja R-SV andmepakettidel.

Selle töö raames on oluline mõista TCP/IP ja UDP/IP protokollide kasutuse valdkonna erinevust ja nende latentsuse erinevust. TCP/IP protokoll võimaldab saadetava ja vastuvõetavate andmepakettide kontrolli, vajadused taas edastamist ning selle tõttu on garanteeritud andmete kohale jõudmine, kuid miinuseks on suurem latentsus, mis on põhjustatud kontrollist. Selle tõttu kasutatakse TCP/IP protokollid valdavalt kohtades, kus on oluline andmete terviklikkus ja mitte nende aktuaalsus. UDP/IP protokollis toimub aga andmete pidev edastus ja vigaseid, kaduma läinud andmepakette ei edastata uuesti. Selle tõttu kasutatakse UDP/IP kohtades, kus on oluline andmete aktuaalsus ja nende kohale jõudmine on sekundaarse tähtsusega. Allikas [9] tehtud katsetulemuste alusel, mida on näidatud joonisel 1.6, saab järeldada, et UDP/IP protokollid latentsus on märgatavalt väiksem kui seda on TCP/IP protokollid.



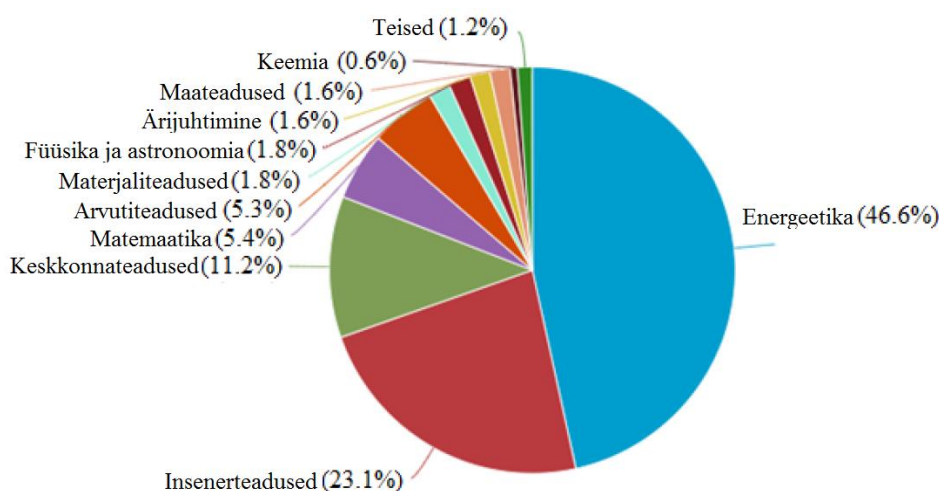
Joonis 1.6. Sideühenduse latentsus üle WAN-i UDP ja TCP protokollidel

Oluline on ka analüüsida erinevate füüsiliste kanalite latentsust. Allikas [10] käsitletud katses saadetakse IEC 61850-90-5 R-GOOSE ja R-SV andmepaketid läbi turvamata avaliku 3GPP LTE võrgu UDP VPN tunneli kaudu ja mõõdetakse erinevate suurusega

andmepakettidega latentsust ja kohalejõudmise osakaalu. Katsetulemustes selgub, et 3GPP LTE võrgus on IEC 61850-90-5 R-GOOSE ja R-SV andmepakettide latentsus 10 kuni 24 ms. Siin juures tasub märkida, et 3GPP LTE tehnoloogia on see, mida Eesti mobiilside interneti pakkujad nimetavad 4G-ks. Eesti põhivõrgu AJ-des ei ole 4G kasutamine üldjuhul levinud praktika ja tuleviku välja vaates on 5G uurimine tunduvalt asjakohasem, kui sobiliku side lahendusena AJ-s, kus puudub optiline ja DSL sidekanal. Läbi viiduid praktilisi katseid 5G-ga ei ole käesoleva töö koostamise ajaks piisaval määral tehtud ja see tõttu toetatakse edaspidises analüüsis teoreetilistele väärtustele. Allika [11] põhjal on automatiseeritud tööstuse valdkondadele, mille alla kuulub ka energeetika, ennustatud 5G sideühenduse korral latentsust 1-10 ms.

1.3 Tehisintellekt elektrialal

Tehisintellekt on mõistena väga lai ja tihti väideldakse teemal, kas masin saab olla intelligentne. Käesolevas töös on jäetud filosoofilised küsimused kõrvale ja on analüüsitud tehnilist poolt, kuidas masinõpet ja mõtlevate masinate algoritme rakendada releekaitses, milles on esmalt välja toodud tehisintellekti ülesanded tänapäeva energeetikas. Allikas [12] on kokku võetud viimase aja masinõppe metodikad ja ka näidatud masinõppe rakenduste osakaalu erinevates valdkondades (joonisel 1.7.), millest võib järeldada, et energeetikas leiab masinõppe laialdast kasutust.



Joonis 1.7. Masinõppe rakenduste osakaal [12]

Energeetika süsteemides rakendatakse enim 10 masinõppe meetodit, milleks on:

- ANN – *Artificial neural network*
- MLP - *Multilayer perceptron*

- ELM - *Extreme learning machines*
- SVM - *Support-vector machine*
- WNN - *Weighted Nearest Neighbor*
- ANFIS - *Adaptive neuro fuzzy inference system*
- DT – *Decision tree*
- DL – *Deep learning*
- EL – *Ensemble learning*
- AHML - *Advanced hybrid machine learning*

Eespool mainitud meetodid on energeetikas enim kasutatud tarbimise, elektrihinna, päikesepaneelide ja tuulikute toodangumahtude prognoosimiseks. Releekaitstes on masinõpet kasutatud suhteliselt vähe, sest enamuseel pool toodud meetoditest eeldab mineviku info põhjal, ehk õpitud seoste põhjal, otsuste tegemist olukorras, kus suure mahuga informatsiooni töötlemine oleks muidu ajakulukas teissuguse lähenemisviisi korral. Lühiseid ei ole aga võimalik prognoosida, kuna nende tekkimine on juhuslike olude kokkulangemisest tingitud. Releekaitstes on seetõttu kasutatud masinõppe algoritme eelkõige selleks, et õpetada IED-le lühiste ära tundmist ning see on ka käesolevas töös üks võimalikke algoritmi parendamise võimalusi. Käesolevas magistritöös on masinõppe eesmärk IED-de poolt edastatud mõõteväärtuste analüüsimine ja teoreetilisel tasemel tsentraalseadmete koormusjaotuse optimeerimine.

1.3.1 Masinõppe algoritmid releekaitstes

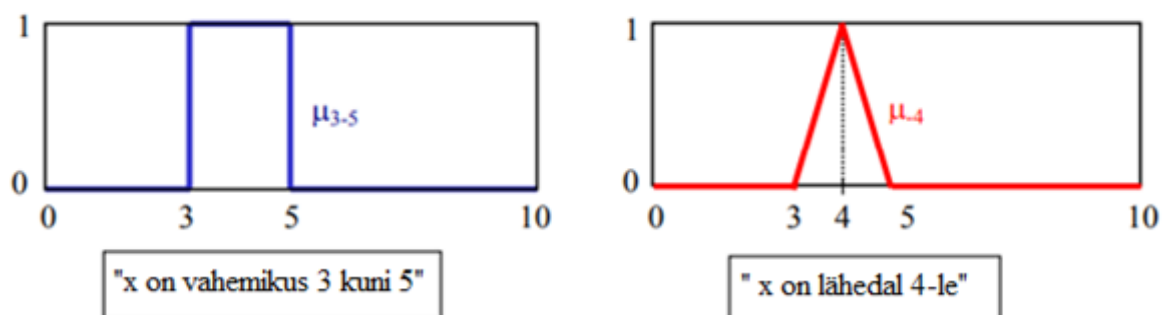
Releekaitstes on uuritud masinõppe meetodeid allikates [13] ja [14], kus on kasutatud DT ja *fuzzy logic* (hägusloogika) algoritme. Selleks, et neid mõista, tuleb selgitada vastavate algoritmide tööpõhimõtteid.

Otsustuspuu

DT ehk *Decision tree* (otsustuspuu) on masinõppe meetod, mis loob sisend parameetrite ja määratud reeglistiku alusel jah/ei loogikaga otsuste ahelad, millest järelduvad lõplikud otsused. Meetodi eeliseks on keerulise probleemi lahendamine kujul, mida on hiljem lihtne visuaalselt kirjeldada.

Hägasloogika

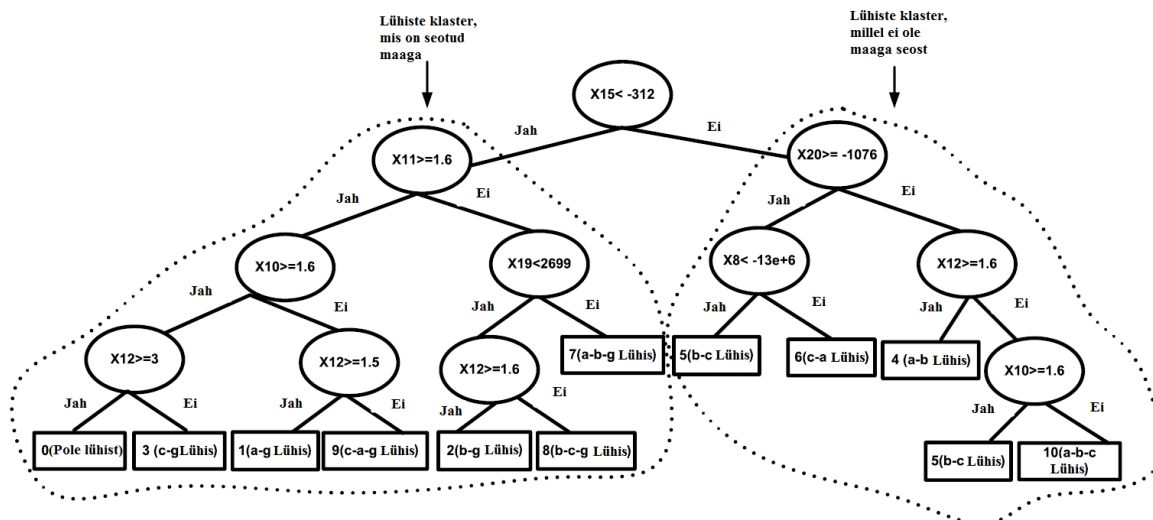
Fuzzy Logic (hägasloogika) on Lotfi A. Zadeh hägas hulgateooriale ülesehitatud masinõppe kontseptsioon, kus sisendandmete hägusa klassifikatsiooni põhjal on võimalik teha lõplike otsuseid. Hulgateooria ja hägas hulgateooria erinevus on näidatud joonisel 1.8, kus otsitavaks suuruseks on väärtus 4. Hulgateooria kirjeldab suurust 4 kui väärtust vahemikus 3 kuni 5 ja hägas hulgateooria kui tõenäosust 3 ja 5 vahel.



Joonis 1.8. Hulgateooria ja hägushulga teooria erinevus [15]

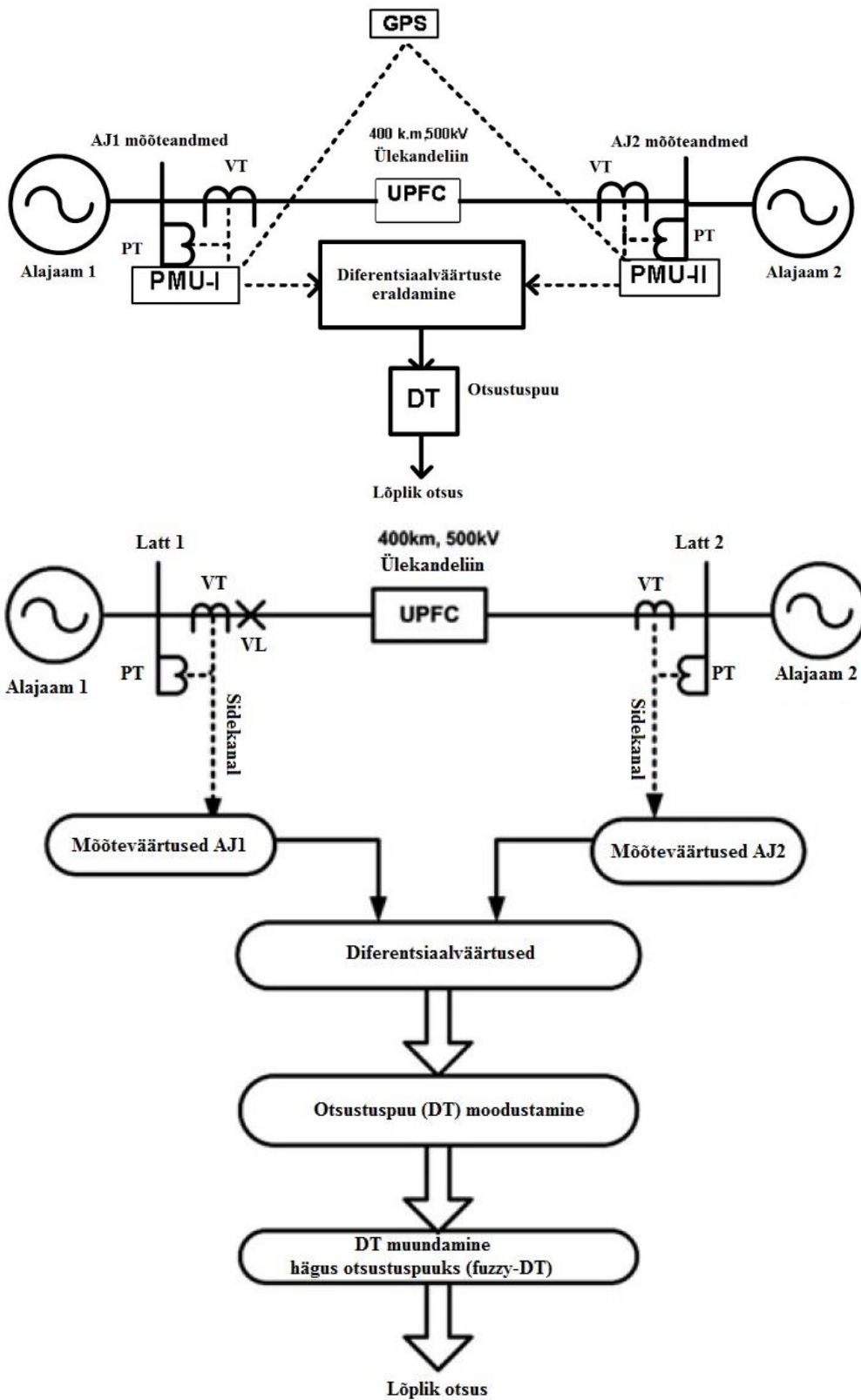
1.3.2 Masinõppe rakendused releekaitstes

Allikates [18] ja [19] on uuritud PMU-de poolt edastatud mõõteväärtuste töötlemist otsustuspuu abil, mis kaudu suudetakse kiirelt tuvastada lühis ja selle liik. Mõõteväärtuste põhjal arvutatakse päri-, vastu- ja nulljärgnevus-võimsused, -pinged ja -voolud ning nende muutumise kiirused (dx/dt). Otsustuspuu treenimiseks kasutatud 21 sisend parameetrist (X1 kuni X21) osutusid allika [13] katses treenitud ja testitud algoritmile vajalikuks 7 parameetrit, et tuvastada 40 – 60 ms jooksul lühis ja määrata kindlaks selle liik. Selle meetodi eeliseks osutus suur töökindlus olukordades, kus tavaline liini piki-diferentsiaalraitse võib valesti rakenduda. Allika [13] tehisintellekti poolt loodud otsustuspuu on näidatud joonisel 1.9, kus X8 on B faasi diferentsiaalpingete muutumise kiirus, X10 kuni X12 on A, B ja C faaside diferentsiaalreaktiivvõimsus, X15 diferentsiaal-nulljärgnevuspinge ja X19, X20 on A ja B diferentsiaalvoolude muutumise kiirus.



Joonis 1.9. Tehisintellekti poolt loodud otsustuspuu [13]

Allikas [14] on lisatud otsustuspuule hägusloogika algoritmid, mida kasutatakse iga loogikaharu diskreetsuse vähendamiseks. Selleks lisatakse igale loogikasõlmele 2 kuuluvusfunktsiooni, mille alusel tekib kattuvus teiste sarnaste loogikasõlmedega, mis kaudu suudab tsentraalseade tuvastada suurema töökindluse ja täpsusega lühise. Testi tulemuste alusel jõuti järeldusele, et kui kasutada hägusloogika algoritme koos otsustuspuuga, suurendatakse lühise tuvastamise täpsust 2-7% võrreldes olukorraga, kus kasutatakse otsustuspuu algoritmi ilma hägusloogikata. Miinuseks on siin juures 5 ms võrra suurem ajakulu, mis tuleneb lisandunud hägusloogika arvutusest (testitud Core(TM)i5-2400 CPU@3.10 GHz protsessoriga). Joonisel 1.10 on kirjeldatud allika [13] ja allika [14] kontseptsioonide erinevust.



Joonis 1.10. Allika [13] (üleval) ja allika [14] (all) kontseptsioonide erinevus

2. RELEEKAITSE KONTSEPTSIOON

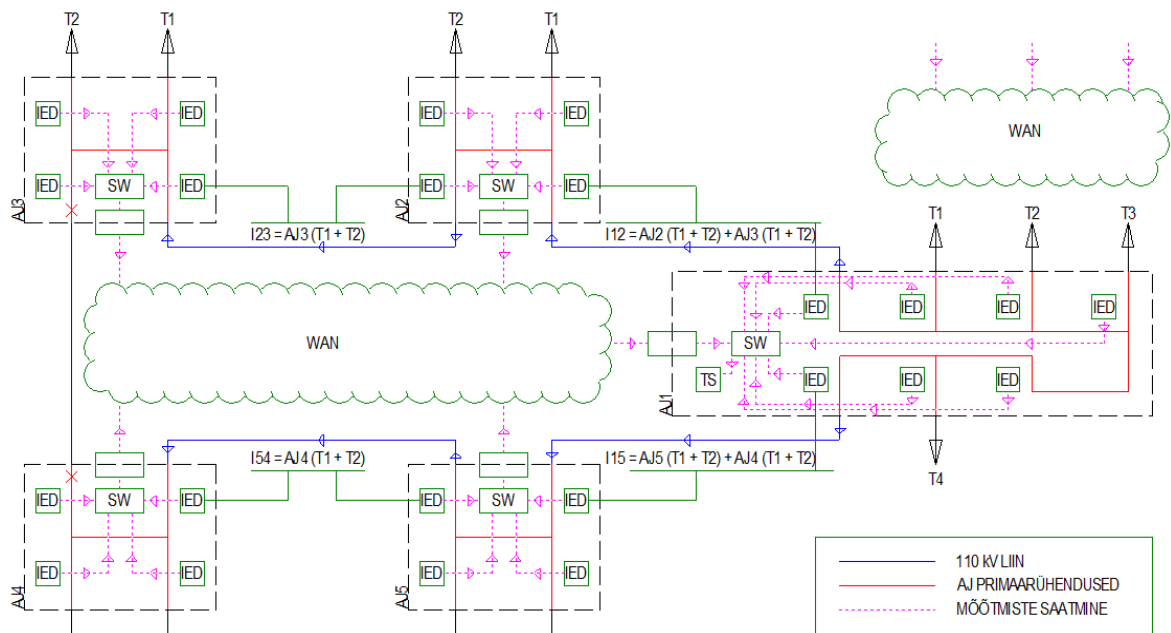
Liini piki-diferentsiaalkaitse on ressursi mõttes kulukas, sest nõuab füüsilise sidekanali väljaehitust ja on ka ebakindel, sest IED-de vaheline side sõltub ühe kanali korrasolekust. Lähtuvalt ideest, et liini piki-diferentsiaalkaitse töökindluse tõstmine on võimalik, kui kasutame mõõtmiste edastamiseks IEC 61850-90-5 R-GOOSE või R-SV andmeside protokoll, võib teoreetiliselt iga IED, mis toetab vaadeldavat standardit, olla diferentsiaalkaitse mõõteväärtuste allikaks ja sellisel juhul on võimalik luua laiapõhjaline diferentsiaalkaitse.

2.1 IEC 61850 põhine diferentsiaalkaitse

Tuleb lähtuda arusaamast, et iga võrguosa kaitseb IED ning selleks kasutab kaitstava fiidri voolu ja AJ lati pinget mõõteväärtuseid. Eestis ei ole IEC 61850 protsessiinis R-SV leidnud laialdast kasutust ja selletõttu on ka majanduslikult otstarbekamaks lahenduseks uurida esimese võimalusena mõõtmiste edastamist R-GOOSE-ga. Juhul kui see osutub tehniliselt ebamõistlikuks, saab alternatiivina kaaluda R-SV või IEEE C37.118 sünkrofaasorite kasutamist mõõteväärtuste edastamise võimalusena.

Teoreetiliselt standard lubab R-GOOSE abil edastada andmepakette sh. mõõtmisi 1 ms intervalliga, mis annab mõõtmisageduseks 1000 Hz [16]. Selline mõõtesagedus ei ole piisav, et analüüsida lühise iseärasusi kuid on piisav, et releekaitse tuvastaks diferentsiaalvoolu (I_{dif}) piisava ajalise täpsusega.

Joonisel 2.1 on näidatud kuidas AJ 1 kuni 5 IED-d mõõdavad reaajas kaitsetsooni mõõteväärtuseid ja edastavad need AJ 1 tsentraalseadmele, kus toimub mõõteväärtuste omavaheline võrdlus diferentsiaalkaitse seire funktsiooni põhjal. Kui mõne võrguosa diferentsiaalvoolu väärtus ületab sätte väärtust, saadetakse väljalülitamise käsk vastavatele võimsuslülititele, et rikkega võrgu osa eraldada. Võttes arvesse, et peale mõõtmiste edastatakse ka tsentraalseadmele primaarseadmete asendid, tekib teoreetiliselt võimekus analüüsida elektrivõrgu avariist põhjustatud katkestuse ulatust ja vastavalt korraldada automaatsed ümberlülitused, et rikketa võrguosa taas pingestada või võimsuslüliti väljalülitumise tõrke korral lülitada välja rikkega võrgu elemendiga piirnevad elemendid ehk teostada võimsuslüliti tõrkekaitset (VLTK). Käesolevas töös ei ole seda võimalust lähemalt uuritud, kuid on otstarbekas märkida sellise võimekuse olemasolu eesmärgiga, et selle teostatavust tulevikus täpsemalt uuritakse.



Joonis 2.1. IEC 61850 põhine diferentsiaalkaitse võrguskeem

2.1.1 Rakendusviited

Laiapõhjalise diferentsiaalkaitse rakendusviide moodustub kokku mitmest tegurist, milleks on: IED mõõteväärtuste saatmise kiirus, tsentraalseadme vastuvõtu latentsus, tsentraalseadme otsuse tegemise kiirus, IED väljalülitamise käsu vastuvõtmise latentsus, binaarväljundi rakendumise kiirus ja AJ sisesed protsessid. Summeerides kokku eelpool mainitud suurused, on võimalik leida teoreetiline rakendusviide ja võrrelda seda praeguste lahendustega. Tabelis 2.1 on näidatud kokkuvõtvalt rakendusviited erinevate sidevõrgu lahenduste (latentsuse suuruse) korral.

