



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**MADALPINGEVÕRGU REKONSTRUEERIMISE JA
ARENDAMISEGA SEOTUD LÜHISVOOLUDE
ARVUTUSTE METOODIKA ANALÜÜS**

**ANALYSIS OF SHORT-CIRCUIT CURRENT
CALCULATIONS RELATED TO THE RECONSTRUCTION
AND DEVELOPMENT OF THE LOW-VOLTAGE NETWORK**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Egert Siigur

Üliõpilaskood: 211938AAVM

Juhendaja: Heigo Mölder, teadur

Kaasjuhendaja: Toomas Vinnal, teadur

Tallinn 2024

(Tiitellehe pöördel)

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.

“13” mai 2024

Autor: Egert Siigur

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab magistritöö esitatud nõuetele

“13” mai 2024

Juhendaja: Heigo Mõlder

/ allkirjastatud digitaalselt/

Kaitsmisele lubatud

“.....”20..... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Egert Siigur (sünnikuupäev: 28.07.1999)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Madalpingevõrgu rekonstrueerimise ja arendamisega seotud lühisvoolude arvutuste meetodika analüüs

mille juhendajad on teadur Heigo Mölder ja teadur Toomas Vinnal

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.

13.05.2024 (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 loomingulise 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

<i>Autor:</i> Egert Siigur	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> Madalpingevõrgu rekonstrueerimisega ja arendamisega seotud lühisvoolude arvutuste metoodika analüüs	
<i>Kuupäev:</i> 13.05.2024	78 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendajad:</i> teadur Heigo Mölder, teadur Toomas Vinnal	
<i>Töö konsultandid:</i> Lembit Saamel, Ülo Treufeldt, Victor Astapov	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Magistritöö eesmärgiks on võrrelda omavahel eri meetodil arvatud ühefaasilisi lühisvoole elektrivõrguga liitunud tarbijate liitumispunktis mõõdetud ühefaasilisi lühisvoole, et teada saada, missuguse arvutusmeetodiga saadud tulemused on kõige täpsemad võrreldes mõõtetulemustega. Kõige pealt on kirjeldatud lühisvoolu olemust ning on välja toodud lühisvoolude tüübid. Seejärel on kajastatud kaitseseadmeid, mida kasutatakse madalpingevõrgus, mille järel on kirjeldatud madalpingevõrgus kasutusel olevat juhistiksüsteemi. Magistritöö põhiosas on kajastatud ühefaasiliste lühisvoolude arvutuste teostamist, kus esmalt on ära kirjeldatud kõikide tarbijatega seonduvate seadmete ning kaablite parameetrid. Seejärel on teostatud ühefaasiliste lühisvoolude arvutused Simelect ja DIGSILENT tarkvaradega ning lisaks veel täpsed arvutused koos Microsoft Excel tarkvaraga. Arvutustulemusi on võrreldud omavahel liitumispunktides saadud mõõtetulemustega. Magistritöö lõpus on teostatud arvutustulemuste ning mõõtetulemuste kokkuvõtlik analüüs, kus tuuakse välja, millise arvutusmeetodiga saab kõige täpsemad ühefaasiliste lühisvoolude tulemused võrreldes mõõtetulemustega.</p>	
<i>Märksõnad:</i> ühefaasiline lühis, ühefaasiline lühisvool, mõõtetulemus, kaitseseadmed, pingekadu, arvutustarkvara, tarbija, elektrienergia.	

ABSTRACT

<p><i>Author:</i> Egert Siigur</p> <p><i>Title:</i> Analysis of short-circuit current calculations related to the reconstruction and development of the low-voltage network</p> <p><i>Date:</i> 13.05.2024</p>	<p><i>Type of the work:</i> Master Thesis</p> <p><i>78 pages</i></p>
<p><i>University:</i> Tallinn University of Technology</p> <p><i>School:</i> School of Engineering</p> <p><i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics</p>	
<p><i>Supervisor of the thesis:</i> research scientist Heigo Mõlder, research scientist Toomas Vinnal</p> <p><i>Consultants:</i> Lembit Saamel, Ülo Treufeldt, Victor Astapov</p>	
<p><i>Abstract:</i></p> <p>The target of master thesis was compare single-phase short circuit current, what was calculate single-phase short circuit current with three different ways, to get know, which calculation method is closest to the measurement results. First part of master´s thesis has description of short-circuit and types of short-circuits. After that there is description of protective devices and guidance system, which is used at low-voltage network. At the main part of master thesis are brought out calculations with Simelect, DIgSILENT and manually with Microsoft Excel of single-phase short circuits. Also there is described all protective devices and cabel parameters, which is used in low-voltage network. Calculation results are compared with measurement results. At the end of master´s thesis there has been pointed out calculation results and measurement results, where is brought out, which calculation method will give more accurate results of single-phase short-circuit current compared of measurement data</p>	
<p><i>Keywords:</i> single-phase short-circuit, single-phase short-circuit current, measurement result, protective devices, voltage drop, computing software, consumer, electrical energy.</p>	

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Egert Siigur, 211938AAVM

Õppekava, peeriala: AAVM, Elektroenergeetika

Juhendaja: Heigo Mölder, teadur, +372 526 4992

Kaasjuhendaja: Toomas Vinnal, teadur, +372 554 4336

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Madalpingevõrgu rekonstrueerimise ja arendamisega seotud lühisvoolude arvutuste meetodika analüüs

(inglise keeles) Analysis of the technique short-circuit current calculations related to the reconstruction and development of the low-voltage network

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Põhieesmärgiks on võrrelda ning analüüsida omavahel üld kasutatavat võrguarvutus tarkvara Simelect, alternatiivse tarkvaraga ning teostada lisaks täpsed arvutused.
2. Saadud arvutustulemuste ja liitumispunktis mõõdetud tulemuste kokkulangevuse hindamine.
3. Simelect tarkvara ning vabalt valitud tarkvara lühisvoolude tulemuste omavahelise kokkulangevuse hindamine.
4. Teada saamine, kas Simelect tarkvaras puudu olevad andmed põhjustavad lühisvooludes erinevusi võrreldes mõõtetulemustega.
5. Teada saamine, kui suured on lühisvoolude erinevused täpsete arvutuste korral võrreldes Simelect ning vabalt valitud tarkvarade arvutustega.
6. Lõpp eesmärgiks on soov teada saada, milline arvutusmeetodika annab kõige täpsema lühisvoolu tulemuse võrreldes liitumispunktis mõõdetud tulemustega.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse kogumine ning sellega tutvumine	30.11.23
2.	Teoreetilise osa kirjutamine	27.12.23
3.	Lühisvoolude arvutuste tegemine	30.01.24
4.	Vabalt valitud tarkvaraga arvutuste tegemine	19.02.24
5.	Arvutuste ja mõõtetulemuste analüüs	09.03.24
6.	Järelduste ja kokkuvõtte tegemine	23.03.24
7.	Esimene versioon tööst valmis ning juhendajale lugemiseks	06.04.24

	saatmine	
8.	Paranduste tegemine ning töö saatmine juhendajale teiseks lugemiseks	20.04.24
9.	Lõplik versioon tööst valmis	11.05.24