Tabel 2.1. Eeldatavad rakendusviited millisekundites

Parameeter	3GPP LTE	5G	DSL	Optika
IED mõõtekiirus	1	1	1	1
Latentsus IED -> TS	25	10*	15	5
Algoritmi viide	50	50	50	50
Latentsus TS -> IED	25	10*	15	5
BO rakendumine	4	4	4	4
Vaherelee rakendus	8	8	8	8
VL kontaktid	30	30	30	30
Viide kokku	143	113	123	103

* - 5G puhul ei ole rakendustest tehtud, mistõttu on kasutatud eeldatavat väärtust

Leitud arvutuslike rakendusviidete põhjal saame järeldada, et laiapõhjaline diferentsiaalkaitse suudab lühisega võrguosa eraldada küllalt väikese viitega. Eestis leviva 4G lahenduse puhul jääb teoreetiline rakendusaeg vahemikku 100 – 200 ms, mis on vaadeldavate lahenduste korral kõige aeglasem kuid on väiksem, kui võrgueeskirja järgi lubatud maksimaalne piirväärtus, milleks on 110 kV võrgus 600 ms. [17]

Siinjuures on ka oluliseks faktoriks Eesti põhivõrgu operaatori Eleringi „Kliendi tootmismooduli katsetamise ja katsekava koostamise nõuded“, kus märgitakse energiapargimooduli katsekava nõuetes, et elektrienergia genereerimise seadmed peavad olema võimelised läbima 250 ms pikkuse pingelohu nii, et sellest ei tekiks nende võrgust eraldumist. Kui pingelohu põhjustaja (lühisega võrguosa) eraldatakse kiiremini kui 250 ms, tähendab see ka tootmisvõimsuste töösse jäämist ja varustuskindluse säilimist.

Nendest aspektidest lähtudes on 4G kasutamine laiapõhjalise diferentsiaalkaitse jaoks aktsepteeritav lahendus, kuid toob kaasa endaga tsentraalseadme mõõteväärtuste mälupuhvri vajaduse. Arvestades, et teoreetiliselt kiireim mõõteandmete edastus on 1 ms ja kõige aeglasem lubatav edastus ligi 30 ms ja 15 ms jooksul on diferentsiaalvool püsiv, järeldub et tsentraalseade peab omama vähemasti 46 ms pikkust vahemälu mõõteandmete talletamiseks, mille põhjal on võimalik teostada arvutus.

2.1.2 Diferentsiaalkaitse algoritm

R-GOOSE ja R-SV andmepakettidega mõõtmiste edastamisel laiapõhjalise diferentsiaalkaitse tsentraalseadmesse, on oluline leida sobiv algoritm, mis võtab arvesse latentsuse, andmepakettide ajalise asümmeetria ja muud hälbed, et vältida vale rakendumist ning oleks võimeline vigase võrguosa eraldama. Allikas [18] on uuritud piki-diferentsiaalkaitse IED-de vaheliste mõõteväärtuste edastamist üle WAN-i IEEE C37.94 protokolliga ja hälvete mõju kaitse rakendumisele. Selgub, et IEEE C37.94 kasutamine WAN-ga on problemaatiline, kuna iga andmepaketi latentsus on veidi erinev, see võib põhjustada suure tõenäosusega kaitse vale rakendumise. Taolise probleemi vastu on IEC 61850 andmepaketid kaitstud neis sisalduva ajatempliga.

Oletame, et meil on AJ1 ja AJ2 vahel elektriliin, kus AJ1 pool on liini sisenevaks koormusvooluks \bar{I}_A ja AJ2 pool liinist väljuvaks koormusvooluks \bar{I}_B , mis on reaalsa väärtuste I_{AM} ja I_{BM} osas ligilähedaselt võrdsed, kuid erinevad nurkade $< I_{A\theta}$ ja $< I_{B\theta}$ suhtes ligikaudu 180°. Elektriliini ühe faasi voolude võrrandid on näidatud valemites 2.3 ja 2.4:

$$\bar{I}_A = I_{AM} \angle I_{A\theta} = I_{AM} \cos I_{A\theta} + j I_{AM} \sin I_{A\theta} \quad (2.3)$$

$$\bar{I}_B = I_{BM} \angle I_{B\theta} = I_{BM} \cos I_{B\theta} + j I_{BM} \sin I_{B\theta} \quad (2.4)$$

Matemaatiliselt saab tuletada diferentsiaalvoolu I_{dif} voolu valemiga 2.5:

$$I_{dif} = \sqrt{(I_{AM} \cos I_{A\theta} + I_{BM} \cos I_{B\theta})^2 + (I_{AM} \sin I_{A\theta} + I_{BM} \sin I_{B\theta})^2} \quad (2.5)$$

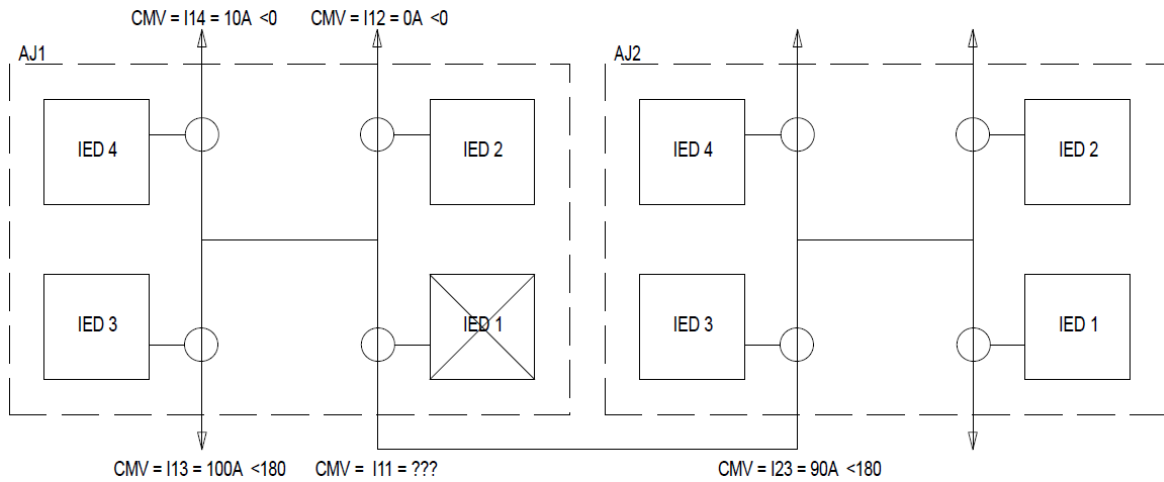
Kuna IEEE C37.94 protokolliga loetakse referentsvooluks kokkuleppena AJ 1 (määratud IED konfiguratsioonis kui rele 1) voolu \bar{I}_A , võrdsustatakse selle voolu nurk valemis nulliga. Lisaks võetakse arvesse, et $I_{AM}=I_{BM}$, mille tõttu on võimalik valem 2.3 lihtsustada nii, et järeldub valem 2.6:

$$I_{dif} = 2I_{AM} \left| \cos \left(\frac{I_{B\theta}}{2} \right) \right| \quad (2.6)$$

Taolist lähenemist, nagu näidatud valemis 2.6, IEC 61850 protokollis puhul kasutada ei saa, kuna tsentraalseadmesse edastatavatel andme omadustel (*data attribute*) sisaldavad komplekskujul mõõteväärtuseid ehk amplituudi ja nurka, see tähendab edastatakse IEC 61850 standardis defineeritud CMV (*complex measured value*) tüüpi mõõteväärtuseid, kus voolunurka mõõdetakse IED pinge väärtuste suhtes. Koormuse ja elektriliini parameetrite tõttu tekib aga reaktiivkomponent, mis põhjustab voolu nurga pinges suhtes, mistõttu osutub valemi 2.3 ja 2.4 kasutamine mõistlikumaks lahenduseks algoritmis, sarnaselt nagu on näidatud käesoleva töö lisa L2.1. Käesoleva töö järgmises peatükis käsitletakse sobiva rakendusalgoritmi väljatöötamist.

2.1.3 Informatsiooni puudumine

Side katkemine, vigased andmepaketid ja seadmete rikked põhjustavad osalist või täielikku informatsiooni puudumist, mistõttu on hälvete ilmnemisel traditsiooniline liini piki-diferentsiaalkaitse blokeeritud, et vältida vale rakendumist. Laiapõhjalisel diferentsiaalkaitsel on aga osaline informatsiooni puudumine korvatav olemasoleva informatsiooni põhjal, mille ühe juhtumi lihtsustatud näide on joonisel 2.2.



Joonis 2.2 AJ1 IED1 rikkest põhjustatud informatsiooni puudumine

Joonisel 2.2 on kujutatud juhtumit, kus AJ1 IED1 rikke tõttu ei edastata vastava lahtri mõõteväärtuseid tsentraalseadmele, kuid on olemas AJ2 IED3 ja ülejäänud AJ1 IED-de mõõteväärtused. Olemasoleva informatsiooni põhjal on võimalik arvutada AJ1 IED1 lahtri voolu $\overline{I_{11}}$ Kirchoffi esimese seaduse järgi, nagu näidatud valemis 2.7:

$$-\overline{I_{11}} = \overline{I_{12}} + \overline{I_{13}} + \overline{I_{14}} \quad (2.7)$$

Kaitsealgoritmi jaoks ei esine liinil riket, kui diferentsiaalvool on alla sätte, mida kirjeldab valem 2.8:

$$I_{S\ddot{A}TE} = I_{I>DIF} + I_{CALC}; \quad (2.8)$$

kus –

$I_{S\ddot{A}TE}$ – diferentsiaalvoolu säte,

$I_{I>DIF}$ – diferentsiaalkaitse minimaalne rakendus-diferentsiaalvool,

I_{CALC} – pidurdusvoolust sõltuv komponent, mis on defineeritud kui:

$$I_{CALC} = I_{RES} * \sin(dif_{ang}); \quad (2.9)$$

kus –

I_{RES} – arvutuslik pidurdusvool

dif_{ang} – säte, mis määrab voolust sõltuva karakteristiku tõusunurga

I_{CALC} komponenti lisatakse sätteväärtusele alates kasutaja poolsest kordaja k_x ja $I_{I>DIF}$ sõltuvast väärtusest, mis on kujul:

$$\begin{cases} I_{I>DIF} * k_x \leq |\overline{I_{23}}| + |\overline{I_{11}}|; \text{ siis } I_{CALC} = I_{RES} * \sin(dif_{ang}) ; \\ I_{I>DIF} * k_x > |\overline{I_{23}}| + |\overline{I_{11}}|; \text{ siis } I_{CALC} = 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

kus –

k_x - diferentsiaalkaitse minimaalse rakendus-diferentsiaalvoolu kordaja

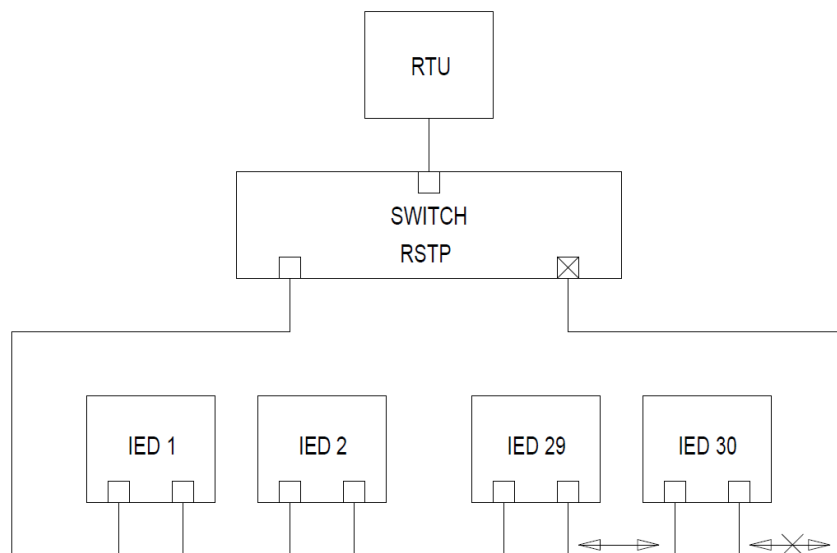
$|\overline{I}_{11}|$ – liini sisenev vool,

$|\overline{I}_{23}|$ – liinist väljuv vool.

Eelnevast näitest lähtub, et mida laiemas ulatuses toimub mõõteväärtuste edastamine, seda töökindlamaks süsteem muutub, kuna puudulikku informatsiooni on võimalik katta täiendava teabe mahu põhjal. Väljakutseks on siinjuures suurem sidevõrgu ühenduste koormus, mis tuleneb lisanduvate IED-de poolt saadetud andmepakettide mahu ja süsteemi keerukuse suurenemisest, kuna selline lähenemine nõuab masinõppe algoritmi, näiteks otsustuspuu (DT), kasutusele võtmist. Vaadeldavat algoritmi annaks täiendada voolude ja pingnurkade estimateerimise võimekusega, kuid vaadeldavas töös seda ei käsitleta, sest tegemist on põhjalikku uurimist nõudva valdkonnaga.

2.1.4 Sidekanalite läbilaskevõime

IEC 61850 sideprotokolli toetavad IED-d on varustatud 100 Mbit/s kiirust võimaldava füüsilise pordiga. Pordi läbilaskevõime näitena saab tuua juhtumi, kus RSTP ring topoloogias ühendatud 30 IED-d on sides RTU-ga läbi *switchi*, mis juhul tekib ringis viimasel IED-l 1,5 ms latentsus võrreldes ringi esimese IED-ga, sest iga IED lisab pordi läbilaskevõimest tulenevalt latentsust 50 μ s. [19] Sellist olukorda illustreerib joonis 2.3.

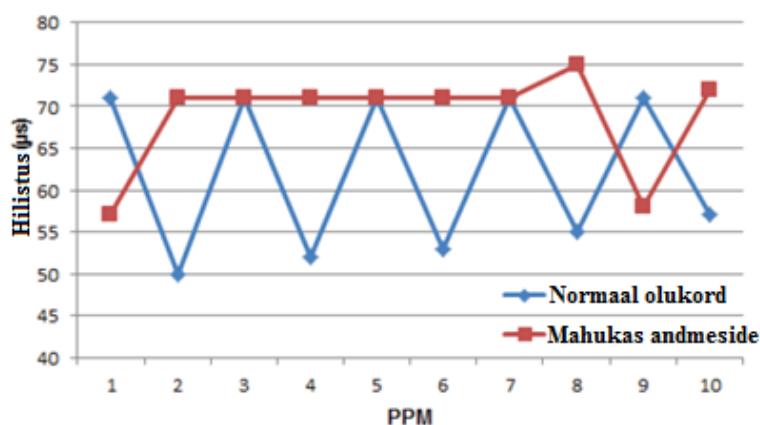


Joonis 2.3 RSTP ringühenduses IED-d

Arvestades, et latentsusest on diferentsiaalkaitse rakendusviide, on oluline, et füüsilise pordi läbilaskevõime oleks võimalikult suur, mistõttu analüüsitakse tsentraalseadme portide läbilaskevõimet, kui võimalikku pudelikaela.

Üldjuhul on tänapäeva AJ sidelahenduste puhul suurimaks pordi kiiruseks 1000 Mbit/s. R-GOOSE puhul tuleb arvestada, et mõõteväärtusi edastatakse üks mõõtmine iga 1 ms jooksul, mis tähendab, et kui tsentraalseadmehel on 1 Gbit/s füüsiline port, on võimalik teoreetiliselt ühendada kuni 500 IED-d. Järelikult portide läbilaskevõimest tulenevalt ei tohiks praktikas piirangut tekkida, sest reaalne tsentraalseadmega ühendatud IED-de arv jääks ilmselt alla 200 – mis tähendab ca 20 AJ. R-SV protokollis aga RSTP ei ole aktsepteeritavaks lahenduseks vaid nõuab näiteks HSR või PRP toega *switch*-e.

Allikas [20] on uuritud ka suure liikluskoormuse mõju GOOSE andmepakettide latentsusele 1 Gbit/s portis (joonisel 2.4 katsetulemused), millest järeljub 20 µs latentsuse suurenemine, mis on käesolevas töös aktsepteeritav suurus.



Joonis 2.4. Võrgu pordi koormuse mõju GOOSE andmepakettide latentsusele

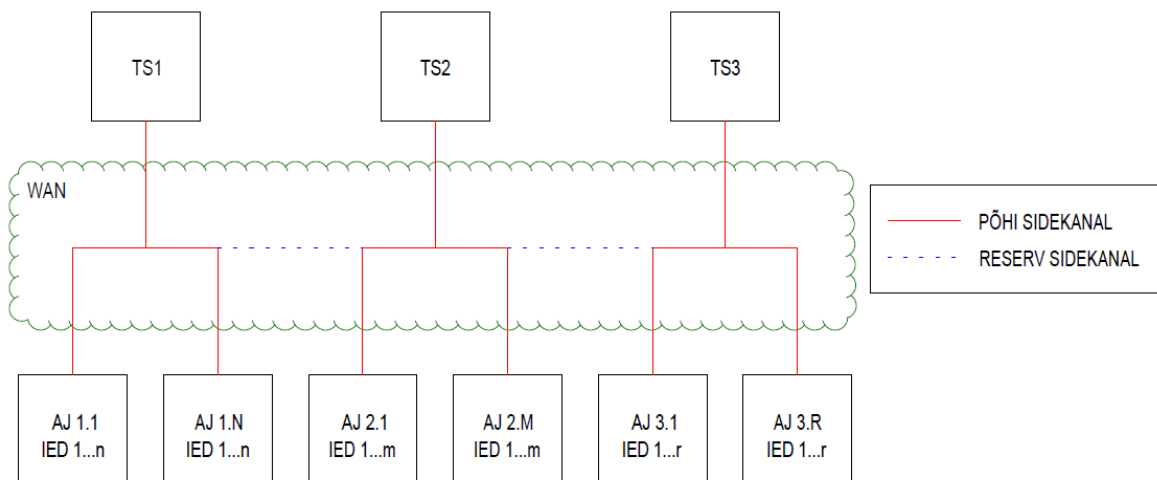
2.2 Tehisintellekti põhine releekaitse

Eelneva põhjal saab järeldada, et mida suurema infomahuga on vaadeldav süsteem, seda vähem vastuvõtlikum on süsteem hälvetele. Sellega kaasnev info hulga töötlemine on aga problemaatiline, sest nõuab suurt protsessorvõimsust. Arvestades, et ühe piirkonna AJ (näiteks 330/110 kV) kogu ühenduvate liinide arv (see tähendab, mitmele liinile antakse vaadeldavast AJ-st toide) on umbes 20, siis IED-de arv on sellest 2 kuni 4 korda suurem, sest väiksemad AJ-d on H-skeemiga või T-skeemiga, millest järeljub et kogu tsentraalseadmega ühenduvate IED-de arv on ligikaudu 80. Sellest tulenevalt tuleb arvestada, et 1 ms intervalliga saadetakse 80 mõõteväärtust, millele tuleb arvutada jooksvalt diferentsiaalväärtuseid lühiste tuvastamiseks. Lisaks tuleb arvestada juhtumit, kus tsentraalseade võib olla rikke tõttu tööst väljas, mispuhul tuleb mõne muu piirkonna tsentraalseadmehel rikkega seadme piirkonna seire üle võtta. Taoliste

probleemide lahendamine on võimalik kasutades masinõppe algoritme.

2.2.1 Tsentraalseadmete ja IED vaheline varundatus

Eelneva käsitluse põhjal saadetakse IED mõõteväärtused piirkonna tsentraalseadmesse, kuid selle rikke korral ei ole N-1 kriteerium tagatud, mistõttu tekib vajadus töökindluse suurendamiseks. Käesolevas töös on uuritud ühe võimaliku lahendusena tsentraalseadmete vahelise varunduse (*redundancy*) põhimõtet, mida illustreerib joonis 2.5.



Joonis 2.5. Tsentraalseadmete vaheline varundatus

Käesolevas näites on kolm tsentraalseadet (TS1, TS2, TS3), mis on sides oma piirkonna IED-dega: TS1 – AJ 1.1 IED 1 kuni AJ 1.N IED n; TS2 – AJ 2.1 IED 1 kuni AJ 2.M IED m, TS 3 – AJ 3.1 IED 1 kuni AJ 3.R IED r. Kui tsentraalseadme toimimisele ei seata N-1 nõuet, käib kogu andmevahetus põhi sidekanali kaudu. Kui lisame tsentraalseadme toimimisele N-1 põhimõtte, on 2 võimalust mida teha:

- Tsentraalseadmete dubleerimine piirkonna AJ-s, mis suurendab maksvust ligikaudu kaks korda suurenenud seadmete arvu tõttu.
- Luua tsentraalseadmetele varundust võimaldav algoritm, mistõttu tekib reserv sidekanali vajadus ning vaadeldav süsteem muutub keerukamaks.

Lähtume keerukamast, kuid vähem seadmeid nõudvast lahendusest. Tsentraalseadmed TS1, TS2 ja TS3 sideprotokollina on kasutuses IEC 61850, mis tähendab et tsentraalseadmete vaheline andmeside ja korrasoleku kontroll on võimalik R-GOOSE sõnumitega (SNMP on siin juures küberturbe põhjustel kõrvale jäetud). Juhul kui saadetakse teineteisele korrasoleku signaale, on normaalolukord ja IED - TS vaheline

andmevahetus toimub mööda põhi sidekanalit. Kui näiteks tsentraalseade TS2 on tööst väljas, peavad naaberpiirkondade tsentraalseadmed TS1 ja TS3 olema võimelised TS2-ga sides olnud IED-de mõõteväärtusi vastu võtma ja ka neile vajadusel käsklusi andma. Selleks, et suurenenud mõõteväärtuste hulgast ja nende töötlemisest ei tekiks protsessoril ülekoormust, on tarvis TS2 piirkond poolitada nii, et TS1 ja TS3 seadmete protsessorite koormus oleks ligikaudu võrdne. Et seda võimaldada, tuleb kasutusele võtta masinõppe algoritmid, näiteks hägusloogika otsustuspuu (*fuzzy-DT*).

Fuzzy-DT kasutusele võtuks tuleb alguses määrata igale AJ-le kindel väärtus, mis võiks olla seotud latentsusega, sest kui mõnes piirkonnas on suurema latentsusega AJ-sid hulgaliselt rohkem, võib ümber jaotamine põhjustada vahemälu ülekoormuse (vaata lisa L2.1 skeemi). Latentsusest tingitud väärtuse optimaalsed suurused tuleb katseliselt kindlaks teha ning seetõttu sellel teemal pikemalt ei peatuta. Juhul kui iga AJ omab kindlat väärtust, on võimalik arvutada tsentraalseadmete normaaloleku koormused vastavalt valemile 2.11:

$$TS1_{VÄÄRTUS} = \sum_{i=1}^N AJ\ 1.i; TS2_{VÄÄRTUS} = \sum_{i=1}^M AJ\ 2.i; TS3_{VÄÄRTUS} = \sum_{i=1}^R AJ\ 3.i \quad (2.11)$$

kus -

$TS1_{VÄÄRTUS}$ - piirkonna nr. 1 tsentraalseadme hägusloogika väärtus,

$AJ\ 1.i$ - piirkonna nr. 1 AJ i (1 kuni N) hägusloogika väärtus,

$TS2_{VÄÄRTUS}$ - piirkonna nr. 2 tsentraalseadme hägusloogika väärtus,

$AJ\ 2.i$ - piirkonna nr. 2 AJ i (1 kuni M) hägusloogika väärtus,

$TS3_{VÄÄRTUS}$ - piirkonna nr. 2 tsentraalseadme hägusloogika väärtus,

$AJ\ 3.i$ - piirkonna nr. 2 AJ i (1 kuni R) hägusloogika väärtus.