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 13.05.2024

Üliõpilane: Egert Siigur 10.2023
/digiallkirjastatud/

Juhendaja: Heigo Mölder 10.2023
/digiallkirjastatud/

Kaasjuhendaja: Toomas Vinnal 10.2023
/digiallkirjastatud/

Programmijuht: Marek Tull 10.2023
/digiallkirjastatud/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
SISUKORD	8
EESSÕNA	11
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	12
SISSEJUHATUS	13
EESTI MP-VÕRGU ISELOOMUSTUS	13
PROBLEEMI KIRJELDUS	13
MP-VÕRGUSEADMETE PROJEKTEERIMINE	15
1 ÜLEVAADE LÜHISTEST MADALPINGEVÕRGUS	17
1.1 LÜHISVOOLU ISELOOMUSTUS	17
1.2 LÜHISTE TÜÜBID	19
1.2.1 Faasi ja maa vaheline lühis	19
1.2.2 Faaside vaheline lühis	20
1.2.3 Kahe faasi ja maa vaheline lühis	21
1.2.4 Kolmefaasiline lühis	22
1.2.5 Lühis keskpingevõrgus	23
1.3 PEATÜKI KOKKUVÕTE	24
2 LÜHISVOOLUDE ANALÜÜS LIITUMISPUNKTIS	25
2.1 LÜHISVOOLUDE ANALÜÜS	25
2.2 KAITSESEADMETE VALIK	25
2.3 LK KIRJELDUS	30
2.4 TN-C JUHISTIKSÜSTEEM	31
2.5 ELEKTRILIITUMISTEGA SEOTUD TEHNILISED PARAMEETRID	32
2.5.1 Elektrivõrguga liitumised 6 – 16 A	32
2.5.2 Elektrivõrguga liitumised 20 – 25 A	34
2.5.3 Elektrivõrguga liitumised 32 – 160 A	35
2.6 SIMELECT TARKVARA KIRJELDUS JA ARVUTATUD LÜHISVOOL	36
2.6.1 Simelect tarkvara kasutamine	36
2.6.2 6 -16 A liitumiste ühefaasiline lühisvool ja pingekadu	38
2.6.3 20 -25 A liitumiste ühefaasiline lühisvool ja pingekadu	39

2.6.4 32 -160 A liitumiste ühefaasiline lühisvool ja pingekadu.....	39
2.7 EUROTEST 61557 MÕÖTESEADME KIRJELDUS	40
2.8 LIITUMISPUNKTIS MÕÕDETUD ÜHEFAASILINE LÜHISVOOL.....	41
2.8.1 Liitumiste 6-16 A korral mõõdetud ühefaasiline lühisvool.....	41
2.8.2 Liitumiste 20-25 A korral mõõdetud ühefaasiline lühisvool	42
2.8.3 Liitumiste 32-160 A korral mõõdetud ühefaasiline lühisvool.....	43
2.9 LIITUMISPUNKTIS MÕÕDETUD ÜHEFAASILISE LÜHISVOOLU NING SIMELECT TARKAVARAGA ARVUTATUD ÜHEFAASILISE LÜHISVOOLU KOKKULANGEVUS	44
2.9.1 Simelect tarkavara ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevus 6-16 A elektrivõrguga liitujate korral	44
2.9.2 Simelect tarkavara ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevus 20-25 A elektrivõrguga liitujate korral.....	46
2.9.3 Simelect tarkavara ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevus 32-160 A elektrivõrguga liitujate korral	47
2.10 PEATÜKI KOKKUVÕTE JA ANALÜÜS	48
3 ÜHEFAASILISTE LÜHISVOOLUDE ARVUTAMINE MICROSOFT EXCEL PROGRAMMIGA	50
3.1 ARVUTUSTE TEOSTAMISE KIRJELDUS	50
3.2 ARVUTUSTE TEOSTAMISE NÄIDE	52
3.3 MICROSOFT EXCEL PROGRAMMIGA ARVUTATUD ÜHEFAASILINE LÜHISVOOL	53
3.3.1 Microsoft Excel programmiga arvutatud ühefaasiline lühisvool ja pingekadu liitumiste 6 -16 A korral.....	53
3.3.2 Microsoft Excel programmiga arvutatud ühefaasiline lühisvool ja pingekadu liitumiste 20 -25 A korral.....	55
3.3.3 Microsoft Excel programmiga arvutatud ühefaasiline lühisvool ja pingekaod liitumiste 32 - 160 A korral.....	56
3.4 MÕÕDETUD ÜHEFAASILISE LÜHISVOOLU NING MICROSOFT EXCELIS ARVUTATUD ÜHEFAASILISE LÜHISVOOLU KOKKULANGEVUS	57
3.4.1 Microsoft Excelis arvutatud ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevus 6-16 A elektrivõrguga liitujate korral.....	57
3.4.2 Microsoft Exceli arvutatud ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevus 20-25 A elektrivõrguga liitujate korral	58
3.4.3 Microsoft Excelis arvutatud ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevus 32-160 A elektrivõrguga liitujate korral.....	60
3.5 PEATÜKI KOKKUVÕTE JA ANALÜÜS.....	61
4 ÜHEFAASILISTE LÜHISVOOLUDE ARVUTAMINE DIGSILENT TARKVARAGA.....	62

4.1 DIGSILENT PROGRAMMIGA ARVUTATUD ÜHEFAASILINE LÜHISVOOL.....	62
4.1.1 Ühefaasilise lühisvoolu arvutamise näide DIGSILENT programmis.....	62
4.1.2 Digsilent programmiga arvutatud ühefaasiline lühisvool ja pingekadu liitumiste 20 -25 A korral.....	64
4.1.3 Digsilent programmiga arvutatud ühefaasiline lühisvool ja pingekaod liitumiste 32 - 160 A korral.....	65
4.2 DIGSILENT TARKVARAGA ARVUTATUD NING LIITUMISPUNKTIS MÕÕDETUD ÜHEFAASILISTE LÜHISVOOLUDE KOKKULANGEVUS	66
4.2.1 Digsilent tarkavaraga ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevus 6-16 A elektrivõrguga liitujate korral.....	66
4.2.2 Digsilent tarkavaraga ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevus 20-25 A elektrivõrguga liitujate korral	67
4.2.3 Digsilent tarkavaraga ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevus 32-160 A elektrivõrguga liitujate korral.....	68
4.3 TEOSTATUD ARVUTUSTE TULEMUSTE ANALÜÜS	70
4.4 PEATÜKI KOKKUVÕTE	72
KOKKUVÕTE	73
SUMMARY.....	75
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	77

EESSÕNA

Magistritöö teema pakkus välja Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi teadur Toomas Vinnal. Sellest tulenevalt tegeleti antud lõputöö raames ühefaasiliste lühisvoolude võrdlemisega ehk võrreldi omavahel liitumispunktis kohapeal mõõdetud ühefaasilisi lühisvoolusid erinevatel meetoditel arvutatud lühisvooludega, et teada saada, missuguse meetodiga on võimalik kõige täpsemini ühefaasilised lühisvoolud välja arvutada. Lõputöö aluseks olid Enefit Connect OÜ poolsed lähteülesanded, mille põhjal projekteeritakse ning ehitatakse välja elektrivõrguga liituda soovinud elektrienergia tarbijate liitumispunktid. Magistritööks vajalikud materjalid saadi Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogust ning erinevatest andmebaasidest, mis Internetis leidub. Ühefaasiliste lühisvoolude analüüsimiseks vajalikud andmed saadi nii arvutuste teostamise kaudu eri meetoditel, mille teostas antud töö autor ning lisaks oli kasutada veel liitumispunktides mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude tulemused, mis pärinevad AS Connecto Eesti poolt. Magistritöö koostamisel olid oma nõuga abiks veel konsultantidena AS Connecto Eesti projekteerimise ja geodeesia osakonna projekteerija Lembit Saamel ning Tallinna Tehnikaülikoolist elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi kõrgepingevõrkude peaspetsialist Ülo Treufeldt ning teadur Victor Astapov. Lisaks soovin tänada veel teisigi isikuid, kes olid vajadusel nõu ja jõuga abiks.

Lühendite ja tähiste loetelu

LK – liitumiskilp

JK – jaotuskilp

ELV – Elektrilevi

1-f – ühefaasiline lühisvool

SZ – mastikaitselüliti

EC - Enefit Connect

HE – Harju Elekter

$I_k^{(1)}$ – ühefaasiline lühisvool, A

U_f – faasipinge, V

Z – liini näivtakistus, Ω

Z_f – faasisoone näivtakistus, Ω/km

Z_n – neutraaljuhi näivtakistus, Ω/km

l – liini pikkus, km

$\Delta U\%$ - pingekadu, %

ΔU – pingekadu, V

U – pinge, V

I – vool, A

$\cos\varphi$ - üheaegsustegur

ANSI – Ameerika Riiklik Standardite Instituut

IEC – Rahvusvaheline Elektrotehnika Komisjon

MP – madalpinge

D – *digit* (eesti k number)

SISSEJUHATUS

Eesti MP-võrgu iseloomustus

Elektriohutuse ning tuleohutuse nõuete tagamiseks on oluline, et madalpingefiidrite lühise korral oleks tagatud kaitseseadmete õigeaegne rakendumine. Teatud hulgal madalpingefiidritel ei ole tagatud piisavalt suur lühisvool, milleks on kolmekordne nimivool võrreldes fiidri nimivooluga. Sellest tulenevalt ei ole võimalik madalpinge fiidrite väljalülitamine kiire lühise korral. Antud probleem on esinenud elektrivõrkudes alates madalpinge võrgu ehitamise algusest saadik, mille järk-järguline lahendamine on aega ning ressursse nõudev protsess. Peamine põhjus selleks on liiga pikad madalpinge liinid, mis on suure takistusega. Teisalt muudab olukorda ohtlikumaks veel aspekt see, et hoonetest väljaspool olevas LK-s puudub kaitseseade. Seda tüüpi madalpingeliinid ning hoonete sisestused ehitati ligikaudu aastatel 1950-1990. [24]

Elektrilevi madalpingevõrgus on kokku 74023 madalpingefiidrit seisuga 01.10.2015, kuhu juurde on ühendatud 298118 liitumispunkti ja 625971 klienti. Sellest fiidreid, kus on mitterakenduva lühisvooluga kaitsmed, on 11405 ehk 15,4% koguarvust. Antud fiidrite kogupikkuseks on 11985 km, mis on umbes 30% fiidrite kogupikkusest. Selliste fiidrite külge on ühendatud 86148 liitumispunkti ning 200409 tarbijat, mis vastavalt on 28,9% ning 30,7% liitumispunktide ning tarbijate koguarvust. Mitterakenduva kaitseseadmetega fiidrite hulgas on pikki liine suurel hulgal. Fiidrid, mille liitumispunkt rohkem kui 2 km, on 359 ning fiidrid, mille liitumispunkt on rohkem kui 1 km, on 2816. [24]