Järgmisena tuleb lähtuda milliste AJ-de vahel on otseliinid ja määrata seeläbi piirkonna AJ-s otseliinidega seotud IED-de summaarsed koguväärtused. Kasutades selleks otstarbeks otsustuspuu algoritmi, saame lõplikud väärtused piirkonna AJ eri fiidritele, mida on võimalik kasutada hägusloogika sisendina, et leida optimaalne jaotus TS1 ja TS3 vahel. Valem 2.12 kirjeldab olukorda, kus TS2 on tööst väljas, mistõttu TS1 ja TS3 jaotavad TS2 piirkonna alajaamad omavahel võimalikult võrdväärselt:

$$TS1_{VÄÄRTUS} = \sum_{i=1}^N AJ\ 1.i + \sum_{i=1}^{M-X} AJ\ 2.i \approx TS3_{VÄÄRTUS} = \sum_{i=1}^R AJ\ 3.i + \sum_{i=1}^X AJ\ 2.i \quad (2.12)$$

2.3 Võrdlus olemasoleva kontseptsiooniga

Võrreldes tänase releekaitse kontseptsiooniga, mis on põhiliselt ülesehitatud suhteliselt selektiivsetele ja üksikseadme absoluutselt selektiivsetele kaitsetele, seisneb käesoleva töö uuenduslikkus selles, et katsetakse laiapõhjalist absoluutselt selektiivset kaitset, mis täiendab tänase kontseptsiooni töökindlust. Senised absoluutselt selektiivsed kaitsed, mida on kasutatud elektriliinide releekaitstes (liini piki-diferentsiaalkaitse), ei võimalda N-1 kriteeriumit olukordades, kus tekib otse sidekanali rike või kui üks relee läheb tööst välja. Vaadeldavas kontseptsioonis on tagatud N-1 tsentraalseadme rikke korral ning ka juhul, kui mõni üksik relee peaks tööst välja minema. Seeläbi on vaadeldav releekaitse kontseptsioon senisest töökindlam.

Lähtudes aspektist, kus elektrivõrgus tekkivatest asünkroonkäikudest on distantkaitsetel oht valesti rakenduda, puudub liini piki-diferentsiaalkaitse selline oht, kui rakendame algoritme, mida on kasutatud allikas [13] ja [14]. Samuti ei ole laiapõhjalisel diferentsiaalkaitsele tarvis suurt lühisvoolu õigeaks rakendumiseks, mida vastupidiselt enamuse praeguseid IED-sid selleks otstarbeks vajavad.

Paljudes Eesti 110 kV AJ-des on IEC 61850-ga sideprotokollid võimaldavad IED-d ja Eleringi hankekavas on ettenähtud lähimate aastate jooksul asendada vanemad IED-d uuematega. Lisaseadmete hulk, mida kaitsekontseptsiooni rakendamiseks vajatakse, on suhteliselt väike – kui igas Eesti 330/110kV AJ oleks tsentraalseade, tähendaks see kokku 13 paigaldatavat seadet. Lisanduvate seadmete hulk suureneks juhul, kui algoritmi mõõteandmed edastatakse IEC 61850-90-5 R-SV või IEEE C37.118 sünkrofaasoriga, mida on põhjendatud järgmise peatüki lõpus.

Teoreetilisest osast saab järeldada, et laiapõhjalist releekaitset saab kasutada elektrivõrgu reservkaitsena, kus IED-de rolliks on põhikaitse funktsioon. IED-de releekaitse funktsionaalsus on vaadeldavas kontseptsioonis endiselt vajalik, sest juhtudel, kui on ulatuslikum side probleem, milleks võib olla küberrünnak, tuleb tsentraalseade automaatselt blokeerida. Seepärast on otstarbekas vaadelda käesolevat kontseptsiooni kui edasiarendust olemasolevast süsteemist.

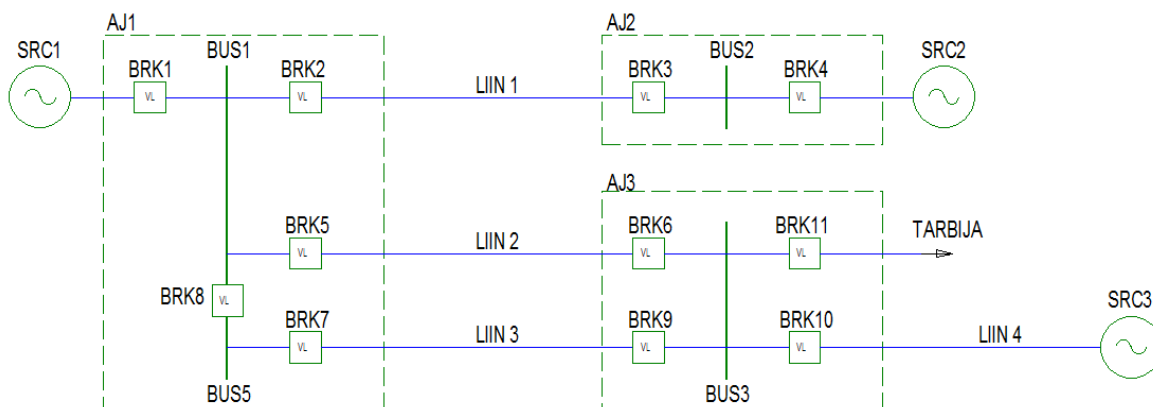
3. ALGORITMI ARENDUS

Magistritöö praktilise osa eesmärk on luua ja testide käigus kontrollida algoritmi, mis suudab koguda 110 kV elektrivõrgust liinide, trafode ja alajaamade sektsioonide voolude väärtused ning neid reaajas analüüsida eesmärgiga, et tuvastada ja eraldada elektrivõrgust lühises olev osa absoluutselt selektiivsel viisil. Selle tarbeks on koostatud RSCAD tarkvaraga mudel 110 kV elektrivõrgu osast, mida on näidatud lisas L3.1 ja simuleeritud lühiseid erinevatel võrgu elementidel. Algoritm on väljatöötatud RSCAD tarkvaras, mille tõttu ei ole rakendustestides näha sidevõrgu poolt põhjustatud latentsuse mõju kaitsealgoritmi toimimisele.

Koostatud mudelis on kolm toiteallikat, kolm alajaama ja neli elektriliini. Lühiste simuleerimine toimub kõikidel elektriliinidel kolmes erinevas punktis ja lisaks alajaamade lattidel. Käesolevas töös on käsitletud ainult Liin 1 rakendusteste, et sarnaste testide hulka vähendada. Saadud tulemuste põhjal analüüsitakse algoritmi selektiivsust, rakendusaegasid ja töökindlust olukordades kus, kõik võrgu IED-d edastavad mõõteväärtuseid ja olukorda, kus vähemalt üks IED ei ole töös ehk siderikke olukorda. Viimase puhul on algoritm võimeline otsustuspuud kasutades kompenseerima ülejäänud mõõteväärtuste põhjal puudulikku informatsiooni, nagu kirjeldatud peatükis 2.1.3.

3.1 Rakendustestid

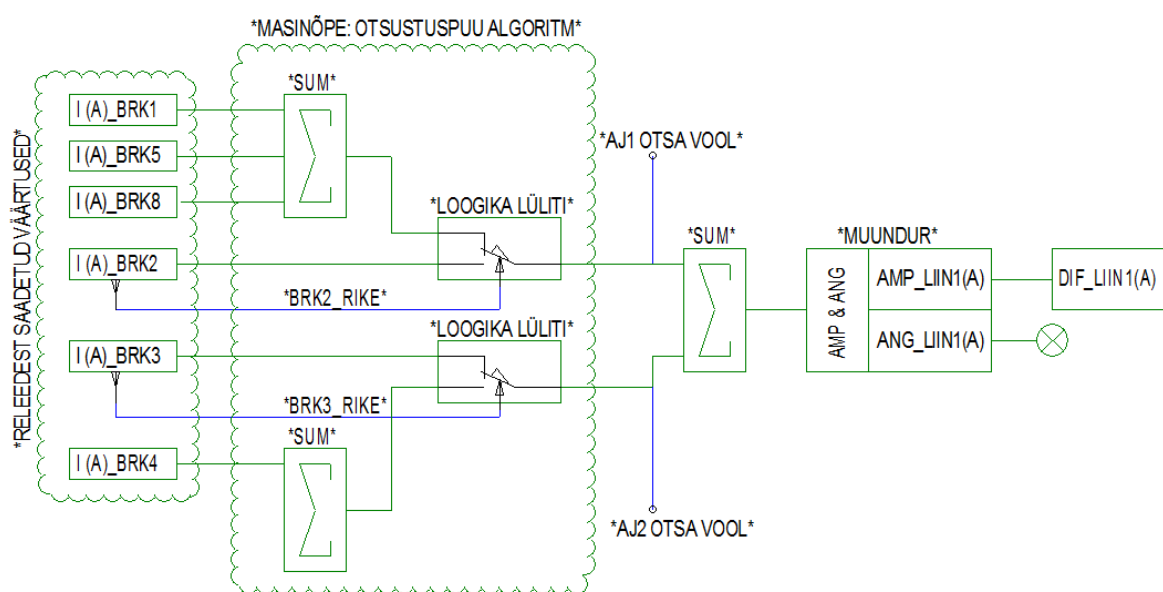
Rakendustestides on mudelina loodud 110 kV elektrivõrgu osa, mida on kujutatud joonisel 3.1. Toiteallikate SRC1 (tugisõlm), SRC2 ja SRC3 (generaatorid) nominaalpingeks on seatud 116 kV. Mudeli lihtsustusena on kõikide liinide pikkuseks seatud 40 km. Mõõtepunktide asukohad on BRK1 – BRK11, mis on ka võimsuslüliteks.



Joonis 3.1. Rakendustestide elektrivõrgu skeem

3.1.1 Mudeli diferentsiaalkaitse algoritm

Mõõteväärtustena saadetakse algoritmi kõikidest mõõtepunktidest 3 faasi voolu amplituud- ja nurga väärtused. Algoritm muundab saadetud väärtused kompleks väärtusteks, summeerib saadud väärtused võrguelementide kaupa ja arvutab seeläbi diferentsiaalvoolu. Juhul, kui ühe võrgu elemendi mõõteväärtusi ei ole võimalik rikke tõttu edastada, kompenseerib algoritm puudu oleva informatsiooni kasutades selle tarbeks teiste võrguelementide mõõteväärtuseid. Selle kohane näide on toodud joonisel 3.2, kus arvutatakse Liin 1 A-faasi diferentsiaalvoolu.



Joonis 3.2. Liin 1 diferentsiaalvoolu arvutuse loogika skeem

Juhul, kui kõik IED-d on töökorras, kasutatakse diferentsiaalvoolu arvutamiseks BRK2 ja BRK3 A-faasi voolu väärtuseid. Kui aga BRK3 ei edasta mõõteväärtuseid või ei ole võimalik määrata voolunurka (näiteks pingeahelate rikke korral), kasutatakse BRK4 mõõteväärtuseid. BRK2 rikke korral kasutab algoritm diferentsiaalvoolu arvutamiseks BRK1, BRK5 ja BRK8 mõõteväärtuseid.

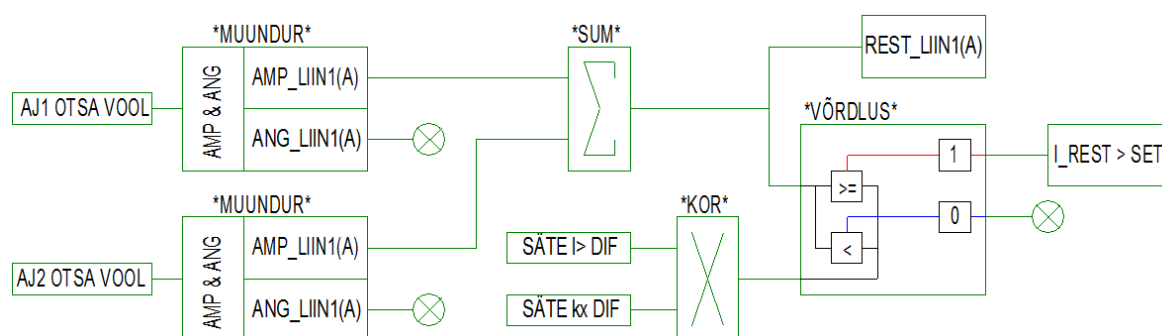
Analoogselt on võimalik rikke olukorras asendada ka BRK5, BRK6, BRK7, BRK8 ja BRK9 mõõteväärtuseid. Vaadeldavas mudelis on BRK1, BRK4, BRK10 ja BRK11 sellised, mida ei ole võimalik sama loogika skeemi alusel asendada, ehk kus N-1 kriteeriumit ei ole võimalik sellisel viisil täita. Reaalses võrgus tuleks seetõttu kasutada dubleeritud IED lahendust, kus fiidris on ühe IED asemel kaks IED-d paigaldatud – näiteks lahtriterminal ja distantskaitse ja laiendada saadetavate mõõteväärtuste hulka, milleks sobiksid liituja lahtrite täiendavaid mõõteväärtused. Samuti on praeguste testide juures kasutatud lihtsustatud masinõppe algoritmi DT, mille eesmärk on mõõteväärtuste automaatne

asendamine. Vaadeldav mudel on piisavalt lihtne, et võimalik oleks kõik asendused käsitsi defineerida, et välistada pikaajalist algoritmi treenimist. Suure süsteemi puhul, näiteks Eesti 110 kV elektrivõrgu puhul on aga otstarbekam kasutada selleks tarbeks treenitavat masinõppe algoritmi.

Diferentsiaalkaitse vajab liigrakenduse vältimiseks võrguelementi läbivast voolust sõltuvat karakteristikut, nagu seda on eelnevalt kirjeldatud graafikul 1.1. Selle tarbeks on algoritmis loodud pidurdusvoolu I_{rest} arvutuse loogika, mida on näidatud joonisel 3.3 ja kirjeldatud valemities 2.9 ja 2.10. Antud näites summeeritakse liini 1 mõlema otsa A faasi voolude moodulid, saades tulemuseks pidurdusvoolu I_{rest} . Juhul, kui I_{rest} on suurem või võrdne sätete $I > Dif$ ja kx_dif korrutisega, siis antakse $I_Rest > Set$ muutujale väärtuseks 1, mida kasutatakse edasises diferentsiaalvoolu sättearvutuse loogikas. Kasutaja poolt sisestavate sätete kirjeldus on näidatud tabelis 3.1.

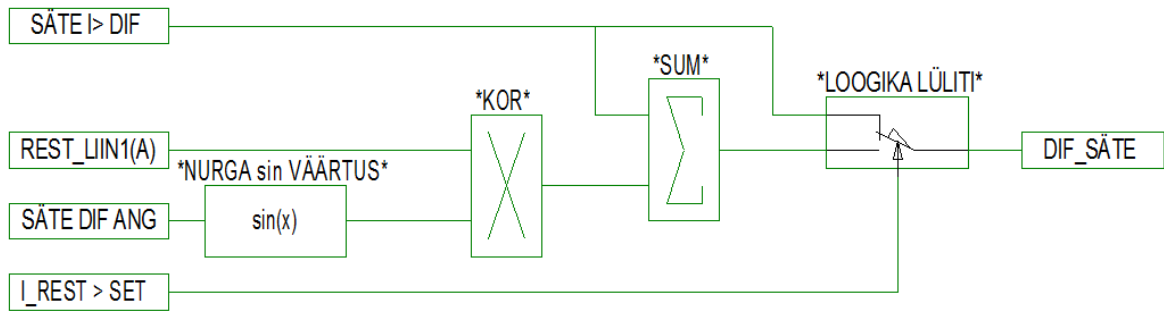
Tabel 3.1. Kasutaja poolt sisestavate sätete tähendus ja vahemik

Säte	Tähendus	Vahemik
$I > Dif$	Diferentsiaalkaitse minimaalne rakenduslik diferentsiaalvool	0-2000
kx	Diferentsiaalkaitse minimaalse rakendusliku diferentsiaalvoolu kordaja	0-20
Dif_ang	Säte, mis määrab voolust sõltuva karakteristiku tõusunurga	0-45



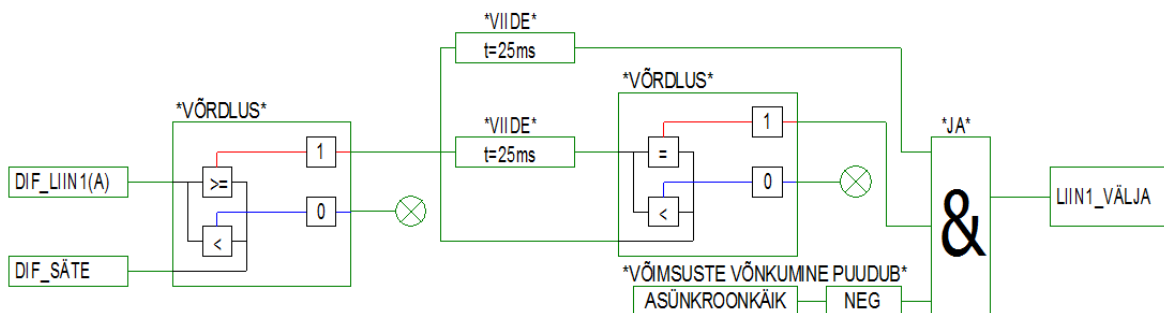
Joonis 3.3. Liin 1 pidurdusvoolu arvutuse loogika skeem

Järgnevalt arvutab algoritm sätte väärtuse kasutades pidurdusvoolu I_{rest} väärtust ja muutuja $I_Rest > Set$ tingimust sätte valikus, nagu seda on kirjeldatud joonisel 3.4 ja valemities 2.8.



Joonis 3.4. Liini 1 diferentsiaalvoolu rakendussätte arvutus

Algoritm võrdleb arvutatud diferentsiaalvoolu mudelis muudetava sätte väärtusega. Et vältida algoritmi liigtoimet võrgus toimuvate transient-protsesside korral, rakendub algoritm sätet ületava või sellega võrdse diferentsiaalvoolu olemasolul viitega 25 ms ja lühisega võrguelement eraldatakse ülejäänud elektrivõrgust. Samuti on oluline väljalülitus blokeerida asünkroonkäigust, sest faasi voolu nurkade mõõtmise toimub AJ lati pinge suhtes. Käesolevas töös asünkroonkäigu tuvastamise põhimõtet ei käsitleta, sest see on mahukat uuringut vajav valdkond. Diferentsiaalkaitse rakendamise algoritmi näide Liin 1 A-faasi jaoks on näidatud joonisel 3.5.



Joonis 3.5. Liini 1 diferentsiaalkaitse rakendamise algoritmi loogika skeem

Rakendustestide kirjeldused

Rakendustestides viiakse läbi algoritmi testid, mis hõlmavad liinidel kolmes erinevas punktis erinevate lühiste tekitamist. Testide käigus kontrollitakse:

- rakendusaega
- selektiivsust
- diferentsiaalvoolu suurust,
- diferentsiaalkaitse algoritmi kalkuleeritud sätet

Kaitsealgoritmi baassätteks on valitud $I > Dif = 200 A$, mis on minimaalne rakendamise säte. Pidurdusvoolust sõltuva karakteristiku tõusunurgaks on valitud 25 kraadi (Dif_Ang

= 25) ja pidurdusvoolu tundlikkuse kordajaks on valitud 5 ($kx_{dif} = 5$). Normaalolukorras on kõik võimsuslülitid sees asendis, ühtegi sideriket vaadeldavas elektrivõrgus ei esine.

3.1.2 Liin 1 rakendustest 1: normaalrežiim

Liin 1 rakendustestid on viidud läbi RSCAD RUNTIME programmis. Simulatsiooni alguses on kõik võimsuslülitid (BRK) sees asendis. Selle rakendustesti korral siderikked puuduvad ja mudelis kujutatud elektrivõrk toimib normaalrežiimis ehk kõik toiteallikad on võrku ühendatud. Simuleeritud lühised on läbiviidud L1 liinil kaugustel 10%, 40% ja 85% liini pikkusest (kaugused AJ2-st AJ1-te). Saadud tulemused on kantud tabelisse 3.1 ja rakendumiste täpsem info on toodud lõputöö lisas graafikutena.

Tabel 3.1. Liin 1 rakendustest 1 tulemused

Võrguelement	Lühise liik	Lühise kaugus	Dif. vool	Rakendusaeg	Väljalülitatud VL-d
Liin 1, (siderikked puuduvad)	faas L1 – maa	10%	2,2 kA	29,4 ms	BRK2, BRK3
		40%	3,1kA	40,1 ms	BRK2, BRK3
		85%	4,5 kA	33,2 ms	BRK2, BRK3
	faas L2 - maa	10%	2,4 kA	45,1 ms	BRK2, BRK3
		40%	2,7 kA	35,1 ms	BRK2, BRK3
		85%	4,5 kA	45,1 ms	BRK2, BRK3
	faas L3 - maa	10%	2,5 kA	60,0 ms	BRK2, BRK3
		40%	3,1 kA	60,1 ms	BRK2, BRK3
		85%	4,3 kA	40,1 ms	BRK2, BRK3
	faas L1 - faas L2	10%	3,1 kA	50,1 ms	BRK2, BRK3
		40%	3,7 kA	35,1ms	BRK2, BRK3
		85%	4,3 kA	37,3 ms	BRK2, BRK3
	faas L2 - faas L3	10%	2,9 kA	40,1 ms	BRK2, BRK3
		40%	3,4 kA	55,1 ms	BRK2, BRK3
		85%	3,9 kA	35,1 ms	BRK2, BRK3
	faas L1 - faas L3	10%	3,2 kA	50,1 ms	BRK2, BRK3
		40%	3,6 kA	40,1 ms	BRK2, BRK3
		85%	4,1 kA	45,1 ms	BRK2, BRK3
	3 faasi	10%	3,3 kA	40,1 ms	BRK2, BRK3
		40%	3,9 kA	40,1 ms	BRK2, BRK3
		85%	4,9 kA	33,6 ms	BRK2, BRK3

Analüüs

Rakendustesti tulemustest selgub, et algoritm suudab selektiivselt välja lülitada rikkega liini nii, et ülejäänud elektrivõrk jääb töösse. Sealjuures on algoritmi rakendusaeg

vahemikus:

$$29,4 \text{ ms} \leq t_{RAK} \leq 60,1 \text{ ms} \quad (3.1)$$

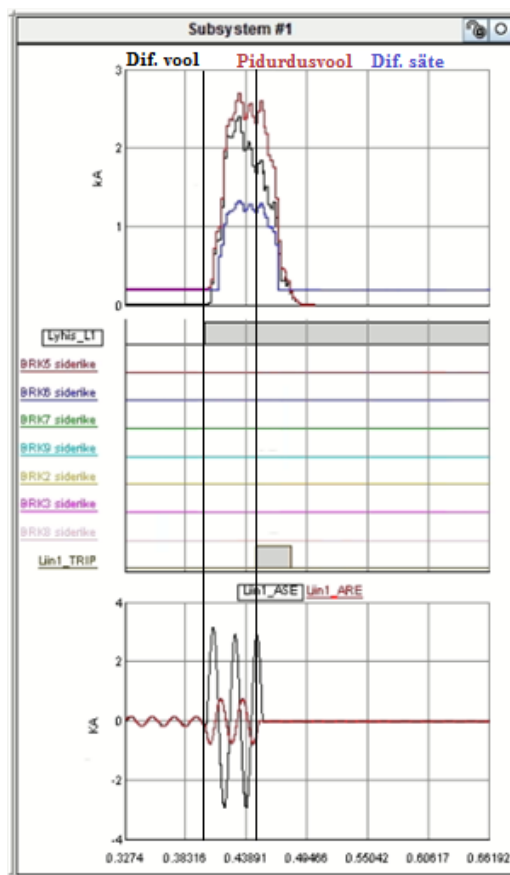
Kalkuleeritud diferentsiaalvool on suurem AJ1 lähedase lühise korral ja väiksem AJ2 lähedal (10% liini pikkusest). Diferentsiaalvool on vahemikus:

$$2,2 \text{ kA} \leq I_{dif} \leq 4,9 \text{ kA} \quad (3.2)$$

Järgnevalt on analüüsitud algoritmi rakendumiste ekstreemumväärtuseid ehk olukordades, kus rakendusaeg on minimaalne ja maksimaalne.

Minimaalne rakendusaeg

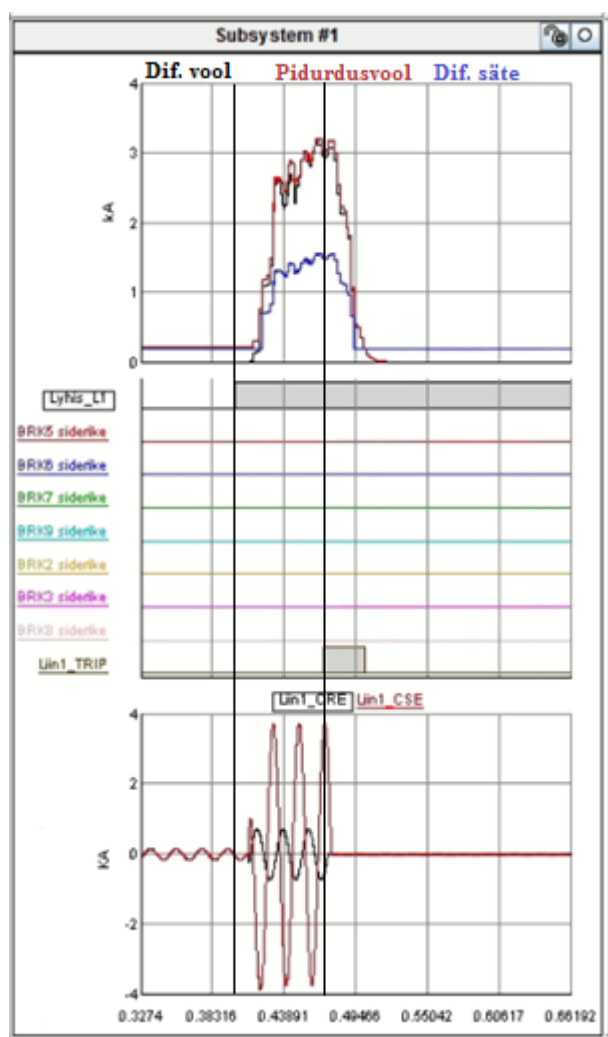
Rakendustest 1 tulemuste põhjal on rakendusaeg 29,4 ms kõige väiksem 2,2 kA diferentsiaalvoolu korral, kui lühis toimus AJ2 lähedal (10 % liini pikkusest) faasi L1 ja maa vahel. Joonisel 3.6 on näidatud lühise olukorda ja algoritmi rakendumist. Graafikul on näha, et liini läbiva voolu suurenemise olukorras suureneb pidurdusvool, mille tõttu suureneb ka diferentsiaalkaitse rakendussäte I_{dif} . Minimaalne rakendusaeg on siinjuures tingitud sellest, et lühis tekib täpselt samal hetkel, kui voolu siinus kõver läbib null väärtust. Teistes faasides tekkivat siirdeprotsessi on näidatud lisas L3.2.



Joonis 3.6. Rakendustest 1, kaugusel 10% AJ2-st lühis L1 – maa

Maksimaalne rakendusae

Rakendustest 1 tulemuste põhjal on rakendusae 60,1 ms kõige suurem 3,1 kA diferentsiaalvoolu korral, kui lühis toimus faasi L3 ja maa vahel, kaugusel 40% AJ2-st. Joonisel 3.7 on näidatud lühise olukorda ja algoritmi rakendumist. Graafikul on näha, et liini läbiva voolu suurenemise olukorras suureneb pidurdusvool, mille tõttu suureneb ka diferentsiaalkaitse rakendussäte I_{dif} . Suurim rakendusae on siinjuures tingitud sellest, et arvutuslik diferentsiaalvool tekib ligikaudu 10 ms pärast lühise algust ja ületab sätte I_{dif} väärtust 20 ms pärast lühise algust. Teistes faasides tekkivat siirdeprotsessi on näidatud lisas L3.3.



Joonis 3.7. Rakendustest 1, kaugusel 40% AJ2-st lühis L3 – maa

3.1.3 Liin 1 rakendustest 2: BRK2 siderike

Simulatsiooni alguses on kõik võimsuslülitid (BRK) sees asendis. Selle katse korral BRK2 mõõteväärtuseid ei saadeta, need on asendatud joonisel 3.2 näidatud viisil.

Simuleeritud lühised on läbiviidud L1 liinil kaugustel 10%, 40% ja 85% liini pikkusest. Saadud tulemused on kantud tabelisse 3.2.

Tabel 3.2. Liin 1 rakendustesti 2 tulemused

Võrguelement	Lühise liik	Lühise kaugus	Dif. vool	Rakendusaeg	Väljalülitatud VL-d
Liin 1, (BRK2 rike)	faas L1 - maa	10%	2,4 kA	55,1 ms	BRK2, BRK3
		40%	3,1 kA	35,1 ms	BRK2, BRK3
		85%	4,5 kA	35,1 ms	BRK2, BRK3
	faas L2 - maa	10%	2,4 kA	50,1 ms	BRK2, BRK3
		40%	3,7 kA	35,1 ms	BRK2, BRK3
		85%	4,1 kA	40,1 ms	BRK2, BRK3
	faas L3 - maa	10%	2,3 kA	40,1 ms	BRK2, BRK3
		40%	3,9 kA	45,1 ms	BRK2, BRK3
		85%	4,3 kA	40,1 ms	BRK2, BRK3
	faas L1 - faas L2	10%	3,1 kA	51,1 ms	BRK2, BRK3
		40%	3,6 kA	35,1 ms	BRK2, BRK3
		85%	4,2 kA	47,3 ms	BRK2, BRK3
	faas L2 - faas L3	10%	3,0 kA	35,1 ms	BRK2, BRK3
		40%	3,5 kA	45,1 ms	BRK2, BRK3
		85%	4,1 kA	45,1 ms	BRK2, BRK3
	faas L1 - faas L3	10%	3,1 kA	55,1 ms	BRK2, BRK3
		40%	3,6 kA	40,1 ms	BRK2, BRK3
		85%	4,3 kA	28,2 ms	BRK2, BRK3
	3 faasi	10%	3,4 kA	45,1 ms	BRK2, BRK3
		40%	3,9 kA	55,1 ms	BRK2, BRK3
		85%	4,3 kA	45,1 ms	BRK2, BRK3

Analüüs

Rakendustesti tulemustest selgub, et algoritm suudab selektiivselt välja lülitada rikkega liini nii, et ülejäänud elektrivõrk jääb töösse. Sealjuures on algoritmi rakendusaeg vahemikus:

$$28,2 \text{ ms} \leq t_{RAK} \leq 55,1 \text{ ms} \quad (3.3)$$

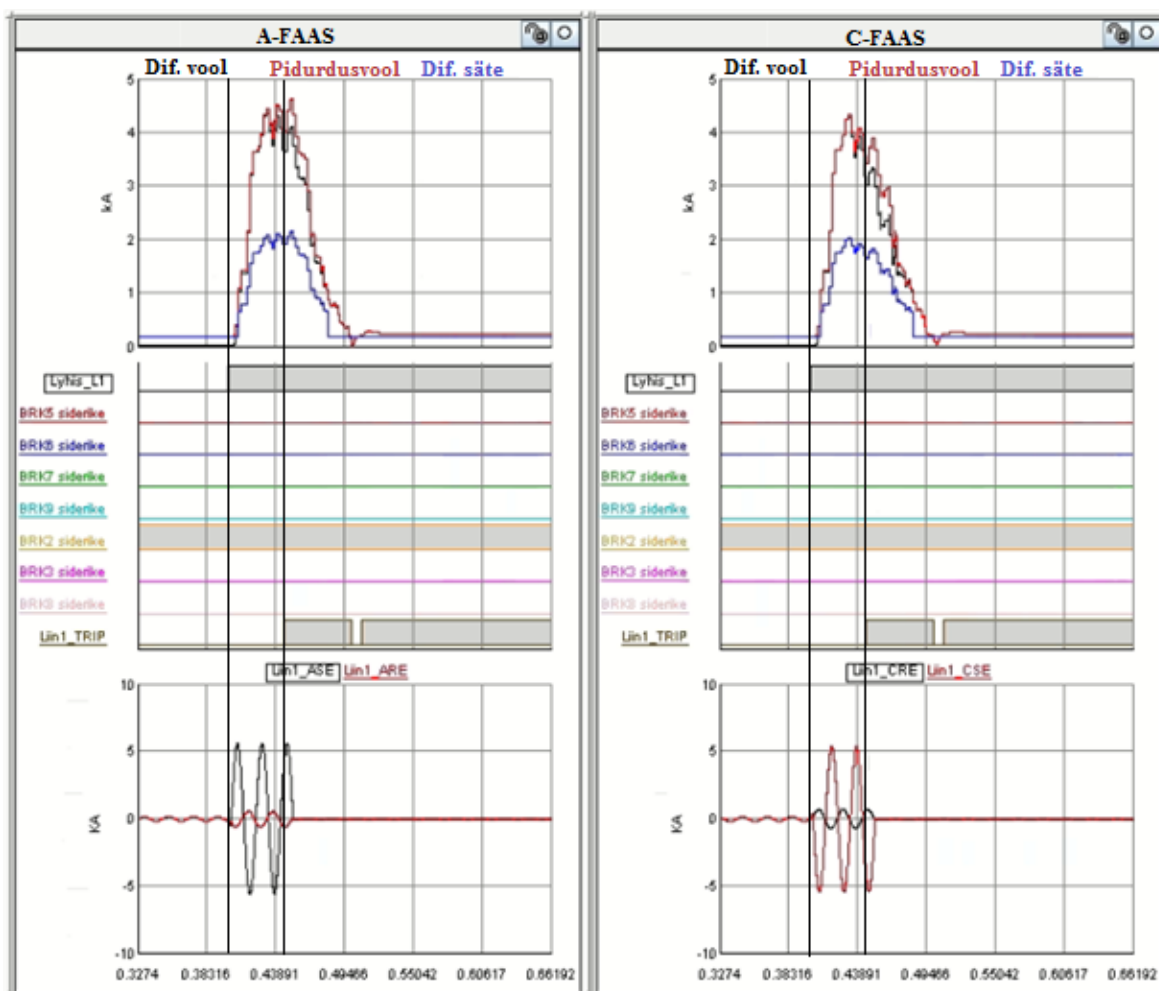
Kalkuleeritud diferentsiaalvool on suurem AJ1 lähedase lühise korral ja väiksem AJ2 lähedal (10% liini pikkusest). Diferentsiaalvool on vahemikus:

$$2,3 \text{ kA} \leq I_{dif} \leq 4,5 \text{ kA} \quad (3.4)$$

Järgnevalt on analüüsitud algoritmi rakendumiste ekstreemumväärtuseid, kus rakendusaeg on minimaalne ja maksimaalne.

Minimaalne rakendusae

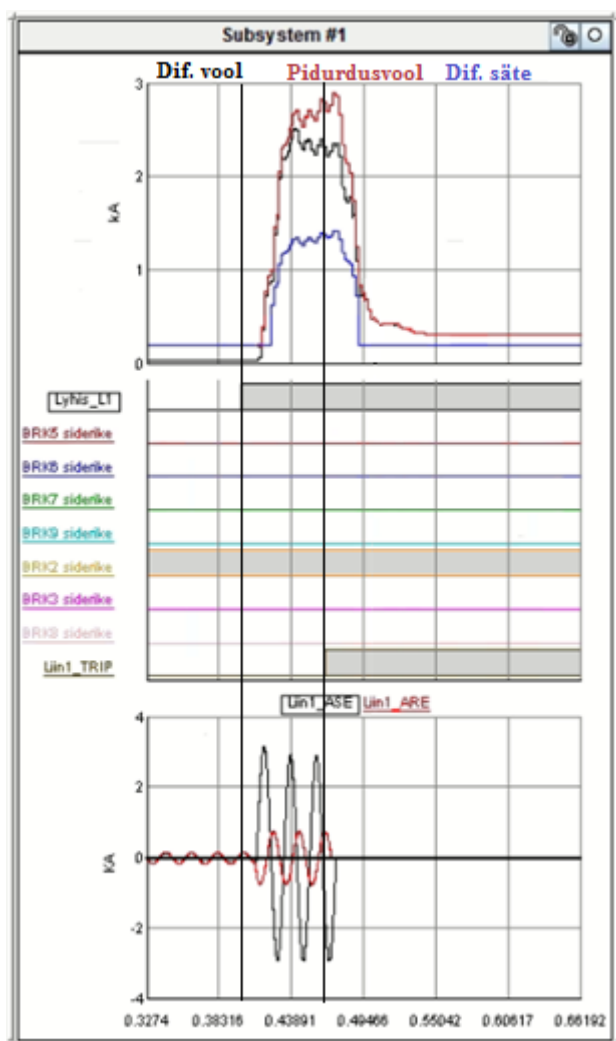
Rakendustest 2 tulemuste põhjal on rakendusae 28,2 ms kõige väiksem 4,3 kA diferentsiaalvoolu korral, kui lühis toimus AJ1 lähedal (85% liini pikkusest) faasi L1 ja L3 vahel. Joonis 3.8 on näidatud lühise olukorda ja algoritmi rakendumist. Graafikul on näha, et liini läbiva voolu suurenemise olukorras suureneb pidurdusvool, mille tõttu suureneb ka diferentsiaalkaitse rakendussäte I_{dif} . Minimaalne rakendusae on siinjuures tingitud sellest, et lühis tekib täpselt samal hetkel, kui voolu siinus kõver läbib nullväärtust. Teises faasis tekkivat siirdeprotsessi on näidatud lisas L3.4. Peale väljalülitust tekib pärast väikest pausi uuesti väljalülituskäsk, mis tuleneb asünkroonkäigust, mis on tingitud sisendvõimsuste pingenukade erinevusest. Kuna toimub BRK2 mõõtmiste asendamine ja sellest võtavad osa võimsuste võnkumisest hõlmatud võrguosad (BRK1, BRK5, BRK8) ja voolu nurka mõõdetakse pinge suhtes, tuleb algoritm blokeerida asünkroonkäigu tuvastamisel või kasutada masinõppe meetodeid, et vältida vale rakendumist, nagu on näidatud allikates [13] ja [14].



Joonis 3.8. Rakendustest 2, kaugusel 85 % AJ2-st lühis L1 – L3

Maksimaalne rakendusaeg

Rakendustest 2 tulemuste põhjal on rakendusaeg 55,1 ms kõige suurem kolmes katses. Uuritud on juhtumit, kus diferentsiaalvool oli kõige madalam (2,4 kA), kui lühis toimus faasi L1 ja maa vahel, kaugusel 10% AJ2-st. Joonis 3.9 on näidatud lühise olukorda ja algoritmi rakendumist. Graafikul on näha, et liini läbiva voolu suurenemisel tõuseb ka pidurdusvoolu väärtust, mille tõttu suureneb ka diferentsiaalkaitse rakendussäte I_{dif} . Suurim rakendusaeg on siinjuures tingitud sellest, et arvutuslik diferentsiaalvool tekib ligikaudu 10 ms pärast lühise algust ja ületab sätte I_{dif} väärtust 20 ms pärast lühise algust. Kuna toimub BRK2 mõõtmiste asendamine, millest võtavad osa võimsuste võnkumisest hõlmatud elemendid (BRK1, BRK5, BRK8) ja kuna voolu nurka mõõdetakse pinge suhtes, tuleb algoritm blokeerida asünkroonkäigu tuvastamisel või kasutada masinõppe meetodeid, et vältida vale rakendumist, nagu on näidatud allikates [13] ja [14]. Teistes faasides tekkivat siirdeprotsessi on näidatud lisa L3.4.



Joonis 3.9. Rakendustest 2, kaugusel 10 % AJ2-st lühis L1 – maa

3.1.4 Liin 1 rakendustest 3: BRK2 ja BRK3 siderike

Simulatsiooni alguses on kõik võimsuslülitid (BRK) sees asendis. Selle katse korral BRK2 ja BRK3 mõõteväärtuseid ei saadeta, need on asendatud joonisel 3.5 näidatud viisil. Simuleeritud lühised on läbiviidud L1 liinil kaugustel 10%, 40% ja 85% liini pikkusest. Saadud tulemused on kantud tabelisse 3.3.

Tabel 3.3. Liin 1 rakendustest 3 tulemused

Võrguelement	Lühise liik	Lühise kaugus	Dif. vool	Rakendusaeg	Väljalülitatud VL-d
Liin 1, (BRK2 ja BRK3 rike)	faas L1 - maa	10%	2,5 kA	40,1 ms	BRK2, BRK3
		40%	3,1 kA	55,1 ms	BRK2, BRK3
		85%	4,5 kA	45,1 ms	BRK2, BRK3
	faas L2 - maa	10%	2,4 kA	50,1 ms	BRK2, BRK3
		40%	3,0 kA	50,1 ms	BRK2, BRK3
		85%	4,2 kA	45,1 ms	BRK2, BRK3
	faas L3 - maa	10%	2,3 kA	35,1 ms	BRK2, BRK3
		40%	2,9 kA	55,1 ms	BRK2, BRK3
		85%	4,3 kA	45,1 ms	BRK2, BRK3
	faas L1 - faas L2	10%	3,2 kA	55,1 ms	BRK2, BRK3
		40%	3,6 kA	35,1 ms	BRK2, BRK3
		85%	4,3 kA	42,3 ms	BRK2, BRK3
	faas L2 - faas L3	10%	3,0 kA	50,1 ms	BRK2, BRK3
		40%	3,5 kA	50,1 ms	BRK2, BRK3
		85%	4,0 kA	40,1 ms	BRK2, BRK3
	faas L1 - faas L3	10%	3,1 kA	27,1 ms	BRK2, BRK3
		40%	3,7 kA	35,1 ms	BRK2, BRK3
		85%	4,2 kA	45,1 ms	BRK2, BRK3
	3 faasi	10%	3,3 kA	50,1 ms	BRK2, BRK3
		40%	3,9 kA	55,1 ms	BRK2, BRK3
		85%	4,2 kA	40,1 ms	BRK2, BRK3

Analüüs

Rakendustesti tulemustest selgub, et algoritm suudab selektiivselt välja lülitada rikkega liini nii, et ülejäänud elektrivõrk jääb töösse. Sealjuures on algoritmi rakendusaeg vahemikus:

$$27,1 \text{ ms} \leq t_{RAK} \leq 55,1 \text{ ms} \quad (3.5)$$

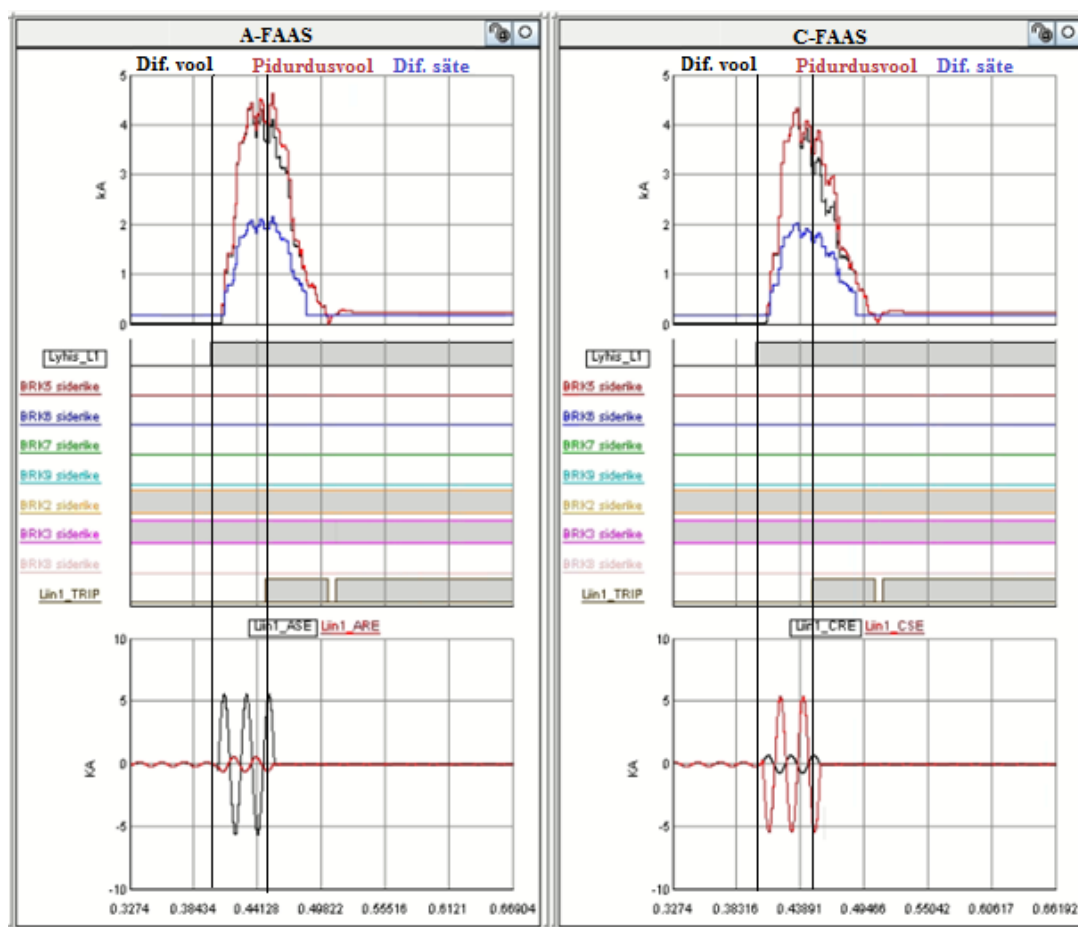
Kalkuleeritud diferentsiaalvool on suurem AJ1 lähedase lühise korral (85 % liini pikkusest) ja väiksem AJ2 lähedal (10% liini pikkusest). Diferentsiaalvool on vahemikus:

$$2,5 \text{ kA} \leq I_{dif} \leq 4,5 \text{ kA} \quad (3.6)$$

Järgnevalt on analüüsitud algoritmi rakendumiste ekstreemumväärtuseid, kus rakendusaeg on minimaalne ja maksimaalne.