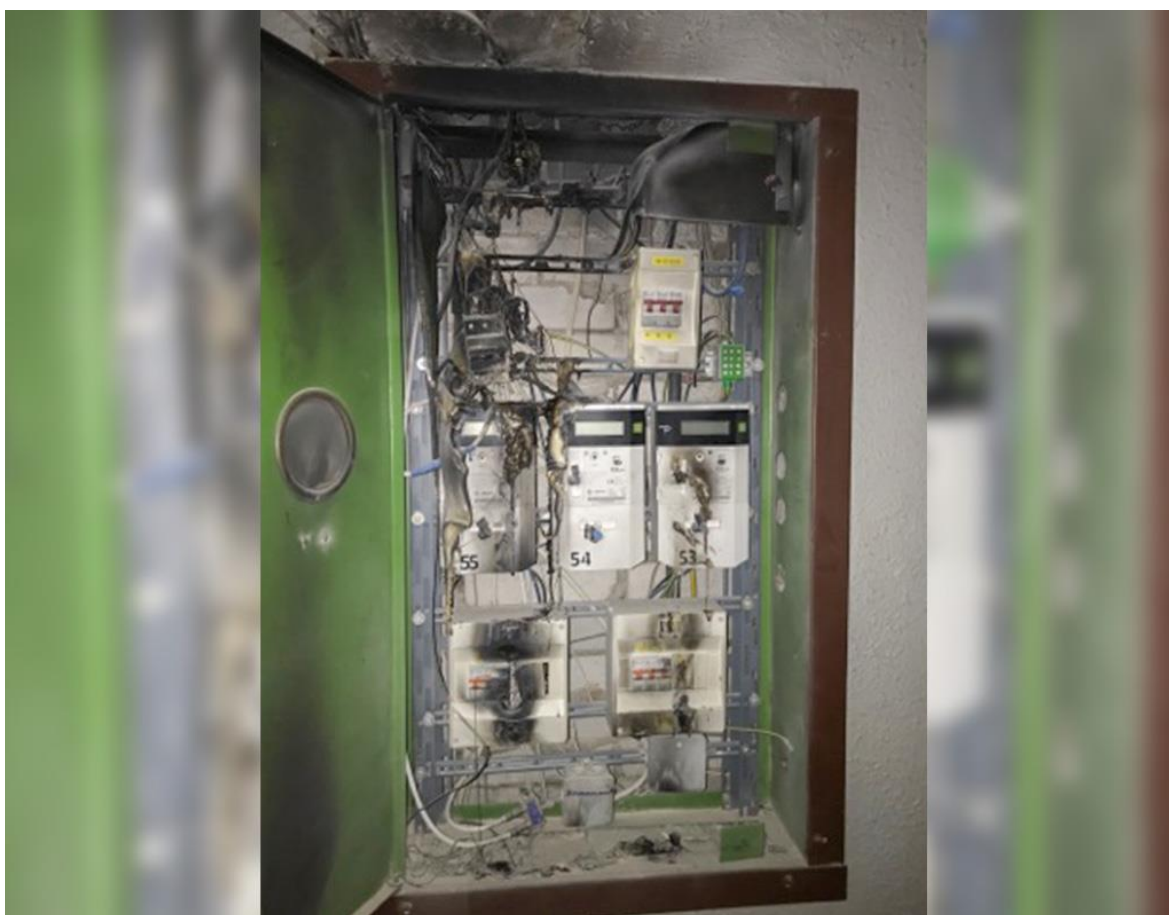
Probleemi kirjeldus

Eestis on endiselt väga palju väga pikki madalpinge liine, mistõttu lühisvool jääb suhteliselt väikeseks, mis omakorda viib selleni, et alajamas olev fiidri kaitse ei rakendu. Elektrilevi OÜ andmete kohaselt oli rikete arv kõikide madalpingefiidrite osas aastatel 2011-2014 vastavalt 25492, 21701, 20188 ning 15630 juhtu, millest lühised olid 18473, 14976, 14005 ja 10026 juhtu. Antud rikete kõrvaldamise maksumus antud ajaperioodil oli hinnanguliselt 400 eurot, kuhu juurde ei ole arvestatud käibemaksu. [24]

Fiidri riketega on omavahel seotud tihedalt seotud tuleõnnetused, mis on tingitud elektriseadmest või kaablist, mis lühise või liigkoormuse pole rakendunud või üldse puudus. Tuleõnnetuses perioodil 2010-2014 hukkus 295 inimest, millest 26 oli seotud

elektriga. Samal ajaperioodil toimus 230-320 elektrist põhjustatud tuleõnnetust aastas, kus rike oli põhiliselt tingitud rikkest elektriseadmetes või elektripaigaldistes. Tuleõnnetused eluhoonetes on enamasti tingitud läbiviigust, mis kulgeb hoonesse läbi seinu, juhe hakkab kuumenema ja läheb põlema, kuid hoonete tulekahjud võivad olla põhjustatud veel kaevetöödest. [24]

Lisaks tuleõnnetusele esines ka elektriõnnetusi, kuid need ei ole seotud fiidrite riketega. Elektriõnnetuse põhjuseks on peamiselt kaabli või elektriseadme pingestatud osa puudutamine või elektriseadme mittesihipärane või hoopis hooletu kasutamine. Antud tüüpi õnnetusi juhtus aastatel 2010-2014 kokku 213, mille käigus 10 inimest hukkus. Joonisel 1 on näitena välja toodud kortermajas paiknev elektrikilp, mis rikke tulemusel põlema läks. Põlengu põhjustas juhtmestikust olev rike, mis paiknes joonisel kajastatud kilbis. [24]



Joonis Elektririkkest põhjustatud liitumiskilbi põleng [22]

MP-võrguseadmete projekteerimine

Madalpingevõrgus elektripaigaldiste projekteerimisel üks olulisemaid aspekte on elektriohutus, millega alati tuleb arvestada. Sellest tulenevalt on elektrivõrkudes kasutusel mitmesuguseid kaitseseadmed, milleks on kaitselülitid, jadavinnakülitid koos sulavkaitsmetega, reguleeritava sättega kaitselülitid või mastikaitselülitid ehk SZ lülitid. Et antud kaitseseadmeid oleks võimalik korrektselt valida, on vaja eelnevalt teada ühefaasilise lühisvoolu orienteeruvat väärtust madalpingevõrgus. Selleks arvutatakse välja ühefaasilise lühisvoolu väärtused liitumispunktides ning vajadusel teistes elektrivõrgu punktides, kus on see vajalik. Täpne ühefaasiline lühisvool võimaldab valida korrektse suurusega kaitseseadme, mis kindlasti ühefaasilise lühise tekke korral lühisvoolule rakenduks.

Sellest tulenevalt otsustas antud magistritöö autor tegeleda lõputöö raames ühefaasiliste lühisvoolude analüüsimisega, mille käigus arvutatakse ühefaasilised lühisvoolud kahe erineva programmi abil, milleks on Simelect ning DIgSILENT. Lisaks teostatakse antud täpsed arvutused veel Microsoft Exceli kaasabil. Saadud tulemusi võrreldakse omavahel liitumispunktides mõõdetud ühefaasiliste lühisvooludega, mille tulemused on saadud pärast liitumispunkti välja ehitamist elektrienergia tarbija juures.