Minimaalne rakendusaeg

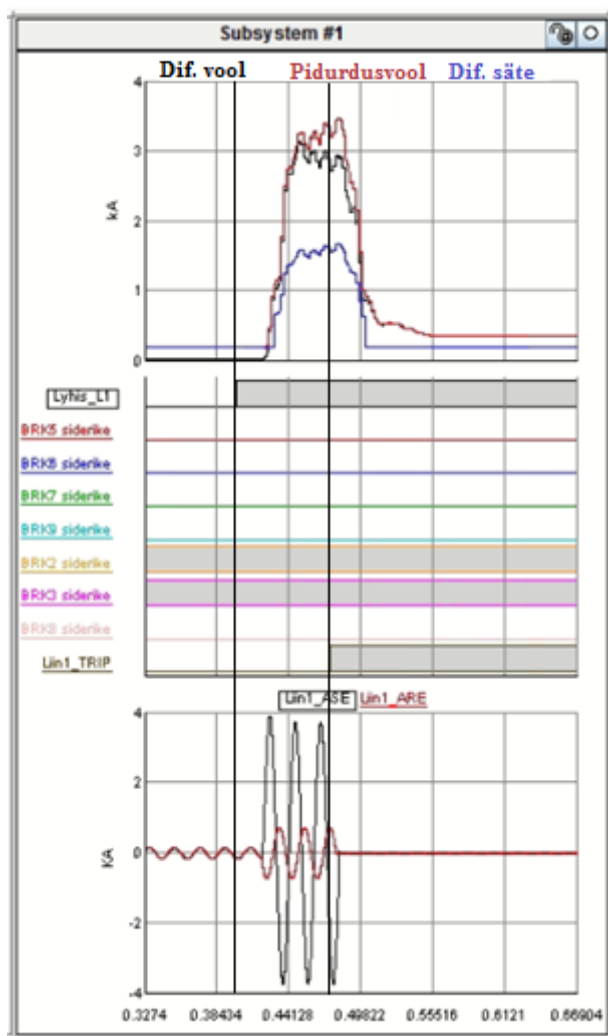
Rakendustest 3 tulemuste põhjal on rakendusaeg 27,1 ms kõige madalam 3,1 kA diferentsiaalvoolu korral, kui lühis toimus AJ1 lähedal (85% liini pikkusest AJ2-st) faasi L1 ja L3 vahel. Joonisel 3.10 on näidatud lühise olukorda ja algoritmi rakendumist. Graafikul on näha, et liini läbiva voolu suurenemise olukorras suureneb pidurdusvool, mille tõttu suureneb ka diferentsiaalkaitse rakendussäte I_{dif} . Minimaalne rakendusaeg on siinjuures tingitud selles, et lühis tekib täpselt samal hetkel, kui voolu siinus kõver läbib nullväärtust. Teises faasis tekkivat siirdeprotsessi on näidatud lisas L3.6. Peale väljalülitust tekib pärast väikest pausi uuesti väljalülituskäsk, mis tuleneb asünkroonkäigust, mis on tingitud sisendvõimsuste pingnurkade erinevusest. Kuna toimub BRK2 mõõtmiste asendamine ja sellest võtavad osa võimsuste võnkumisest hõlmatud võrguosad (BRK1, BRK5, BRK8) ja voolu nurka mõõdetakse pinge suhtes, tuleb algoritm blokeerida asünkroonkäigu tuvastamisel või kasutada masinõppe meetodeid, et vältida vale rakendumist, nagu on näidatud allikates [13] ja [14].



Joonis 3.10. Rakendustest 3, kaugusel 85 % AJ2-st lühis L1 – L3

Maksimaalne rakendusaeg

Rakendustest 3 tulemuste põhjal on rakendusaeg 55,1 ms kõige suurem kolmes katses. Uuritud on juhtumit, kus diferentsiaalvool oli kõige madalam (3,1 kA), kui lühis toimus faasi L1 ja maa vahel, kaugusel 40% AJ2-st. Joonis 3.11 on näidatud lühise olukorda ja algoritmi rakendumist. Graafikul on näha, et liini läbiva voolu suurenemisel tõuseb ka pidurdusvoolu väärtust, mille tõttu suureneb ka diferentsiaalkaitse rakendussäte I_{dif} . Suurim rakendusaeg on siinjuures tingitud sellest, et arvutuslik diferentsiaalvool tekib ligikaudu 10 ms pärast lühise algust ja ületab sätte I_{dif} väärtust 20 ms pärast lühise algust. Kuna toimub BRK2 mõõtmiste asendamine, millest võtavad osa võimsuste võnkumisest hõlmatud elemendid (BRK1, BRK5, BRK8) ja kuna voolu nurka mõõdetakse pinge suhtes, tuleb algoritm blokeerida asünkroonkäigu tuvastamisel või kasutada masinõppe meetodeid, et vältida vale rakendumist, nagu on näidatud allikates [13] ja [14]. Teistes faasides tekkivat siirdeprotsessi on näidatud lisas L3.7.



Joonis 3.11. Rakendustest 3, kaugusel 40 % AJ2-st lühis L1 – maa

3.1.5 Liin 1 rakendustest 4: SRC1 väljas, BRK2 ja BRK3 siderike

Simulatsiooni alguses on kõik võimsuslülitid (BRK) sees asendis peale BRK1, mille tulemusel on SRC1 välja lülitatud. Selle katse korral BRK2 ja BRK3 mõõteväärtuseid ei saadeta, need on asendatud joonisel 14 näidatud viisil. Simuleeritud lühised on läbiviidud L1 liinil kaugustel 10%, 40% ja 85% liini pikkusest. Saadud tulemused on kantud tabelisse 3.4.

Tabel 3.4. Liin 1 rakendustest 4 tulemused

Võrguelement	Lühise liik	Lühise kaugus	Dif. vool	Rakendusaeg	Väljalülitatud VL-d
Liin 1, (SRC1 väljas, BRK2 ja BRK3 riike)	faas L1 - maa	10%	0,7 kA	55,8 ms	BRK2, BRK3
		40%	0,7 kA	44,1 ms	BRK2, BRK3
		85%	0,8 kA	44,3 ms	BRK2, BRK3
	faas L2 - maa	10%	0,7 kA	55,8 ms	BRK2, BRK3
		40%	0,6 kA	44,8 ms	BRK2, BRK3
		85%	0,7 kA	50,8 ms	BRK2, BRK3
	faas L3 - maa	10%	0,6 kA	48,8 ms	BRK2, BRK3
		40%	0,6 kA	48,8 ms	BRK2, BRK3
		85%	0,6 kA	80,8 ms	BRK2, BRK3
	faas L1 - faas L2	10%	0,7 kA	38,8 ms	BRK2, BRK3
		40%	0,7 kA	38,1 ms	BRK2, BRK3
		85%	0,7 kA	52,5 ms	BRK2, BRK3
	faas L2 - faas L3	10%	0,6 kA	60,8 ms	BRK2, BRK3
		40%	0,6 kA	50,8 ms	BRK2, BRK3
		85%	0,6 kA	50,8 ms	BRK2, BRK3
	faas L1 - faas L3	10%	0,6 kA	45,8 ms	BRK2, BRK3
		40%	0,6 kA	45,8 ms	BRK2, BRK3
		85%	0,6 kA	55,8 ms	BRK2, BRK3
	3 faasi	10%	0,6 kA	44,6 ms	BRK2, BRK3
		40%	0,6 kA	34,1 ms	BRK2, BRK3
		85%	0,6 kA	44,6 ms	BRK2, BRK3

Analüüs

Rakendustesti tulemustest selgub, et algoritm suudab selektiivselt välja lülitada rikkega liini nii, et ülejäänud elektrivõrk jääb töösesse. Sealjuures on algoritmi rakendusaeg vahemikus:

$$34,1 \text{ ms} \leq t_{RAK} \leq 80,8 \text{ ms} \quad (3.5)$$

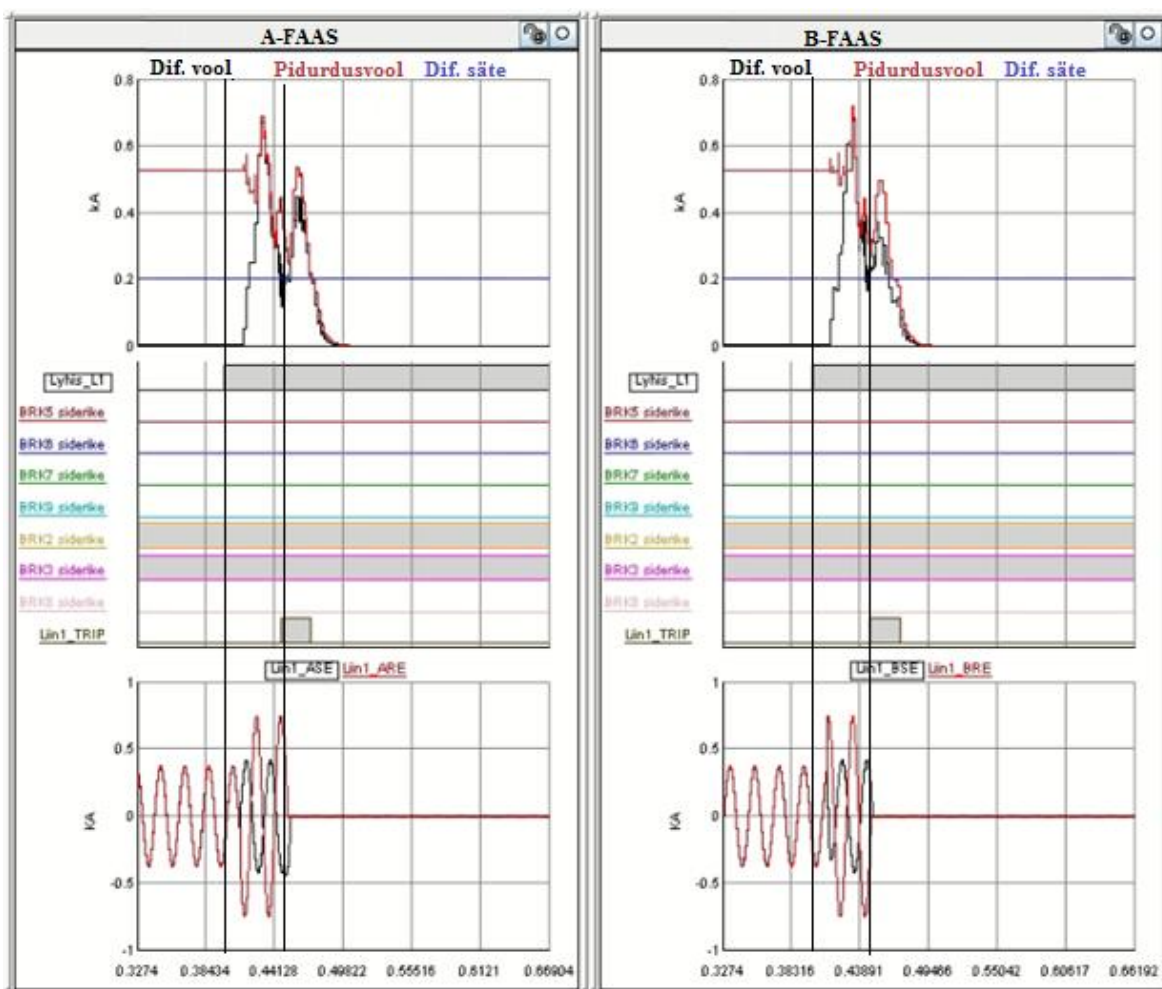
Kalkuleeritud diferentsiaalvool on suurem AJ1 lähedase lühise korral (85 % liini pikkusest) ja väiksem AJ2 lähedal (10% liini pikkusest). Diferentsiaalvool on vahemikus:

$$0,6 \text{ kA} \leq I_{dif} \leq 0,8 \text{ kA} \quad (3.6)$$

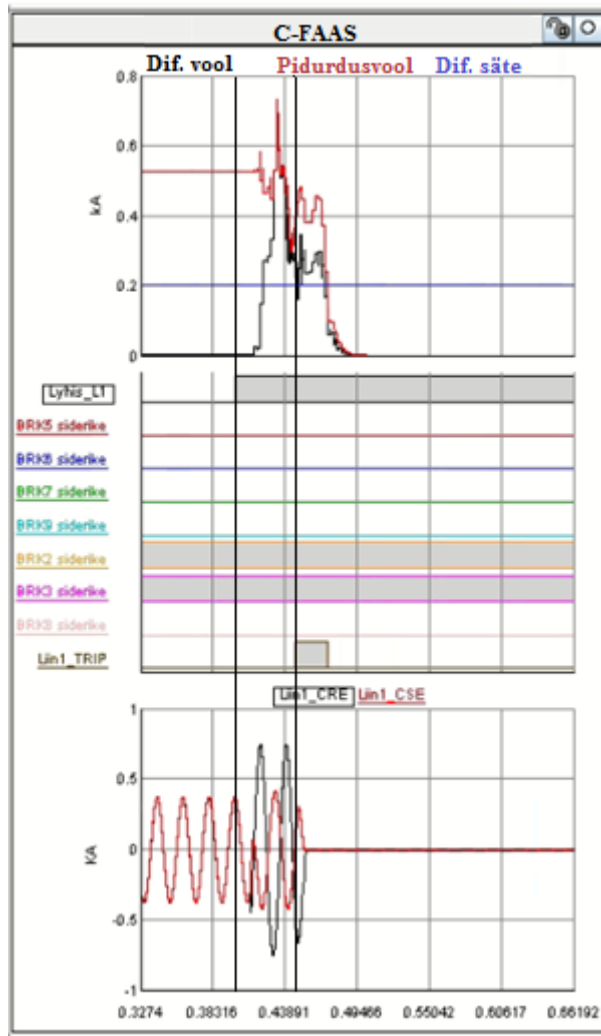
Järgnevalt on analüüsitud algoritmi rakendumiste ekstreemum väärtuseid, kus rakendusaeg on minimaalne ja maksimaalne.

Minimaalne rakendusaeg

Rakendustest 3 tulemuste põhjal on rakendusaeg 34,1 ms kõige madalam 0,6 kA diferentsiaalvoolu korral, kui lühis toimus 40% liini pikkusest (AJ2-st AJ1-te) faasi L1 - L2 - L3 vahel. Joonisel 3.12 ja 3.13 on näidatud lühise olukorda ja algoritmi rakendumist. Graafikutelt on näha, et liini läbiva voolu suurenemise olukorras suureneb pidurdusvool, kuid diferentsiaalvoolu rakendussäte I_{dif} ei suurene, sest pidurdusvool ei ületa diferentsiaalvoolu sätte kordaja poolset arvutuslikku sätet 1000 A. Minimaalne rakendusaeg on siinjuures tingitud sellest, et lühis tekib täpselt samal hetkel, kui voolu siinus kõver läbib nullväärtust. Teises faasis tekkivat siirdeprotsessi on näidatud lisas L3.8.



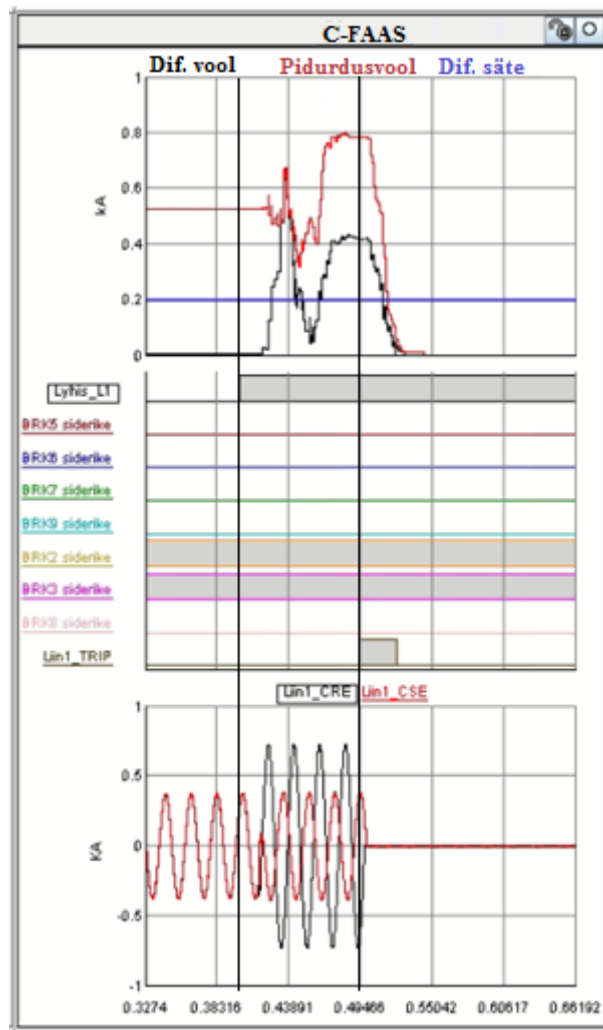
Joonis 3.12. Rakendustest 4, kaugusel 40 % AJ2-st lühis L1 - L2 - L3



Joonis 3.13. Rakendustest 4, kaugusel 40 % AJ2-st lühis L1 - L2 - L3

Maksimaalne rakendusaeg

Rakendustest 4 tulemuste põhjal on rakendusaeg 80,8 ms kõige suurem 0,6 kA diferentsiaalvoolu korral, kui lühis toimus 85% liini pikkusest (AJ2-st AJ1-te) faasi L3 – maa vahel. Joonis 3.14 on näidatud lühise olukorda ja algoritmi rakendumist. Graafikul on näha, et liini läbiva voolu suurenemisel tõuseb ka pidurdusvoolu väärtust, kuid diferentsiaalkaitse rakendussäte I_{dif} ei suurene, sest pidurdusvool ei ületa diferentsiaalvoolu sätte kordaja poolset arvutuslikku sätet 1000 A. Suurim rakendusaeg on siinjuures tingitud sellest, et arvutuslik diferentsiaalvool tekib ligikaudu 10 ms pärast lühise algust ja ületab sätte I_{dif} väärtust 20 ms pärast lühise algust. Seejärel diferentsiaalvool langeb 10 ms alla sätte ja seejärel tõuseb taas üle sätte väärtuse. Teistes faasides tekkivat siirdeprotsessi on näidatud lisan L3.9.



Joonis 3.14. Rakendustest 4, kaugusel 85 % AJ2-st lühis L3 – maa

3.2 Tulemuste uuring

Läbi viidud testidest järeldub, et algoritm on võimeline keskmiselt 50 ms jooksul eraldama rikkega võrgu osa ülejäänud süsteemist, kusjuures ka väiksemate lühisvoolude puhul ja sõltumata lühise liigist. Tulemuste uurimise eesmärgiks on kindlaks määrata algoritmi toime kiirus.

Esiteks tuleb arvestada kiirusega, mille jooksul IED-d väljastavad mõõteväärtuseid. Allikas [21] on uuritud IEC 61850 protokollsi andmepakettide edastusaegasid. Viidatud teadusuuringu järgi on GOOSE pakettidega mõõtmiste uuendamiskiiruseks $t_M \leq 100$ ms ehk vähemalt iga 100 ms jooksul edastab IED uue mõõteväärtuse. Kuna algoritm vajab töötamiseks vähemalt kahte edastatud paketti, siis tuleb arvestada väljalülitamise aja

arvutamisel 2 korda t_M aega.

3.2.1 Maksimaalne rakendusae

Releekaitse kontseptsiooni ideest lähtudes tuleb algoritmi rakendusajale t_{RAK} lisada sidevõrgu hilistusajad t_{SH1} ja t_{SH2} , IED ja vahereleede kontaktide rakendumisajad t_{IED} ja t_{VR} , võimsuslüliti kontaktide avamise aeg t_{VL} . Maksimaalse rakendusaja leidmisel tuleb arvestada raskemat juhtu, kus kasutatakse 3GPP LTE sidevõrku, mille hilistusae on R-GOOSE ja R-SV pakettide korral 10 ms [22] ja maksimaalselt algoritmi rakendusaega 80 ms, mis on näidatud tabelis 3.4.

Tuleb arvestada võimalusega, et võrgus võib tekkida lühis vahetult pärast mõõteväärtuse edastamist. Selle tõttu on maksimaalse väljalülitusaja arvestusel vaja lisada 99 ms nihkega suurus t_H , mis võtab arvesse maksimaalset võimalikku hilistust, mida võib tsükliline edastus põhjustada.

Seega on vaadeldava kaitsefunktsiooni maksimaalne väljalülitusaeg $t_{\Sigma MAX}$ 522 ms, mille arvutuskäiku on näidatud valemis 3.7.

$$\begin{aligned} t_{\Sigma MAX} &= t_{RAK} + 2t_M + t_H + t_{SH1} + t_{SH2} + t_{IED} + t_{VR} + t_{VL} = \\ &= 80 + 2 * 100 + 99 + 10 + 10 + 5 + 8 + 30 = 522 \text{ ms} \end{aligned} \quad (3.7)$$

3.2.2 Minimaalne rakendusae

IED ja vahereleede rakendumisajad t_{IED} ja t_{VR} on üldiselt konstantse suurusega ja seetõttu jäävad need samaks. Sama kehtib võimsuslüliti kontaktide avamise aja t_{VL} kohta. Parima võimaliku väljalülitamise aja arvestusel võetakse arvesse, et algoritmi rakendusajaks t_{AR} on katsetustel saadud 27 ms, mida on näidatud tabelis 3.3. Optiliste sidekaablite kasutamise korral vähenevad aga hilistusajad t_{SH1} ja t_{SH2} 5 ms peale. Samuti lähtutakse siinjuures, et lühisvool on IED poolt mõõdetud 1 ms enne mõõteväärtuse edastamist, mille tõttu saab t_H väärtuseks 1 ms. Eelnevat arvesse võttes selgub, et minimaalne väljalülitusaeg on 281 ms, mille arvutuskäiku on näidatud valemis 3.8.

$$\begin{aligned} t_{\Sigma MIN} &= t_{RAK} + 2t_M + t_H + t_{SH1} + t_{SH2} + t_{IED} + t_{VR} + t_{VL} = \\ &= 27 + 2 * 100 + 1 + 5 + 5 + 5 + 8 + 30 = 281 \text{ ms} \end{aligned} \quad (3.8)$$

3.2.3 Parendamise võimalused

Praeguse käsitluse korral jääb väljalülitusaeg t_{RAK} vahemikku:

$$281 \text{ ms} \leq t_{TRIP}(R - GOOSE) \leq 522 \text{ ms} \quad (3.9)$$

Lähtudes kontseptsioonist, et laiapõhjaline diferentsiaalkaitse peab toimima reservkaitsena on vaadeldavad rakendusajad aktsepteeritavas suurusjärgus, mis vastab Võrgueeskirjale. Selle tulemusel suudetakse tagada, et distantskaitse kolmandad tsoonid ei rakenduks valesti, mis hoiaks ära laiema ulatusega elektrivõrgu katkestused.

Selleks, et vaadeldava kaitsefunktsiooni rakendusaega parandada oleks tarvis mõõteväärtuste uuendamise kiirust suurendada, kuna see on suurim viite põhjustaja. Käesoleva töö autor on selles osas suhelnud ABB releekaitse seadmete tootjaga, et leida lahendus mõõteväärtuste uuendamise kiiruse probleemile.