Antud magistritöö osutus valituks sellepärast, kuna lõputöö autor tegeleb igapäevaselt liitumiskilpide ehk liitumispunktide projekteerimisega madalpinge elektrivõrku. Sellest tulenevalt teostatakse samuti lühisvoolude arvutusi, mille abil saab hinnata, kas liitumiskilbis paiknev kaitseseade rakendub võimalikule lühisele, kas on vaja lisada täiendav kaitseseade liinilõiku seoses uue tarbija lisandumisega ning kas on vaja korrigeerida või välja vahetada olemasolevat kaitseseadet. Teisalt, miks antud magistritöö autor otsustas selle teema valida, on see, et antud teemal varasemalt lõputöid koostatud ei ole, vaid on kajastatud eri vaatepunktidest lühisvoolude olemust. Varasemates lõputöödes, kus on lühisvoolusid üldisemalt kirjeldatud, on vaatluse all olnud suuremahulised elektrivõrgu rekonstrueerimis tööd.

Magistritöö jaguneb mitmeks etapiks, kus esmalt tuuakse välja lühisvoolu iseloomustav tekst koos seda illustreeriva skeemiga. Edasi on ära kirjeldatud erinevate lühiste tüübid, millele on juurde lisatud illustreerivad skeemid. Lõputöö järgnevas osas on selgitatud lühisvoolude analüüsi eesmärki, lisaks on välja toodud kaitseseadmed, kuhu on juurde lisatud illustreerivad pildid. Peale selle on veel kirjeldatud TN-C juhistikku ja liitumiskilbi ehitust.

Ühefaasiliste lühisvoolude arvutamise osas on esmalt kategoriseeritud kujul välja toodud elektrivõrguga liitujad koos kaitseseadmete ning kaablitega koos margi ning

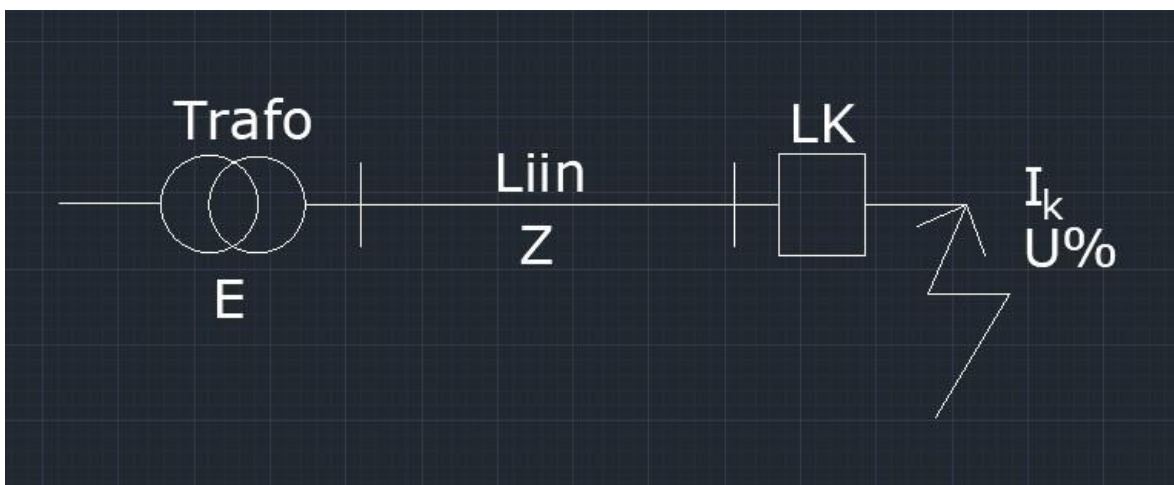
kaabli pikkusega. Lisaks on kajastatud 10/0,4 kV alajaamas paikenvat trafot koos võimsuse ning lülitusgrupiga. Seejärel on teostatud ühefaasiliste lühisvoolude arvutused Simelect tarkvaraga, mille järel on välja toodud liitumispunktis AS Connecto Eesti ehitajate poolt mõõdetud ühefaasilised lühisvoolud. Peale seda on teostatud omavaheline ühefaasiliste lühisvoolude võrdlus. Järgnevalt on teostatud ühefaasiliste lühisvoolude täpsed arvutused Microsoft Excel tarkvara kaasabil, mille järel on samuti teostatud ühefaasiliste lühisvoolude võrdlus. Magistritöö lõpus on teostatud ühefaasiliste lühisvoolude arvutused veel DIgSILENT tarkavara kasutades ning on teostatud saadud tulemuste omavaheline analüüs koos liitumispunktis mõõdetud tulemustega. Lisaks on tehtud kokkuvõtlik tulemuste analüüs saadud andmete põhjal.

1 ÜLEVAADE LÜHISTEST MADALPINGEVÕRGUS

1.1 Lühisvoolu iseloomustus

Lühis on ebanormaalne ühendus vooluahelas, mille puhul ahelas olev takistus on väga väike. Enamasti on lühis juhuslik, kuid teatud juhtudel võib lühis olla ettekatsetatud, milleks võib olla õhuliinidelt jäite sulatamine, kontrollmõõtmised ning katsetused. Lühisest tulenevalt väheneb elektri ahelas järsult üldine takistus, millest tulenevalt voolu suurus ohtlikult suureneb ning pinge märgatavalt langeb. Kõige suurem on voolu ning pinge muutus lühisekoha juures. Lühisest tingitud pinge alanemisest on suurel määral häiritud tarbijad. Lühis põhjustab toitekatkestuse tarbijatel, mis on ära lõigatud toiteallikatest, muudel juhtudel tekib pingelohk. Lisaks tekitab lühisest tingitud suur vool elektrijuhtide liigset kuumenemist ning põhjustab mehaanilisi jõudusid juhtidele, mis on ohtlikud. Liigkuumenemine põhjustab isolatsiooni riknemist, alandab mehaanilist vastupidavust ning tõstab seadmete süttimise ohtu. Elektromehaanilised jõud, mis on tingitud lühisvooludest, võivad seadme purustada.

[1]



Joonis 1.1 Ühefaasilise lühise skeem

Joonisel 1.1 on kujutatud olukorda, kus lühise toimumise korral väheneb toiteallika elektromotoorjõud E ning nullpotentsiaali punkti normaalne takistus Z , mis koosneb võrgutakistusest ja koormustakistusest, lühistakistuseks Z_k . Seoses sellega, et $Z_k \ll Z$, tekib elektrivõrgus elektromotoorjõu korral E , mis on muutumatu, voolust I suurem lühisvool I_k . Lisaks on joonisel kajastatud tähist LK, mille all mõeldakse liitumiskilpi, mis tähistab punkti, kus ühefaasiline lühisvool välja arvutatakse. Antud olukorras võib lühisvool olla võrdne elektromotoorjõuga, lühistakistus on võrdne või suurem elektromotoorjõust ning elektrivõrgu normaalne takistus on võrdne elektrivõrgu

normaalsest voolust. Lühisvool võib olla võrreldes tavavooluga kümneid kordi suurem, mis sõltub lühise asukohast ning selle liigist. [1]

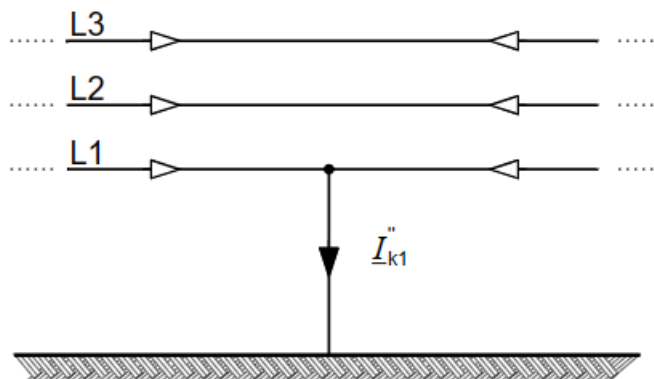
Lühisvool sõltub lühisekohas olevast üleminekutakistusest ehk rikketakistusest, mille väärtus võib ulatuda kuni lõpmatuseni. Kui rikketakistus on lõpmata suur, siis antud olukorras lühisvool puudub. Tüüpiline lühis, mille rikketakistus on nullist suurem, on kaarlühis, kus lühistakistusele lisandub juurde elektrikaare takistus. Seevastu olematu takistusega lühist nimetatakse jääklühiseks. Sellest tulenevalt põhjustab jääklühis suurema ning ohtlikuma lühisvoolu võrreldes kaarlühisega. [1]

Lühised liigituvad lähtuvalt faaside arvust ning maa osalusest kolmefaasiliseks lühiseks, kahefaasiliseks lühiseks, ühefaasiliseks lühiseks ning kahefaasiliseks maalühiseks. Kolmefaasilise lühise korral on lühise toimumise kohas faaside tingimused ühesugused, millest tulenevalt süsteem on sümmeetriline. Sümmeetrilise süsteemi korral võib lühisepunktis tekkida nullpotentsiaal samuti ilma maaühenduseta, mistõttu ei ole maa ühenduse olemasolu või selle puudumine lühise toimumise korral oluline. Ülejäänud lühised seevastu on asümmeetrilised. [1]

Ühefaasiline lühis saab toimuda vaid maalühisena. Isoleeritud ning resonantsmaandatud neutraaliga võrkudes esinevat ühefaasilist lühist nimetatakse maaühendusvooluks. Maaühendusvool sulgub läbi liinide ning maa vahel oleva mahtuvusjuhtivuse. Maaühendusvoolu korral on peamiseks ohuks pingete suurenemine faasides, mis ei ole vigastatud, teisalt kujutavad ohtu transient liigpinged, mida põhjustab vilkuv elektrikaar. [1]

1.2 Lühiste tüübid

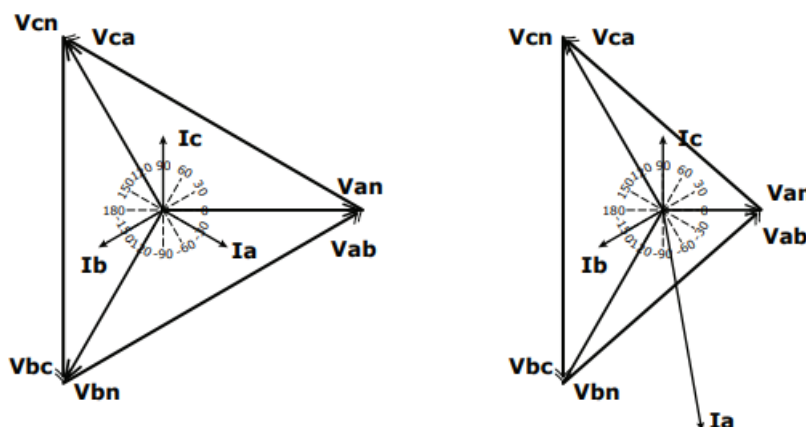
1.2.1 Faasi ja maa vaheline lühis



Joonis 1.2 Faasi ja neutraali vahelise lühise skeem [18]

Joonisel 1.2 on kujutatud faasi ja maa vahelist lühist, mille on põhjustanud olukord, kui üks faasidest on ühenduses maandusega või neutraaliga, mis omakorda on väikese takistusega. Rikkevoolu suurus lühise korral sõltub impedantsist ning lühise asukohast ehk mida lähedamal on lühise korral aset leidev rike, seda suurem on rikkevool. [5]

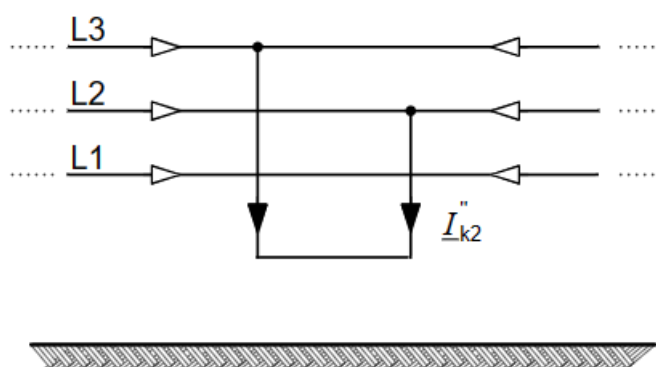
Joonisel 1.2 on välja toodud olukord, mis kirjeldab faasi ja maa vahelist lühist, leiab aset L1 ja maa vahel. Sellest tulenevalt lühis avaldab mõju ainult L1 pingele ning voolule, seevastu L2 ning L3 voolud on sarnased võrreldes lühisele eelneva olukorraga. L1 vool suureneb ning sellele lisaks jääb L1 vool maha pingest umbes 60° kuni 90° . Sarnaselt olukorraga, kus L2 ning L3 voolud ei muutunud seoses lühisega L1 ning maa vahel, ei mõjuta lühis pinget. Seoses sellega ei muutu pinge väärtus ning nurk ehk säilib lühisele eelnenud seisund. [5]



Joonis 1.3 Faasi ja maa vahelise lühise vektordiagrammid enne ja pärast lühist [5]

Joonisel 1.3 on välja toodud vektordiagrammid lühisele eelnenud ajahetkele ning lühisele järgnenud ajahetkele, mis vastavalt asuvad vasakul ning paremal. Lühisele eelneval ajal on faaside vahe 120° . Lühisest tingituna alaneb faasipinge, seevastu pingenuurk jääb samaks võrreldes rikkele eelnenud olukorrale. Faasis, kus on toimunud lühis, kasvab voolu suurus märgatavalt, lühisest puutumata faasides muutusi ei toimu. Kuna joonise 1.3 vektordiagrammid pärinevad Ameerika käsiraamatust, pärinevad pinge tähised ANSI süsteemist ehk pinge on tähistud V tähega, seevastu IEC süsteemis on pinge tähiseks U. Sarnaselt on pinge tähiseid kujutatud V tähega veel joonistel 1.5, 1.7 ja 1.9.