IEC 61850-90-5 R-SV sünkrofaasorite mõõteväärtused

ABB põhjendab piirangut puhvrite üle täituvusega, mis võib tekkida kui edastatakse liigselt palju mõõtmisi väga väikeste (< 100 ms) intervallide järel ja soovitab GOOSE andmepakettide asemel kasutada IEC 61850-90-5 R-SV mõõteväärtuseid. Rakendusajale oleks taoline lähenemine parendav, sest võimaldab ≤ 3 ms mõõteväärtuste uuendamist [21]. Maksimaalne väljalülitamise aeg oleks sellisel juhul t_{MAX} 151 ms ja minimaalne väljalülitamise aeg t_{MIN} 87 ms.

$$\begin{aligned} t_{\Sigma MAX} &= t_{RAK} + 2t_M + t_H + t_{SH1} + t_{SH2} + t_{IED} + t_{VR} + t_{VL} = \\ &= 80 + 2 * 3 + 2 + 10 + 10 + 5 + 8 + 30 = 151 \text{ ms} \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} t_{\Sigma MIN} &= t_{RAK} + 2t_M + t_H + t_{SH1} + t_{SH2} + t_{IED} + t_{VR} + t_{VL} = \\ &= 27 + 2 * 3 + 1 + 5 + 5 + 5 + 8 + 30 = 87 \text{ ms} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Selleks, et võimaldada IEC 61850-90-5 R-SV mõõteväärtuseid edastada, on tarvis kõikide fiidrite voolu- ja pingetrafode poolt mõõdetud väärtused ühendada fiidri põhistsesse koondamisüksustesse (*merging unit*) ja sealt omakorda luua ühendused AJ võrguseadmetega. Tüüpilise H-skeemiga AJ puhul tähendab selline lähenemine lisa investeeringuid ligikaudu 20 000 euro ulatuses seadmetesse ja täiendavalt tööde maksumust 5000 euro ulatuses, seega kogu Eesti 110 kV võrgu katmiseks kuluks ligikaudu 4-5 miljonit eurot vastavate seadmete paigaldamiseks ja seadistuseks, millele lisandub täiendavalt iga-aastane käidukulu. Täpsem arvutus on näidatud tabelis 3.5, kus on antud hinnangulised maksumused.

Tabel 3.5 110 kV H-skeemiga AJ täiendamine IEC 61850-90-5 R-SVga

	Hind (EUR)	tk	Kokku (EUR)
Koondamisüksus	2000	4	8000
Switch	4000	2	8000
MCMK 2x2,5/2,5	1,5	100	150
Optilised kaablid	100	8	800
Aja sünkronism	1000	1	1000
Seadistus tööd	3000	1	3000
Montaaži tööd	1500	1	1500
Abimaterjalid	1000	1	1000
Releepaneel	3000	1	3000
Kogu summa			26450
Kogu Eesti 110 kV AJ	26450	150	4 mln EUR

Eelisena saab välja tuua küberturvalisuse, sest IEC 61850-90-5 standard sisaldab krüpteerimise ja autentimise võimalust, mis lisab küll täiendavat viidet 0,5 ms, kuid sellise viite mõju kaitsealgoritmi rakendusajale on tühiselt väike. [5]

IEEE C37.118 sünkrofaasorite mõõteväärtused

Siemens SIPROTEC5 ja ABB REL650, REL670 (ver. 2.1 ja kõrgem) IED-d toetavad faasimõõturi ehk PMU (*phasor measurement unit*) funktsionaalsust ehk saab edastada tsentraalseadmesse sünkrofaasorite väärtuseid vastavalt C37.118 standard protokollile. Selleks tarbeks kasutatakse eraldiseisvat võrgukaarti IED-l. Täiendavate investeeringute hinnanguline maht Eesti 110kV võrgu jaoks on ligikaudu 2-3 miljoni eurot, mis sisaldab lisanduvaid võrgukaarte, spetsiaalseid aja sünkroniseerimise seadmeid ja seadistustöid. Täpsem hinnanguline maksumus on näidatud tabelis 3.6.

Tabel 3.6 110kV H-skeemiga AJ täiendamine IEEE C37.118 sünkrofaasoritega

	Hind (EUR)	tk	Kokku (EUR)
Switch	4000	1	4000
Optilised kaablid	25	4	100
Aja sünkronism	1000	1	1000
Võrgukaart	1000	4	4000
Seadistus tööd	3000	1	3000
Montaaži tööd	500	1	500
Abimaterjalid	1000	1	1000
Kogu summa			13600
Kogu Eesti 110 kV AJ	13600	150	2 mln EUR

PMU mõõtmiste eeliseks on täpne aja sünkronisatsioon ja mõõteväärtuste uuendamise kiiruseks on 20 ms, mis on 5 korda kiirem kui R-GOOSE andmepakette kasutades. Kasutades sünkrofaasoreid algoritmis, oleks seega maksimaalseks väljalülitamise ajaks 202 ms ja minimaalseks väljalülitamise ajaks 121 ms.

$$\begin{aligned}
 t_{\Sigma MAX} &= t_{RAK} + 2t_M + t_H + t_{SH1} + t_{SH2} + t_{IED} + t_{VR} + t_{VL} = \\
 &= 80 + 2 * 20 + 19 + 10 + 10 + 5 + 8 + 30 = 202 \text{ ms}
 \end{aligned}
 \tag{3.12}$$

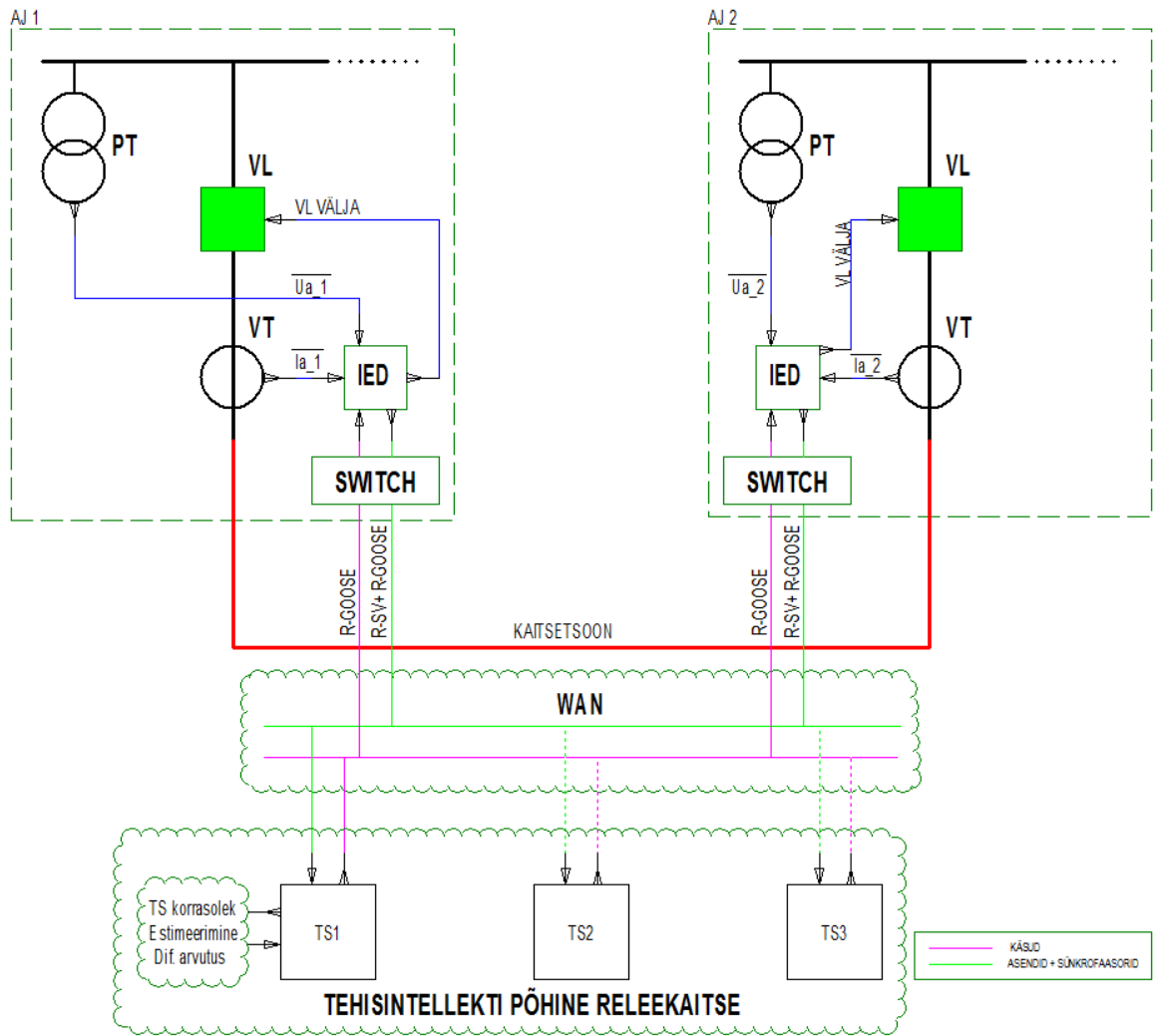
$$\begin{aligned}
 t_{\Sigma MIN} &= t_{RAK} + 2t_M + t_H + t_{SH1} + t_{SH2} + t_{IED} + t_{VR} + t_{VL} = \\
 &= 27 + 2 * 20 + 1 + 5 + 5 + 5 + 8 + 30 = 121 \text{ ms}
 \end{aligned}
 \tag{3.13}$$

3.2.4 Järeldused

Tulemuste uuringu põhjalt on tehtud järgnevad järeldused:

- IEC 61850-90-5 R-GOOSE ei ole sobiv valik mõõteväärtuste edastamisel tsentraalseadmesse laiapõhjalisel diferentsiaalkaitsel, sest rakenduskiirused jäävad näitajate poolest alla alternatiivsetele lahendustele.
- IEC 61850-90-5 R-SV ja IEEE C37.118 sobivad mõõteväärtuste edastamiseks laiapõhjalise diferentsiaalkaitsele, sest rakenduskiirused on märkimisväärselt paremad.
- R-GOOSE sobib väljalülitamise käskude saatmiseks IED-dele, sest omab krüpteerimise ja autentimise võimekust.
- R-SV on mõõtmiste edastamisel eelistatud variant, sest omab krüpteerimise ja autentimise võimekust.
- IEEE C37.118 protokollil puudub tagatud küberturvalisuse nõudeid. Kasutades seda protokollil kaitsealgoritmis pannakse ohtu energiasüsteemi julgeolek.

Releekaitse kontseptsiooni seisukohalt on oluline, et häiringute korral eraldatakse rikkega elektrisüsteemi osad vähem kui 250 ms jooksul, ja selle käigus tuleb tagada kaitsesüsteemide selektiivsus ja küberturvalisus. Kuna IEEE C37.118 ei paku küberturbe osas konkurentsi IEC 61850-90-5 andmeside protokollile, on eelistatud variant kasutada mõõteväärtuste edastamisel R-SV ja asendite ning signaalide puhul R-GOOSE. Vaadeldava kontseptsiooni kirjeldus on näidatud joonisel 3.15.



Joonis 3.15. IEC 61850 laiapõhjalise diferentsiaalkaitse kirjeldus

KOKKUVÕTE

Käesolevas magistritöös on käsitletud tehisintellekti ja IEC 61850 põhise diferentsiaalkaitset, mis sobitub releekaitse kontseptsiooni reservkaitsena. Käesolevas kontseptsioonis on lähtunud ideest, et kui Balti riigid eralduvad Venemaa ühend-elektrosüsteemist (IPS/UPS), võib tekkida olukord, kus Eesti 110 kV elektrivõrgu lühisvoolud jäävad kohati sedavõrd väikeseks, et olemasolev releekaitse ei suuda lühiseid selektiivselt eraldada. Selleks, et siiski tagada kogu 110 kV võrgu releekaitse selektiivsus, on käesolevas töös uuritud võimalust olemasolevat releekaitse süsteemi täiendada väljapakutud laiapõhjalise diferentsiaalkaitsega. Esmalt uuriti IEC 61850 põhise diferentsiaalkaitse teoreetilist teostatavust. Läbitöötatud teaduslike artiklite põhjal on jõutud järelduseni, et IEC 61850-90-5 R-GOOSE ja R-SV andmeside protokollidega on võimalik luua kiiretoimeline absoluutselt selektiivne kaitse algoritm, mis vastab kaasaegse küberturbe nõuetele. Seetõttu on RSCAD tarkvaraga väljatöötatud ja reaalaja simulaatoriga RTDS testitud vaadeldava algoritmi prototüüp, mille rakendustestide tulemused kinnitavad, et vaadeldav algoritm suudab rikkega võrguosa kiirelt eraldada. Kui vaadeldavat kaitse algoritmi täiendada tehisintellektiga, muutub algoritmi mõõteandmete analüüs ja N-1 loogika automaatseks, mis lihtsustab seadistuse protsessi. Samuti on tehisintellektil roll tsentraalseadmete andmemahutude tasakaalustamisel ja omavahelise töö koordineerimisel, et tagada suurem töökindlus laiapõhjalisel diferentsiaalkaitsele.

Tabelis 4.1 on toodud erinevate mõõteväärtuste edastusviiside kokkuvõte. Mõlemas vaadeldavas alternatiivis on laiapõhjaline diferentsiaalkaitse releekaitse kontseptsioonis reservkaitsena. Kasutades IEC 61850-90-5 diskreetsignaali (SV) või IEEE C37.118 sünkrofaasoreid mõõteväärtuste edastusviisina, suudab laiapõhjaline diferentsiaalkaitse lühisega võrguosa eraldada vähem kui 250 ms jooksul, mille tulemusel ei teki tootmisvõimsuste eraldumise ohtu ja välditakse releekaitse valet rakendumist. Siin juures saab püstitada retoorilise küsimuse: kui palju maksab energiasüsteemi julgeolek? Tabelist 4.1 järeldub, et hinnanguliselt 2 miljon eurot, kuid arvestades investeeringute mahtu tuuleparkide ja päikesepaneelide rajamiseks ning Euroopa ühendvõrguga sünkroniseerimise võimaldamiseks tehtavate investeeringutega, ei tundu vaadeldav summa nõndavõrd suur.

Tabel 4.1 Mõõteväärtuste edastusviisid

Mõõteväärtuste edastusviis	IEC 61850-90-5 Diskreetsignaali ja signaalide edastus (R-SV + R-GOOSE)	IEEE C37.118 Sünkrofaasorid
Minimaalne väljalülitusaeg	87 ms	121 ms
Maksimaalne väljalülitusaeg	151 ms	202 ms
Laiapõhjalise diferentsiaalkaitse roll releekaitse kontseptsioonis	Reservkaitse, mille roll on rikkega võrguosa kiirelt eraldada, et vältida tootmisvõimsuste võrgust eraldumist	Reservkaitse, mille roll on rikkega võrguosa kiirelt eraldada, et vältida tootmisvõimsuste võrgust eraldumist
Lisainvesteeringute maht	Vajalik paigaldada kõikidele 110kV AJ fiidritele koondamis-üksused (tk hind ligikaudu 3000 eurot), igasse 110 kV AJ lisa <i>switch</i> , mille maksumus on ligikaudu 4000 eurot, lisamaterjalid, ajasünkroniseerimise seadmed, montaaži- ja seadistustööd	Vajalik paigaldada kõikidele 110kV AJ IED-dele lisa võrgukaart (tk hind ligikaudu 1000 eurot), igasse 110 kV AJ lisa <i>switch</i> , mille maksumus on ligikaudu 4000 eurot, ajasünkroniseerimise seadmed, montaaži- ja seadistustööd
Investeeringute hinnanguline maksumus Eesti 110kV võrgus	4 - 5 miljon eurot + arenduskulu	2 - 3 miljon eurot + arenduskulu

Lisainvesteeringutena on mõeldud täiendavaid kulutusi, mis on lahenduse töösse viimiseks vajalikud. Kogu süsteemi töösse viimiseks maksumust on raske hinnata, sest praktikas ei ole taolist näidet võtta. Arvestades, et laiapõhjalise diferentsiaalkaitse väljaarendamiseks on tarvis täiendavaid uuringuid estimateerimise ja asünkroonkäigu tuvastuse algoritmide osas ning ka tark- ja riistvara osas investeeringuid, võib väita, et arenduskulu oleks ligikaudu 3-5 mlj EUR.

Töö tulemustest järeldub, et laiapõhjalist releekaitset on võimalik luua IEC 61850 standardil põhinevat andmeside protokolliga kasutades, aga alternatiivina on võimalik ka kasutada IEEE C37.118 sünkrofaasoreid. Kasutades IEC 61850-90-5 diskreetsignaali (SV) ja R-GOOSE, on tagatud küberturvalisus, aga vaadeldavat lahendust tänapäeva releekaitse seadmed käesoleva töö kirjutamise ajal ei toeta. IEEE C37.118 sünkrofaasoreid kasutades tuleb aga arvestada, et standard ei võimalda krüpteeringut ja autentimist, mistõttu on küberturvalisuse riskifaktor kõrgendatud.

Uuritav laiapõhjaline releekaitse ei asenda täna kasutusel olevat releekaitse kontseptsiooni, vaid täiendab seda algoritmiga, mis on võimeline ära hoidma tootmisvõimsuste võrgust eraldumist ja distantskaitsete pikema viitega tsoonide vale rakendumist, mis on väga oluline tegur Euroopa ühendvõrguga sünkroniseerimisel. Kasutades mõõteväärtuste valikuloogikas masinõppe meetodeid on võimalik suurendada vaadeldava algoritmi töökindlust ja lihtsustada seadistamise protsessi.

Algoritm sobitub tänasesse releekaitmesse, oleks otstarbekas käesolevat algoritmi katsetada reaalses elektrivõrgus. Selleks tuleks esmalt luua tsentraalseadme prototüüp ja algoritmi täiustada mõõteväärtuste puhvriga ja masinõppe algoritmidega, misjärel on võimalik luua vajalikud sideühendused IED-dega. Samuti on tarvis algoritmi täiustada asünkroonkäigu blokeerimise loogikaga, mida vaadeldavas magistritöös süvitsi ei käsitletud. Katsetusperioodil ei ole esialgu tarvis reaalseid väljalülitamise käskude saata, vaid tuleb salvestada info, mis sündmustele ja millise rakendusajaga algoritm reageeris ning võrrelda seda IED-de häiresalvestustega, et täpsustada võimalikke hilistusi ja väljalülitusaegu. Suure tõenäosusega hakkavad IED-d lähiaastate jooksul toetama IEC 61850-90-5 standardit ja seetõttu on otstarbekas teha vajalik arendustöö, et töökindel algoritm oleks valmis kontseptsiooni realiseerimiseks.

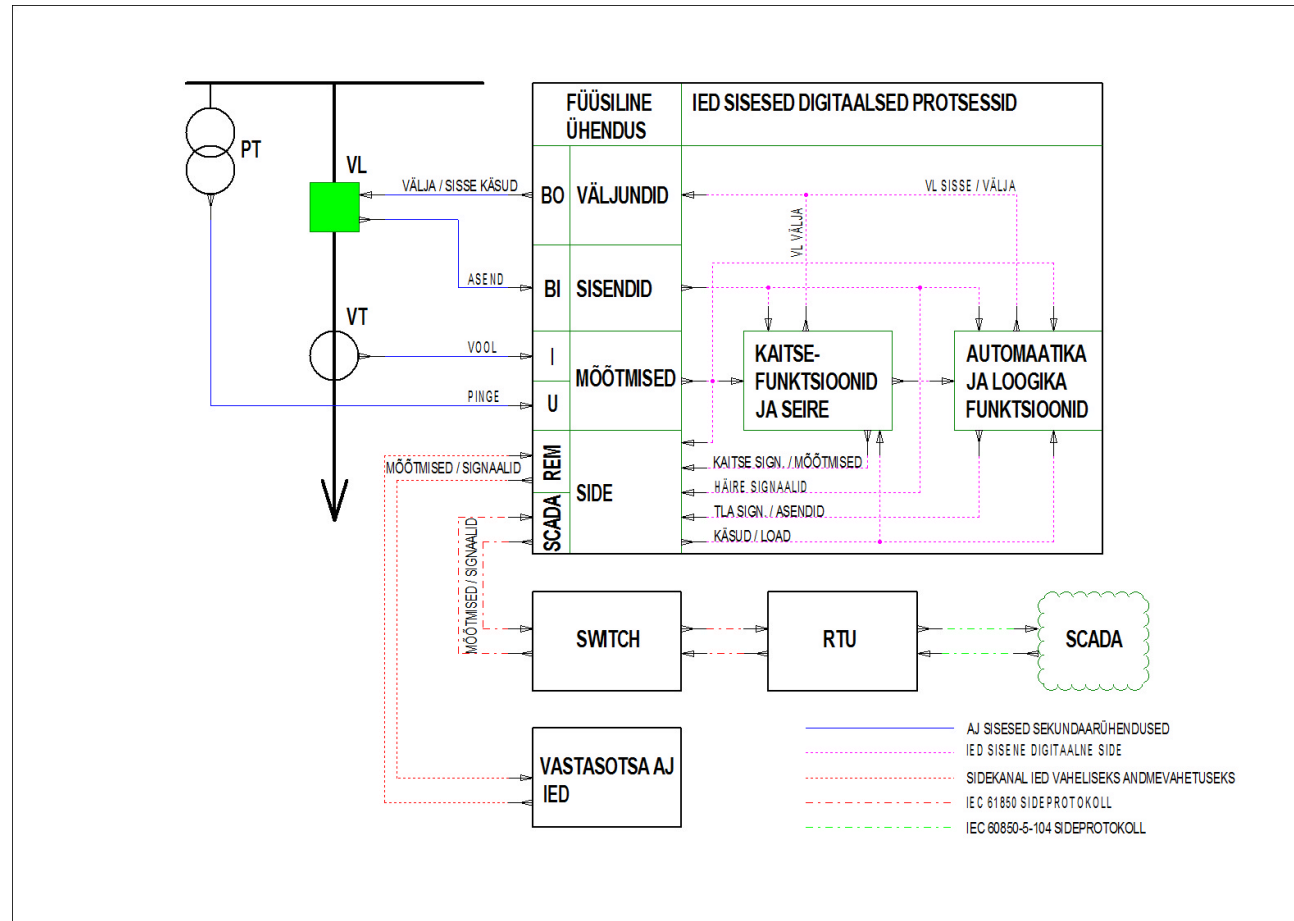
KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Raamat „Jaotusvõrgud“; Autor: M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt, J. Kilter; Tallinn, 2007
- [2] Käsiraamat „Line differential protection stages in Vamp 59“ Autor: Schneider Electric, 2013
- [3] Artikkel „Analysis of IEC 61850-9-2LE Measured Values Using a Neural Network“ Autor: K. Wannous, P. Toman, V. Jurak, V. Wasserbauer
- [4] Artikkel „Reliability Modeling and Analysis of IEC 61850 Based Substation Protection Systems“; Autor: H. Lei, S. Sprintson; C. Singh; IEEE Transactions on Smart Grid, 2014
- [5] Artikkel „Standard Function Blocks for Flexible IED in IEC 61850-Based Substation Automation“ Autor: L. Zhu, D. Shi, X. Duan; IEEE Transactions on Power Delivery, 2011
- [6] Artikkel „Implementing Secure Routable GOOSE and SV Messages based on IEC 61850-90-5“ Autor: T. S. Ustun, S. M. S. Hussain; IEEE, 2019
- [7] Käsiraamat „LANTIME NTP Server (FW LTOS 6.16)“ Autor: Meinberg Radio Clocks GmbH & Co. KG, 2015
- [8] Artikkel „Reducing Internet Latency: A Survey of Techniques and Their Merits“ Autor: B. Briscoe, A. Brunstrom, A. Petlund, D. Hayes, D. Ros, I. Tsang, S. Gjessing, G. Fairhurst, C. Griwodz, M. Welzl; IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014
- [9] Artikkel „Experimental Performance Comparison between TCP vs UDP tunnel using OpenVPN“ Autor: I. Coonjah, K. M. Soyjaudah; 2015
- [10] Artikkel „Performance Evaluation of IEC 61850-90-5 over a latency optimized 3GPP LTE Network“ Autor: G. Bag; M. Johansson, L. Lednicki, J. Neander, L. Eriksson, R. Bogati, P. Hovila, J. Saarinen, J. Torsner; IEEE, 2018
- [11] Artikkel „5G Ultra-Reliable Low-Latency Communication Implementation Challenges and Operational Issues with IoT Devices“ Autor: M. Siddiqi, J. Yu; J. Joung; Electronics 2019
- [12] Artikkel „State of the Art of Machine Learning Models in Energy Systems, a Systematic Review“ Autor: A. Mosavi, M. Salimi, S. F. Ardabili, T. Rabczuk, S. Shamshirband, A. R. Varkonyi-Kocz; Energies, 2019