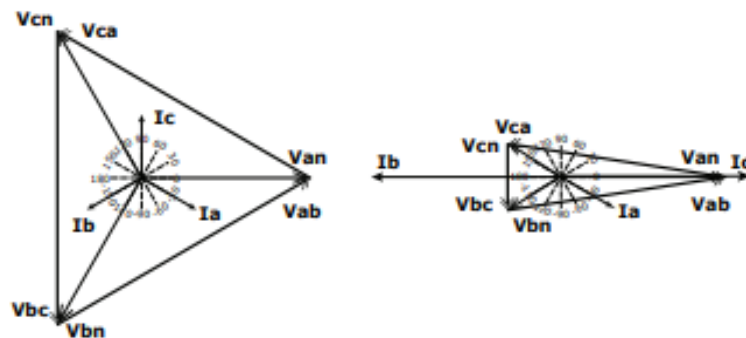
1.2.2 Faaside vaheline lühis



Joonis 1.4 Faaside vahelise lühise skeem [18]

Joonisel 1.4 on kujutatud faasidevahelise lühise skeemi, mis antud skeemil toimub L2 ja L3 vahel. Faasidevahelisi lühiseid iseloomustab madala impedantsi olemasolu, mis on peamine põhjus antud lühise tüübile. Sarnaselt faasi ja maa vahelisele lühisele sõltub rikkevoolu suurus impedantsist ning lühise asukohast. Lisaks sõltub rikkevool veel elektrisüsteemi tugevusest. Samuti saab tuua välja selle, et mida lähedamal on lühise koht toiteallikale, seda suurem on rikkevool. [5]

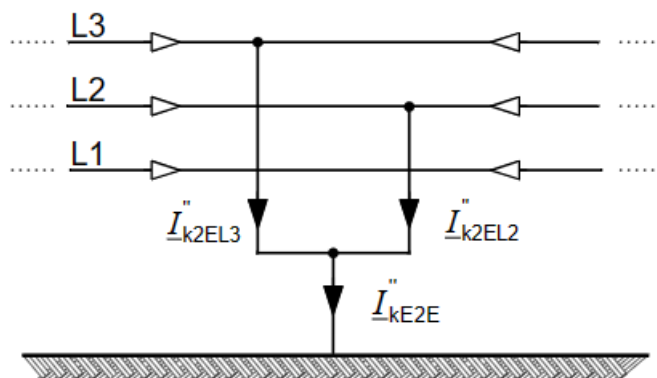
Joonisel 1.4 kirjeldatakse faasidevahelist lühist L2 ja L3 faasi vahel, kus alates toiteallikast kulgeb vool läbi rikkekoha tagasi toiteallikasse. Kuna antud lühise puhul on tegemist vooluringiga, on L1 ja L3 faasi voolud ühesugused, kuid erinevate polaarsustega. Faasidevahelise lühise korral on rikke mõju rikkepingele veelgi keerukam. Lühisest tingitud rikkepinged on omavahel võrdsed, mis on põhjustatud sellest, et impedants rikke korral toiteallika ning iga faasi vahel on võrdne. Teisalt saab tuua välja lühise korral esineva pingekao, mis tekib toiteallika läheduse tõttu, ehk mida lähemal asub toiteallikas rikkekohale, seda suurem on pingekadu. [5]



Joonis 1.5 Faasidevahelise lühise vektordiagrammid enne ja pärast lühist [5]

Joonisel 1.5 on kujutatud vektordiagramme lühisele eelnenud ajahetkele ning lühisele järgnenud ajale. Sarnaselt faasi ja maa vahelisele lühisele eelnevatel ajahetkedel, on enne faasidevahelise lühise toimumist faaside vahe 120° . Peale lühise toimumist on mõjutatud faaside pingete suurused väiksemad, kuid pingete suunad on jäävad samaks. Lisaks on faaside omavahelin kaugus teineteisest väiksem kui 120° . Faasipinge, mida lühis ei mõjutanud, säilitab rikkele eelnenud olukorra. Lühisest mõjutatud faasi voolude väärtused suurenevad, kuid polaarsused teineteise suhtes on erinevad, seevastu lühisest mõjutamata jäänud faas säilitab lühisele eelnenud olukorra. [5]

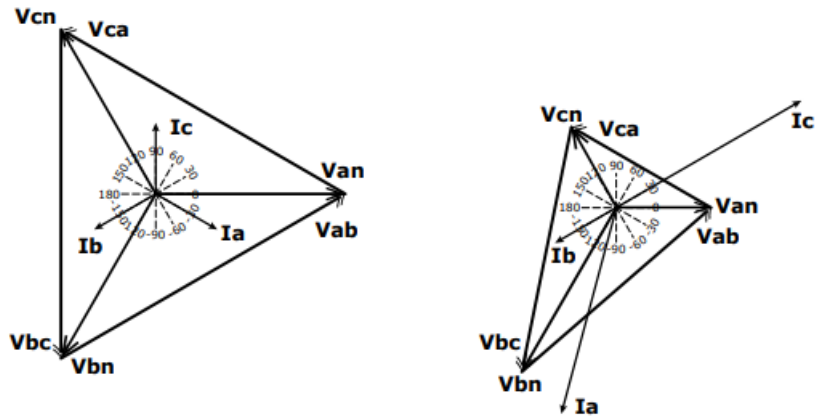
1.2.3 Kahe faasi ja maa vaheline lühis



Joonis 1.6 Kahe faasi ja maa vahelise lühise skeem [18]

Joonisel 1.6 on kujutatud kahe faasi ja maa vahelist lühist, mis antud juhul toimub L2 faasi ja L3 faasi ning maa vahel. Sarnaselt eelnevatele lühisetele esineb kahe faasi ja maa vaheline lühis, kui kaks faasi on ühendatud maaga või neutraaliga väikese impedantsi korral. Kahe faasi ja maa vahel toimuvad lühised on oma olemuselt