- [13] Artikkel „Data-Mining-Based Intelligent Differential Relaying for Transmission Lines Including UPFC and Wind Farms“ Autor: M. K. Jena, S. R. Samantaray; IEEE, 2016
- [14] Artikkel „Decision tree-induced fuzzy rule-based differential relaying for transmission line including unified power flow controller and wind-farms“ Autor: M. K. Jena, S. R. Samantaray, L. Tripathy; IEEE, 2014
- [15] Artikkel „Introduction to Fuzzy Logic“ Autor: C. Moraga; Dortmund, 2005
- [16] Artikkel „Summary of GOOSE Substation Communication“ Autor: F. Xia, Z. Xia, X. Huang, 2015
- [17] Võrgueeskiri (26.06.2003), Riigiteataja andmed, viimati muudetud 21.02.2019
- [18] Artikkel „Modelling and Analysis of Asymmetrical Latency in Packet-Based Networks for Current Differential Protection Application“ Autor: S. M. Blair, C. D. Booth, B. De Valck, D. Verhulst, K.-Y. Wong; IEEE, 2017
- [19] Manuaal „620 series Technical Manual“ (Revision F), Autor: ABB Distribution Solutions; 2019
- [20] Artikkel „Managed Ethernet Switches Performance over IEC 61850 Networks: Applications with High Traffic Flow“ Autor: L. Oliveira, M. Zapella, A. Sarda, W. Zanatta; GE Grid Solutions, 2016
- [21] Artikkel „Real-Time Analysis of Time-Critical Messages in IEC61850 Electrical Substation Communication Systems“ Autor: H. León, C. Montez, O. Valle, F. Vasques; Energies, 2019
- [22] Artikkel „Performance Analysis of IEC 61850 Messages in LTE Communication for Reactive Power Management in Microgrids“ Autor: S. M. Suhail Hussain, Mohd Asim Aftab, Taha Selim Ustun; Energies, 2020

LISAD

L1.1 IED PÕHIMÖTTESKEEM



L1.2 DIFERENTIAALKAITSE RAKENDUMISE AJAD

		Time Assessment								
	Name	Ignore before	Start	Stop	Tnom	Tdev-	Tdev+	Tact	Tdev	Assessment
1	KN No trip 0,9xDIF> L1	normal_1	0,9 DIF>1	KN Trip L1 0>1				2,035 s		●
2	KN No trip 0,9xDIF> L2	normal_1	0,9 DIF>1	KN Trip L2 0>1				2,035 s		●
3	KN No trip 0,9xDIF> L3	normal_1	0,9 DIF>1	KN Trip L3 0>1				2,035 s		●
4	S No trip 0,9xDIF> L1	normal_1	0,9 DIF>1	S Trip L1 0>1				2,030 s		●
5	S No trip 0,9xDIF> L2	normal_1	0,9 DIF>1	S Trip L2 0>1				2,030 s		●
6	S No trip 0,9xDIF> L3	normal_1	0,9 DIF>1	S Trip L3 0>1				2,030 s		●
7	KN Trip 1,1xDIF> L1	0,9 DIF>1	1,1 DIF>	KN Trip L1 0>1	0,000 s	50,00 ms	50,00 ms	35,00 ms	35,00 ms	✓
8	KN Trip 1,1xDIF> L2	0,9 DIF>1	1,1 DIF>	KN Trip L2 0>1	0,000 s	50,00 ms	50,00 ms	35,20 ms	35,20 ms	✓
9	KN Trip 1,1xDIF> L3	0,9 DIF>1	1,1 DIF>	KN Trip L3 0>1	0,000 s	50,00 ms	50,00 ms	35,20 ms	35,20 ms	✓
10	KN Trip 1,1xDIF> L1	0,9 DIF>1	1,1 DIF>	S Trip L1 0>1	0,000 s	50,00 ms	50,00 ms	30,30 ms	30,30 ms	✓
11	KN Trip 1,1xDIF> L2	0,9 DIF>1	1,1 DIF>	S Trip L2 0>1	0,000 s	50,00 ms	50,00 ms	30,40 ms	30,40 ms	✓
12	KN Trip 1,1xDIF> L3	0,9 DIF>1	1,1 DIF>	S Trip L3 0>1	0,000 s	50,00 ms	50,00 ms	30,00 ms	30,00 ms	✓
13	KN 3ph AR close CB1	1,1 DIF>	KN Trip L3 0>1	KN Close CB 0>1	3,500 s	150,0 ms	200,0 ms	3,652 s	151,5 ms	✓
14	S 3ph AR close S CB1	1,1 DIF>	S Trip L3 0>1	S Close CB 0>1	4,500 s	150,0 ms	200,0 ms	4,652 s	151,7 ms	✓
15	KN No trip 0,9 DIF>2	normal_3 and Close CBs	0,9 DIF>2	KN Trip L1 0>1				1,038 s		●
16	S No trip 0,9 DIF>2	normal_3 and Close CBs	0,9 DIF>2	S Trip L1 0>1				1,033 s		●
17	KN Trip 0,9xDIF Fast>> L1	0,9 DIF>2	0,9 DIF>>	KN Trip L1 0>1	0,000 s	50,00 ms	50,00 ms	38,10 ms	38,10 ms	✓
18	KN Trip 0,9xDIF Fast>> L2	0,9 DIF>2	0,9 DIF>>	KN Trip L2 0>1	0,000 s	50,00 ms	50,00 ms	38,20 ms	38,20 ms	✓
19	KN Trip 0,9xDIF Fast>> L3	0,9 DIF>2	0,9 DIF>>	KN Trip L3 0>1	0,000 s	50,00 ms	50,00 ms	38,00 ms	38,00 ms	✓
20	S Trip 0,9xDIF Fast>> L1	0,9 DIF>2	0,9 DIF>>	S Trip L1 0>1	0,000 s	50,00 ms	50,00 ms	33,10 ms	33,10 ms	✓
21	S Trip 0,9xDIF Fast>> L2	0,9 DIF>2	0,9 DIF>>	S Trip L2 0>1	0,000 s	50,00 ms	50,00 ms	33,10 ms	33,10 ms	✓
22	S Trip 0,9xDIF Fast>> L3	0,9 DIF>2	0,9 DIF>>	S Trip L3 0>1	0,000 s	50,00 ms	50,00 ms	33,00 ms	33,00 ms	✓
23	KN 3ph no AR	0,9 DIF>2	KN Trip L1 0>1	KN Close CB 0>1						●
24	S 3ph no AR	0,9 DIF>2	S Trip L1 0>1	S Close CB 0>1						●
25	KN Trip 1,1xDIF Fast>> L1	0,9 DIF>3	1,1 DIF>>	KN Trip L1 0>1	0,000 s	50,00 ms	55,00 ms	22,20 ms	22,20 ms	✓
26	KN Trip 1,1xDIF Fast>> L2	0,9 DIF>3	1,1 DIF>>	KN Trip L2 0>1	0,000 s	50,00 ms	55,00 ms	28,30 ms	28,30 ms	✓
27	KN Trip 1,1xDIF Fast>> L3	0,9 DIF>3	1,1 DIF>>	KN Trip L3 0>1	0,000 s	50,00 ms	55,00 ms	27,10 ms	27,10 ms	✓
28	S Trip 1,1xDIF Fast>> L1	0,9 DIF>3	1,1 DIF>>	S Trip L1 0>1	0,000 s	50,00 ms	55,00 ms	17,90 ms	17,90 ms	✓
29	S Trip 1,1xDIF Fast>> L2	0,9 DIF>3	1,1 DIF>>	S Trip L2 0>1	0,000 s	50,00 ms	55,00 ms	23,70 ms	23,70 ms	✓
30	S Trip 1,1xDIF Fast>> L3	0,9 DIF>3	1,1 DIF>>	S Trip L3 0>1	0,000 s	50,00 ms	55,00 ms	22,40 ms	22,40 ms	✓
31	KN no AR CB Close	1,1 DIF>>	normal_5	KN Close CB 0>1						●
32	S no AR CB Close	1,1 DIF>>	normal_5	S Close CB 0>1						●

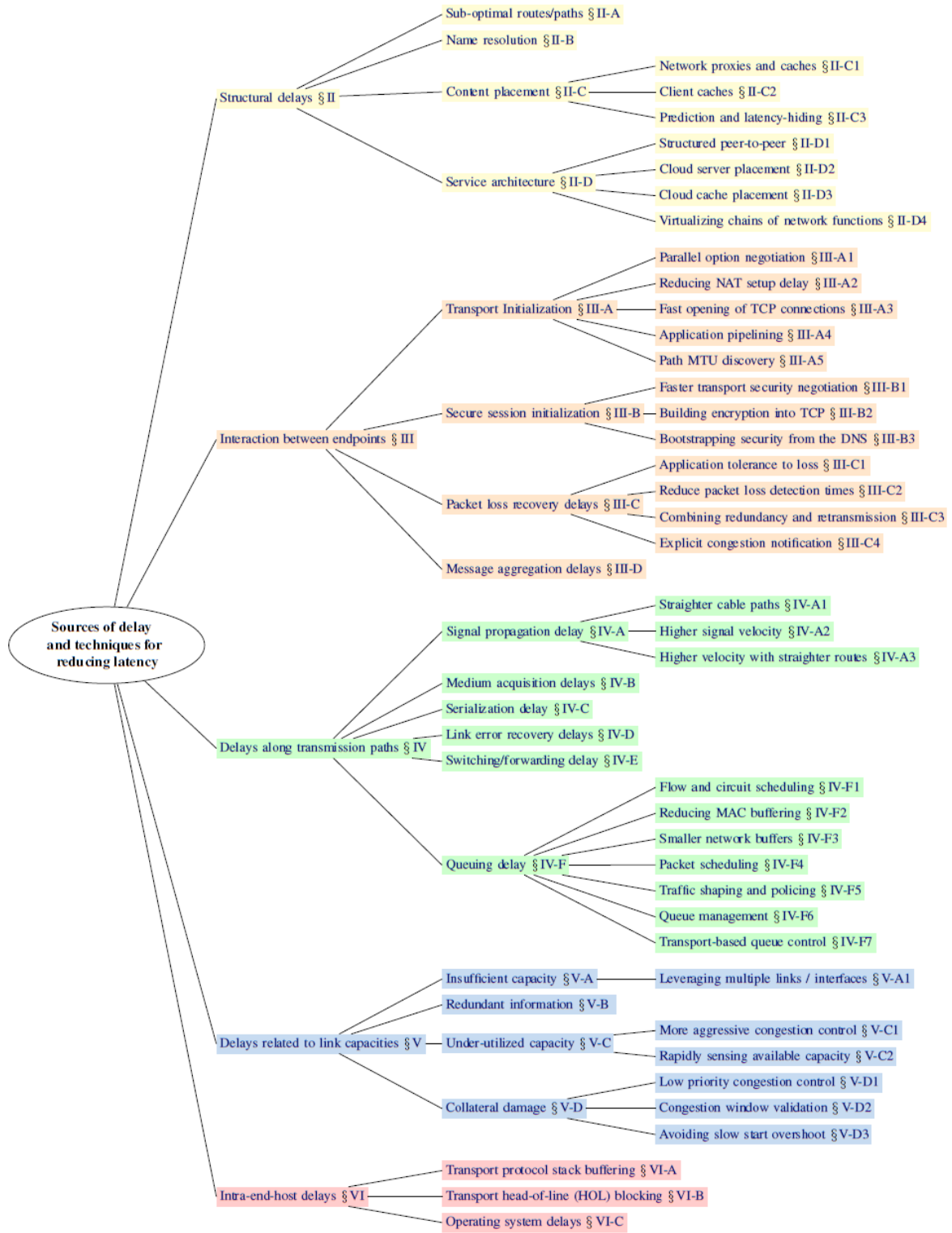
Idif>

TLA

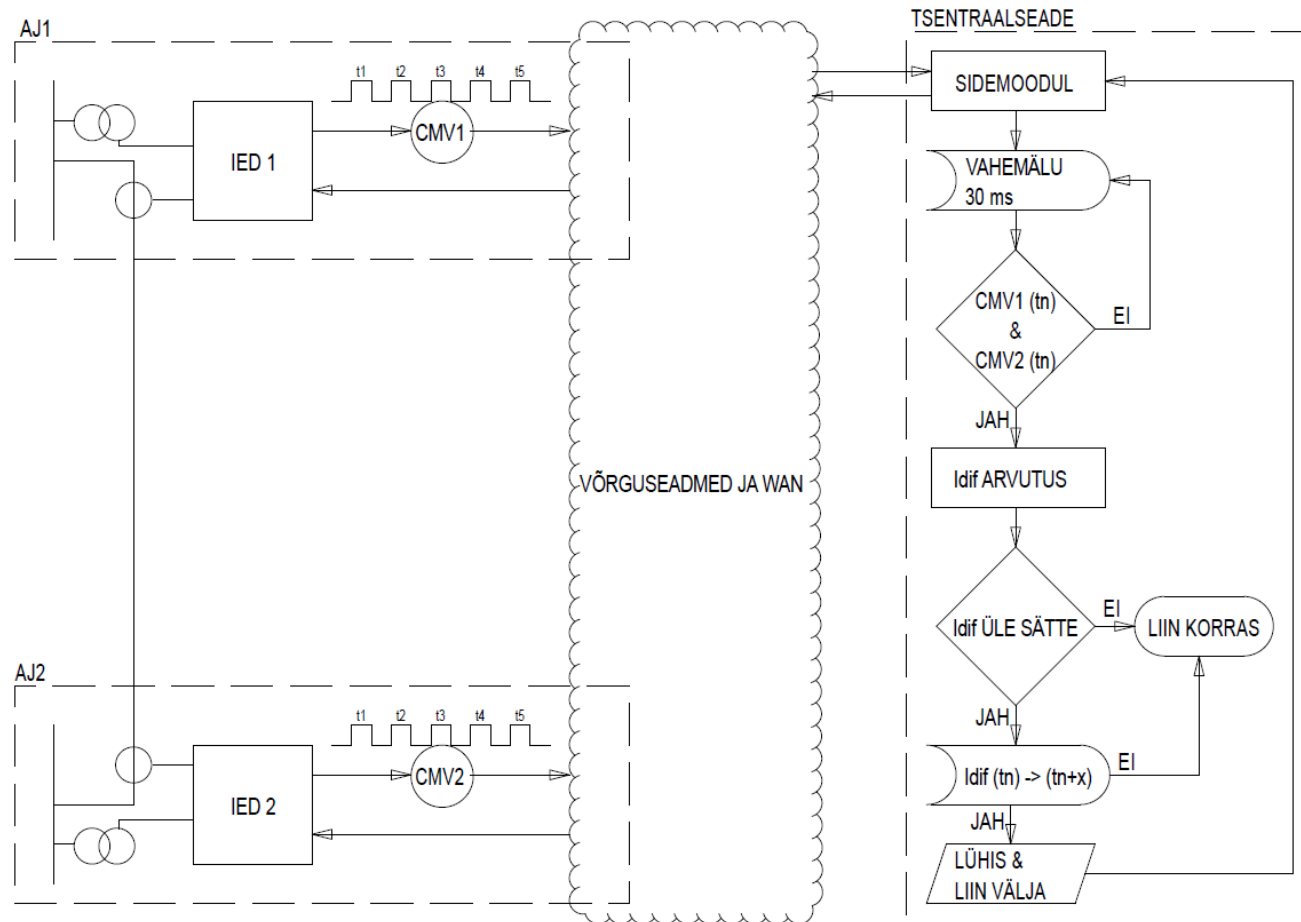
Idif>

Idif>>

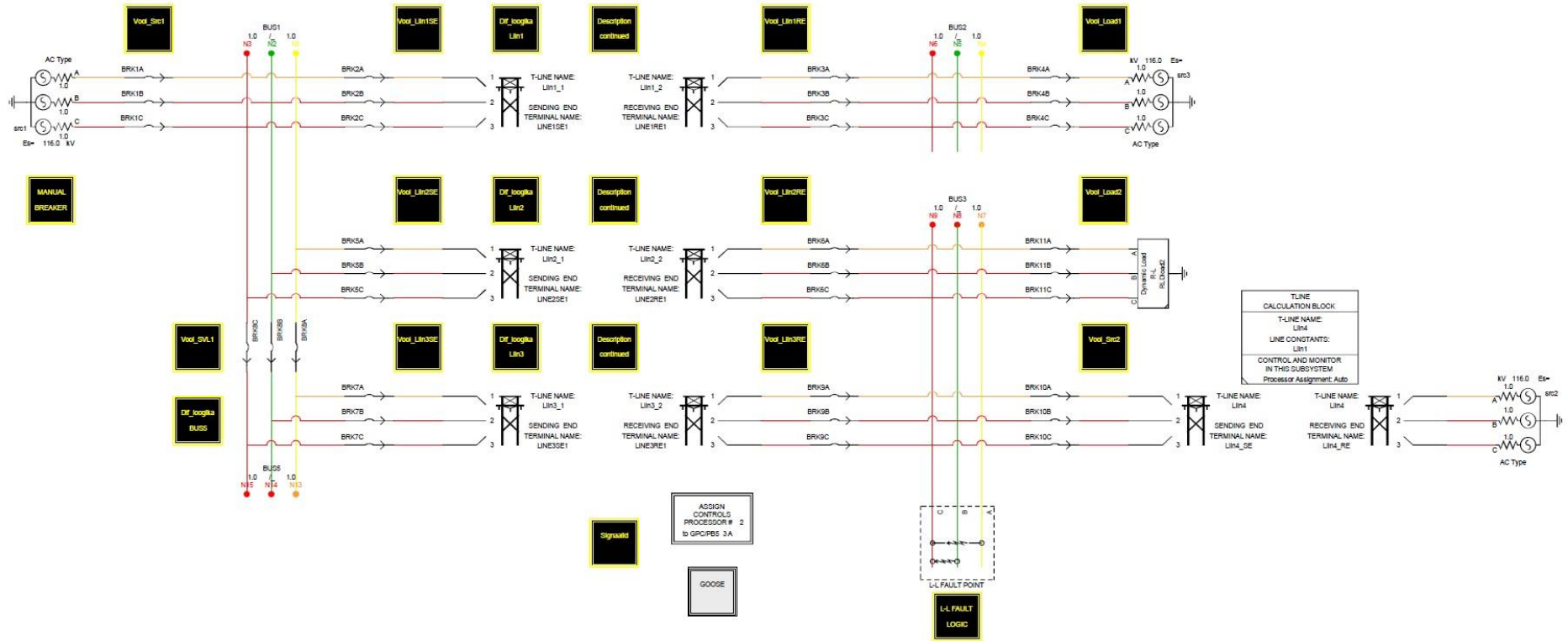
L1.3 LATENTSUSE PÕHJUSED JA VÄHENDAMISE VÕIMALUSED



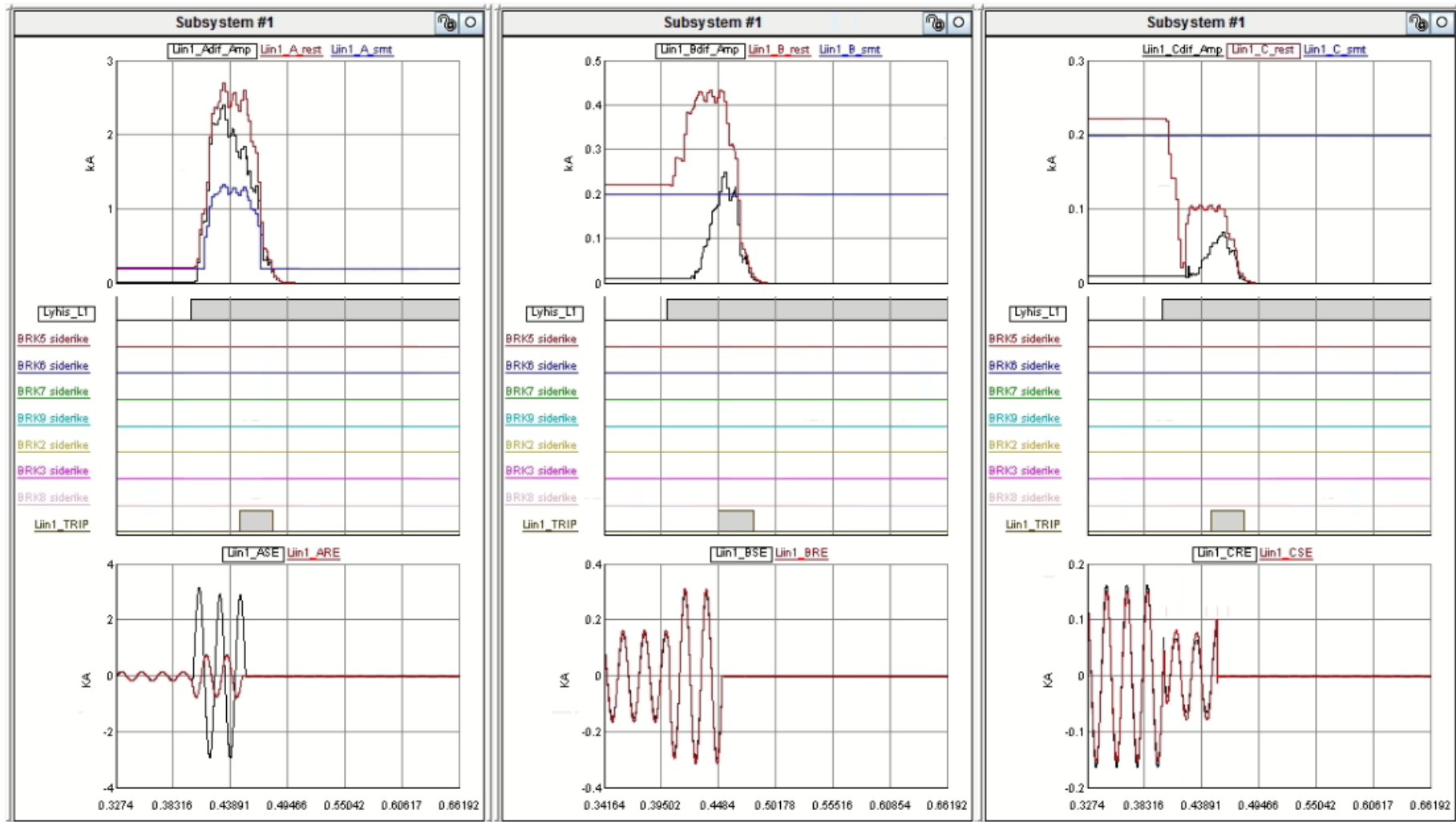
L2.1 DIFERENTSIAALKAITSE ALGORITM



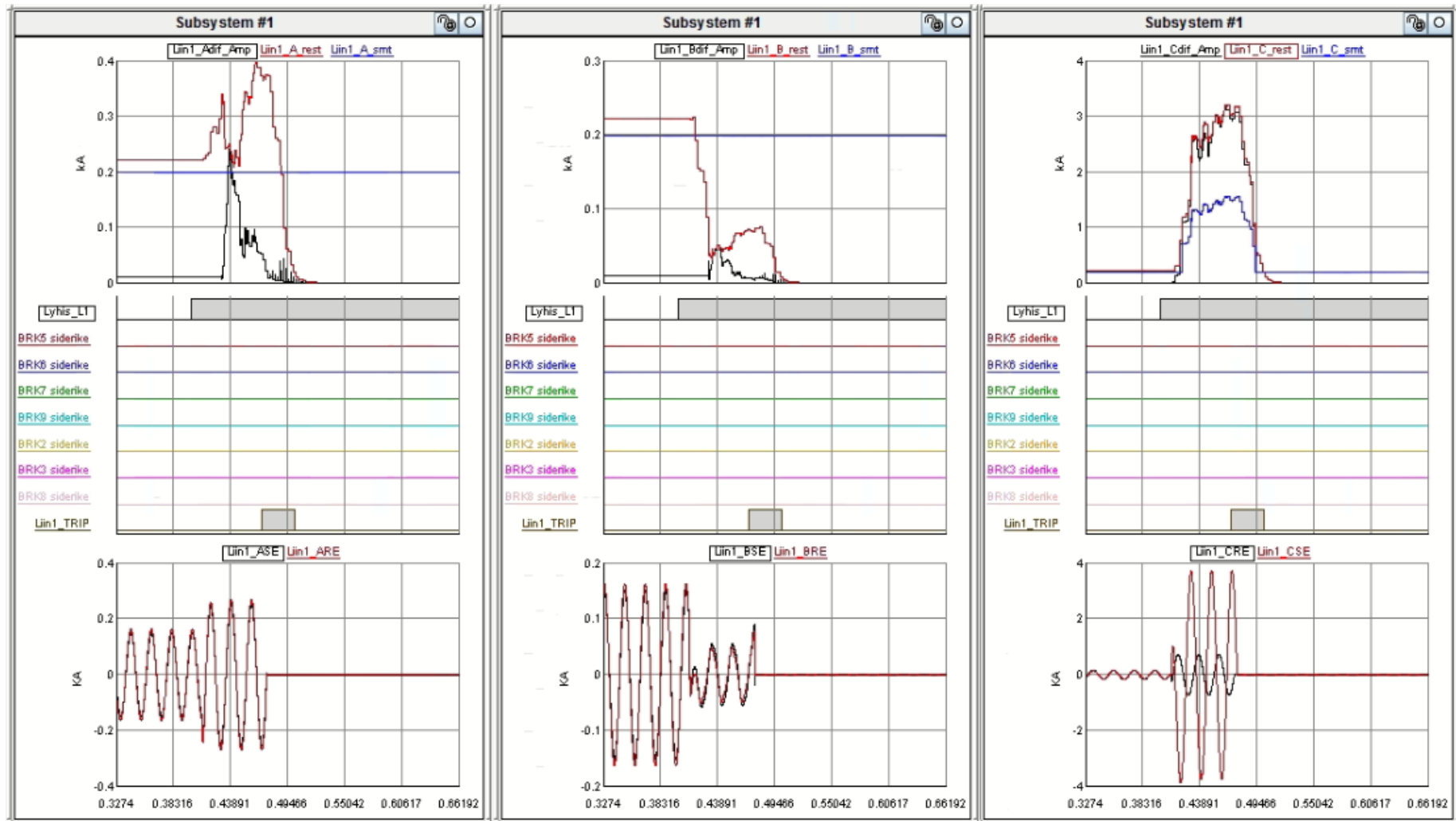
L3.1 RSCAD ELEKTRIVÖRGU SKEEM



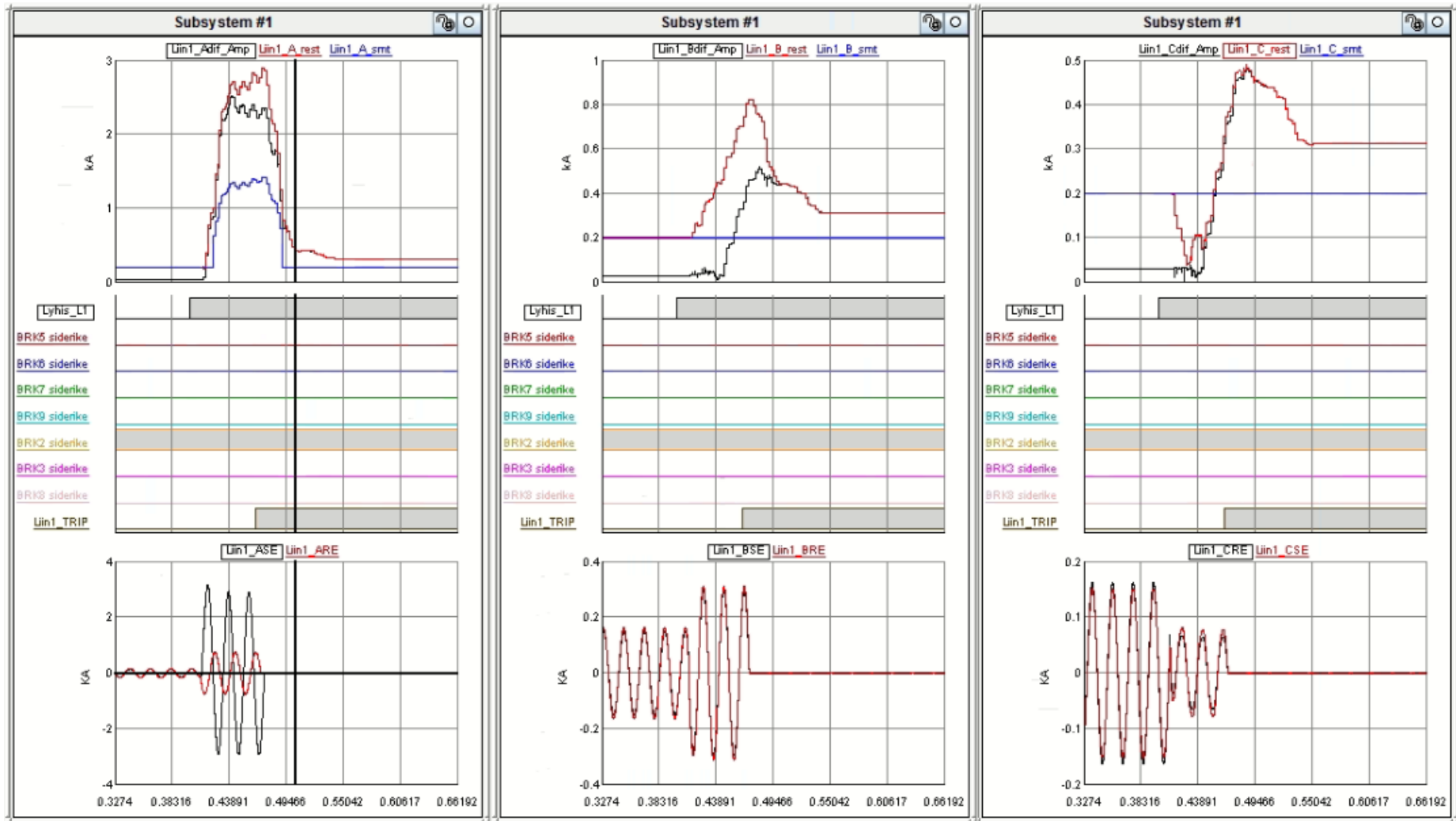
L3.2 ALGORITMI TEST: LIIN 1 (10 %), L1-MAA LÜHIS, RIKKED PUUDUVAD



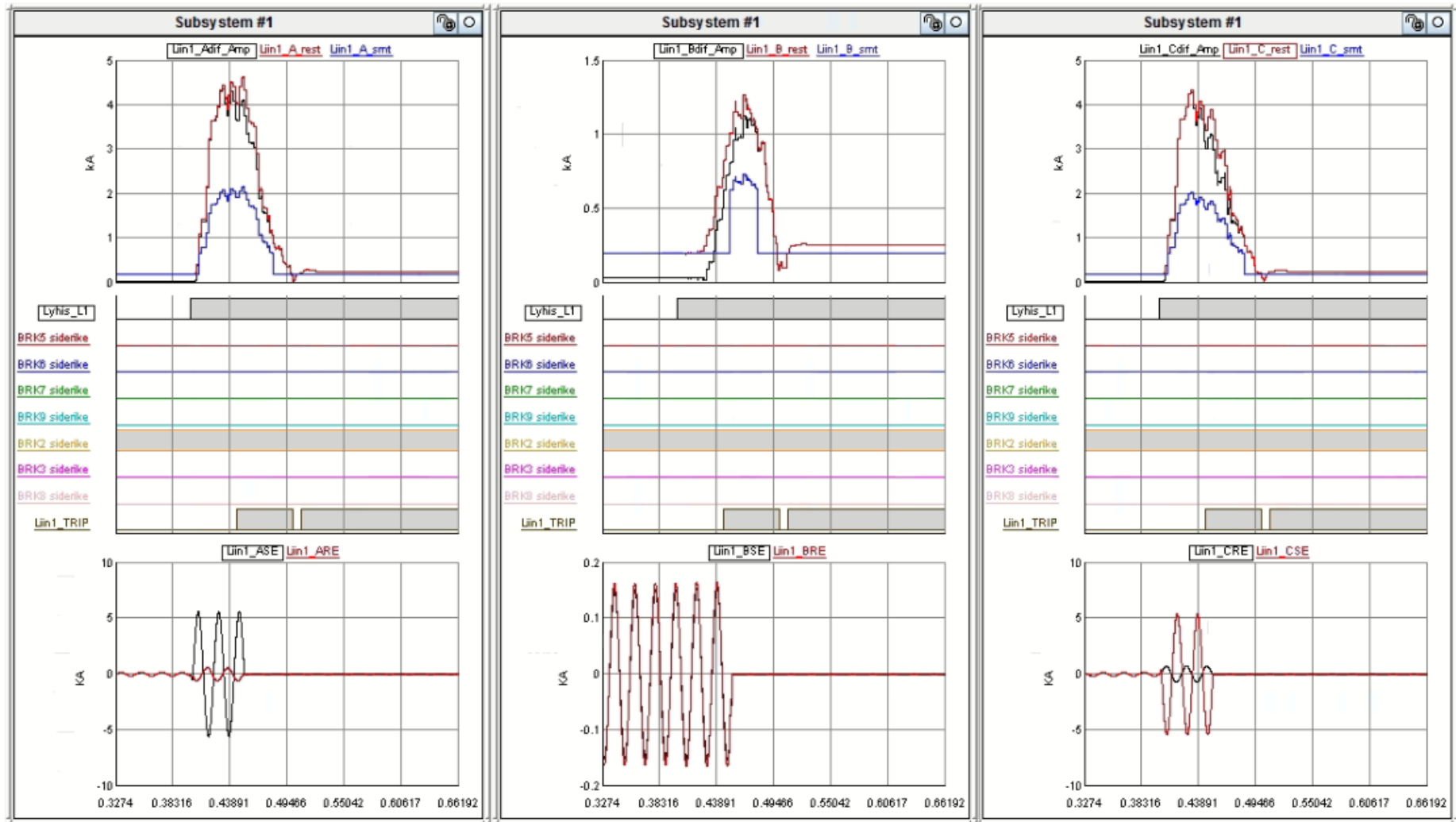
L3.3 ALGORITMI TEST: LIIN 1 (40%), L3-MAA LÜHIS, RIKKED PUUDUVAD



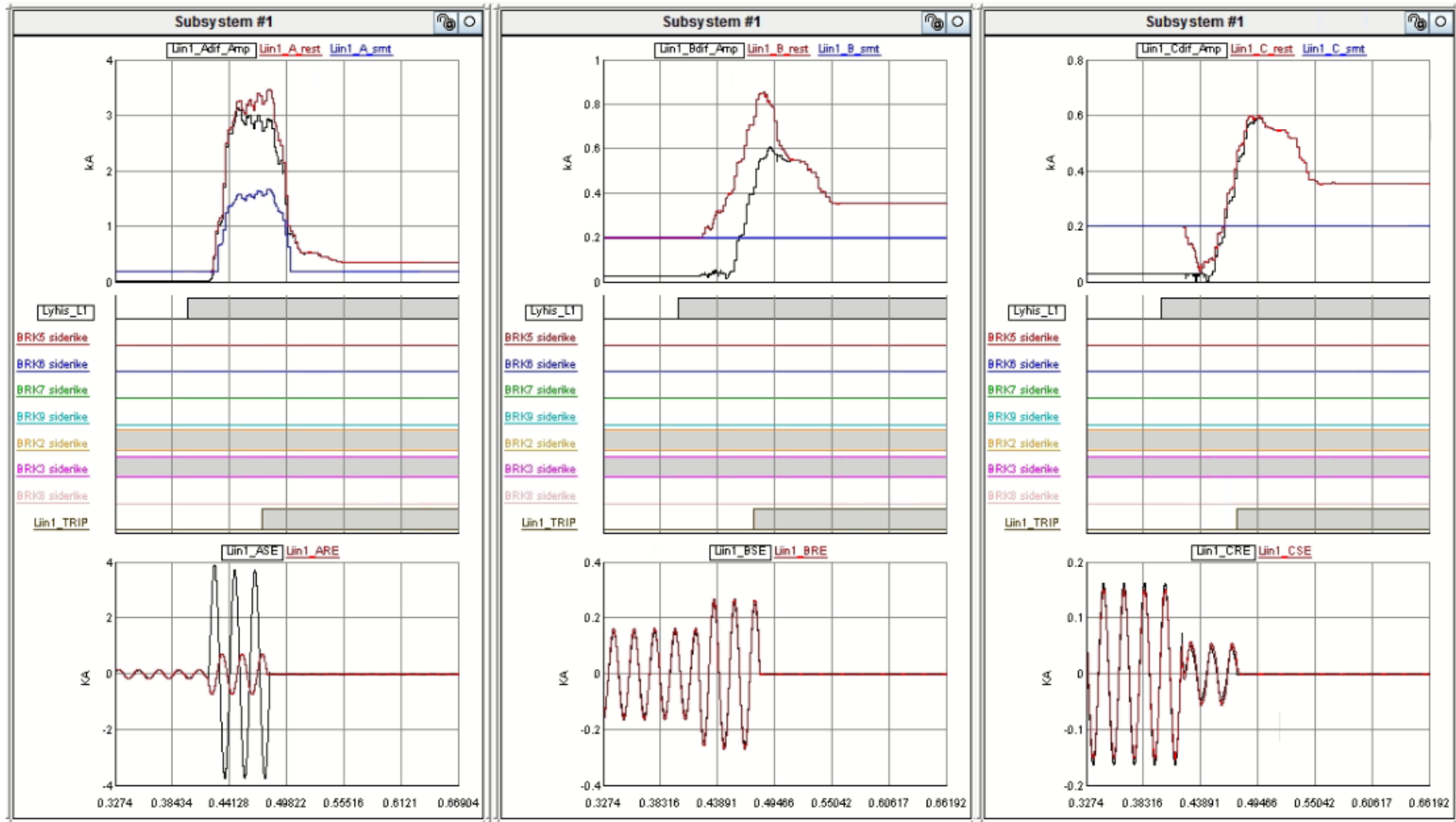
L3.4 ALGORITMI TEST: LIIN 1 (10 %), L1-MAA LÜHIS, BRK2 RIKE



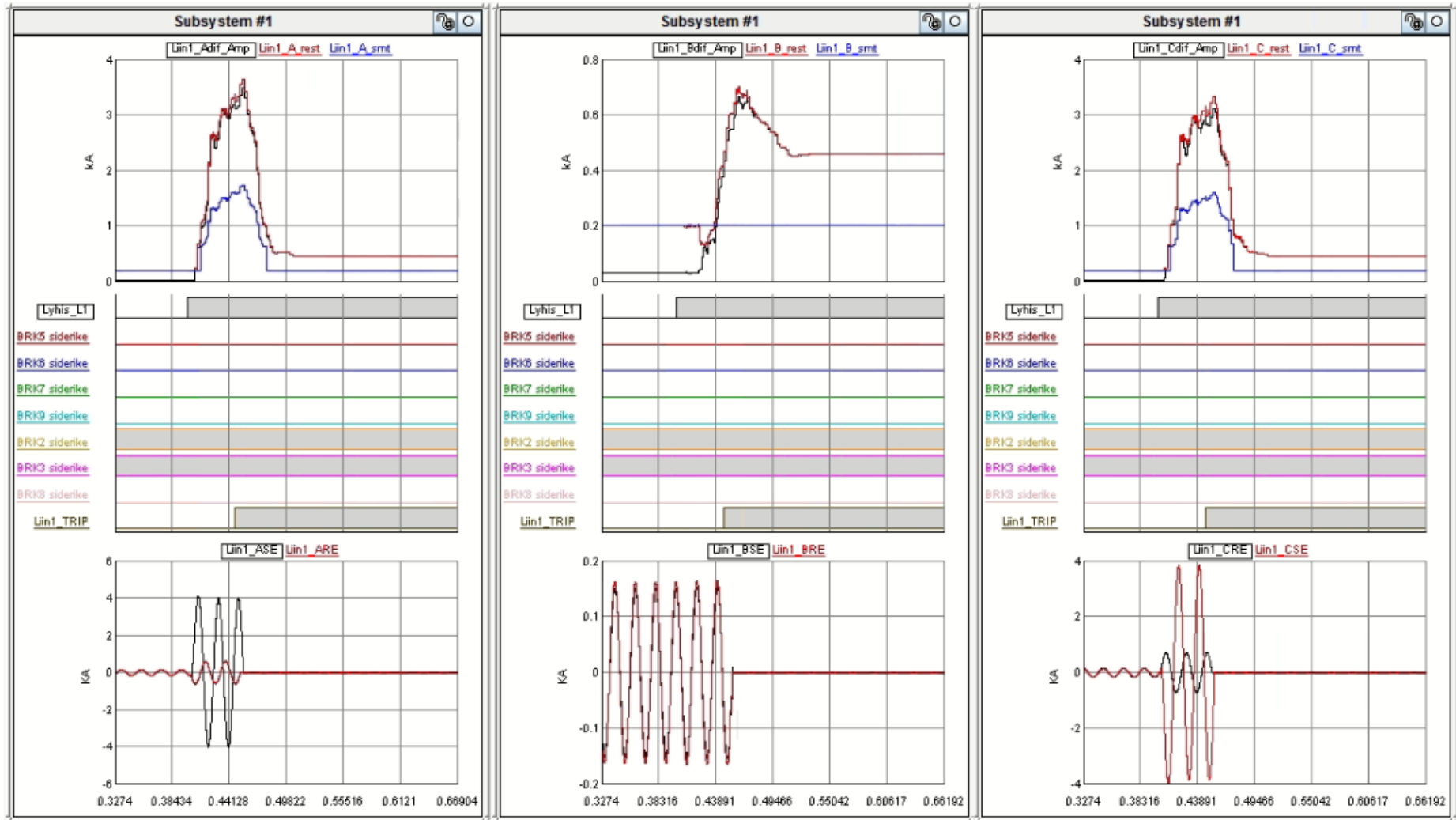
L3.5 ALGORITMI TEST: LIIN 1 (85%), L1-L3 LÜHIS, BRK2 RIKE



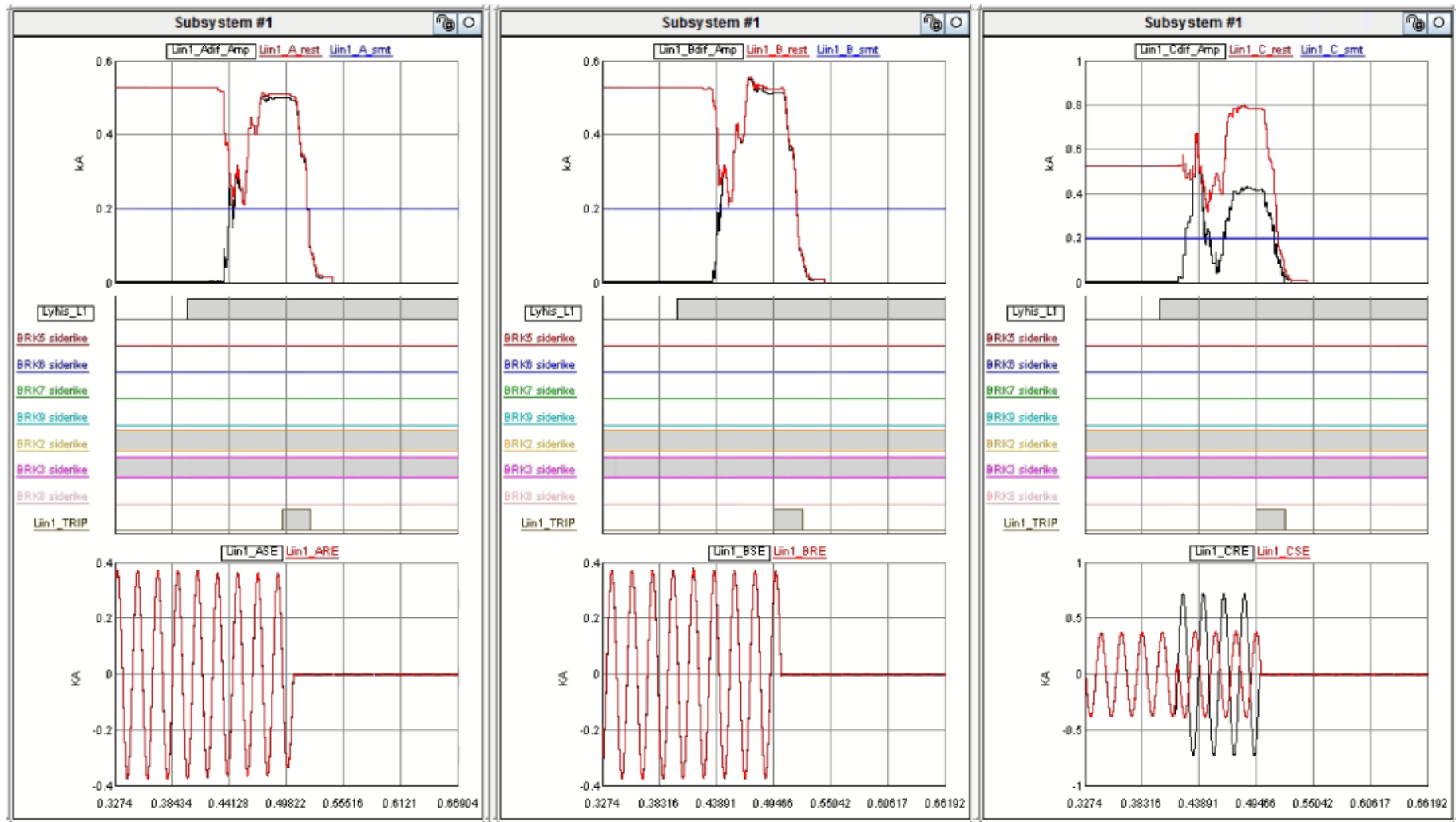
L3.6 ALGORITMI TEST: LIIN 1 (40%), L1 LÜHIS, BRK2 JA BRK3 RIKE



L3.7 ALGORITMI TEST: LIIN 1 (10 %), L1-L3 LÜHIS, BRK2 JA BRK3 RIKE



L3.8 ALGORITMI TEST: LIIN 1 (85%), L3 LÜHIS, BRK2 JA BRK3 RIKE, SRC1 VÄLJAS



L3.9 ALGORITMI TEST: LIIN 1 (40%), L1-L2-L3 LÜHIS, BRK2 JA BRK3 RIKE, SRC1 VÄLJAS