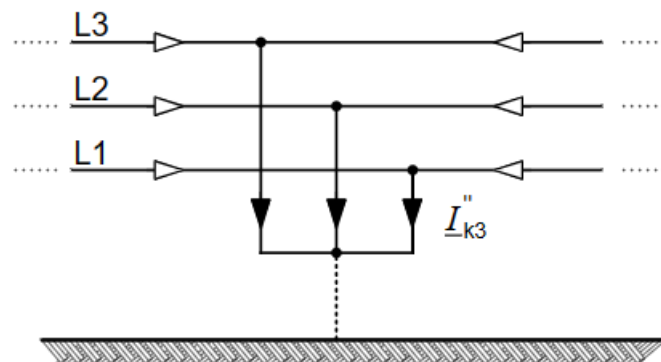
suhteliselt keerukad, millest tulenevalt on ilma modelleerimis tarkvara lühisest tingitud võimalikke vigu keeruline ette ennustada. [5]



Joonis 1.7 Kahe faasi ja maa vahelise lühise vektordiagrammid enne ja pärast lühist [6]

Joonisel 1.7 on kirjeldatud sarnaselt eelnevatele lühiste tüüpidele vektordiagramme enne lühise toimumist ning pärast lühist. Sarnaselt faaside vahelisele lühisele ning faasi ja maa vahelisele lühisele on enne kahe faasi ja maa vahelise lühise toimumist faasipingete ning voolude vahelised kaugused üksteisest 120° ehk on sümmeetrilised teineteise suhtes. Peale lühise toimumist suurenevad lühisest mõjutatud faaside voolud. Lühisest mõjutamata jäänud faasis kulgev vool säilitab oma esialgsed parameetrid. [5]

1.2.4 Kolmefaasiline lühis

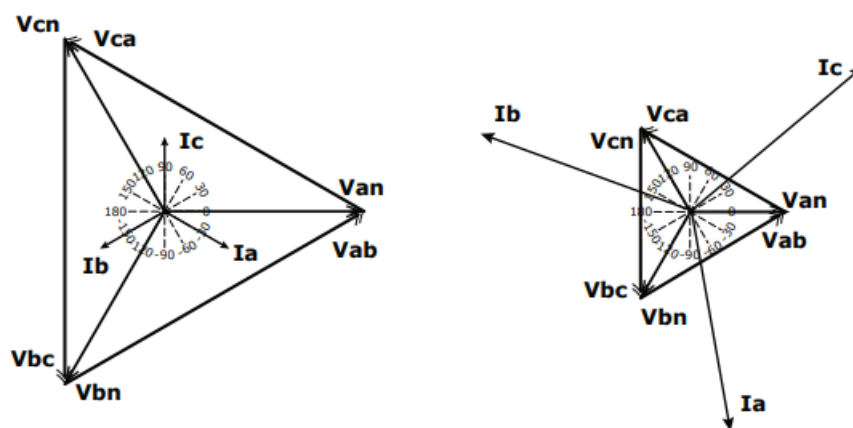


Joonis 1.8 Kolmefaasilise lühise skeem [18]

Joonisel 1.8 on kujutatud kolmefaasilist lühist, kus lühis toimub skeemil kõikide faaside vahel. Kolmefaasilise lühise tulemusel vool suureneb kõigis kolmes faasis

samas suurusjärgus. Sarnaselt eelnevatele lühise tüüpidele sõltub rikkevoolu suurus impedantsist, rikke asukohast ning elektrisüsteemi tugevusest. Lisaks saab kolmefaasilise lühise korral välja tuua veel selle, et mida lähemal on lühis toiteallikale, seda suurem lühisest tingitud rikkevool võrreldes sellega, kui lühise asukoht oleks kaugemal. [5]

Pingekadu kolmes faasis on ühesugune, kuna see sõltub sarnaselt rikkevoolule impedantsist ning lühise toimumise asukohast. Seevastu, kui kolmefaasilise lühise korral on kasutusel kaitsemaandus, ei ole pingekadu nii suur kui isoleeritud süsteemis. [5]



Joonis 1.9 Kolmefaasilise lühise vektordiagrammid enne ja pärast lühist

Joonisel 1.9 on kujutatud vektordiagramme enne ja pärast kolmefaasilise lühise toimumist. Enne lühise toimumist on faaside vahelised kaugused 120° ehk faasid asetsevad teineteise suhte sümmeetriliselt. Peale lühise toimumist on faasipinged vähendatud väärtusega kuid faasipingete ja faasidevaheliste pingete suunad on identsed. Faasi voolud peale kolmefaasilist lühist suurenevad olulisel määral ning faasi voolude omavahelised kaugused teineteise suhtes on 120° . Faaside voolud seevastu jäävad faasipingetest maha 60° - 90° . [5]

1.2.5 Lühis keskpinge võrgus

Keskpinge võrgus saab kolmefaasilisel süsteemil neutraali maast isoleerida, jäikmaandada või maandada kaarekustutuspooli kaudu. Sellest tulenevalt sõltub võrgu rikketalitluse iseloom ning isolatsioonile mõjuvad pinged. Isoleeritud neutraaliga elektrivõrgul on ainukeseks maaga ühendavaks elemendiks trafomähise ning maa suhtes olev ülekandeliinide faaside mahtuvus ning isolatsiooni juhtivus. Mahtvuslikud voolud, mis võivad teine teisest erineda, võib faasi pinged maa suhtes vähesel määral

olla ebasümmeetrilised. Sellest sõltumata on faaside vahelised pinged samad ning seetõttu tarbijad neutraali nihet ei tunne. [25]

1.3 Peatüki kokkuvõte

Selles peatükis toodi esmalt välja lühisvoolu olemus, kus kirjeldati ära lühise tekkimine koos seda iseloomustava joonisega. Peale seda kajastati eraldi veel erinevaid lühise tüüpe, milleks on faasi ja maa vaheline lühis, faasidevaheline lühis, kahe faasi ja maa vaheline lühis ning kolmefaasiline lühis. Lisaks toodi iga lühise tüübi juures välja lühist iseloomustavad skeemid ning vektordiagrammid.

2 LÜHISVOOLUDE ANALÜÜS LIITUMISPUNKTIS

2.1 Lühisvoolude analüüs

Antud magistritöö eesmärk on võrrelda ning analüüsida omavahel ühefaasilisi lühisvoolusid, mis on välja arvatud tarkvara Simelect kasutades, DIgSILENT programmi kaasabil ning täpsed arvutused Microsoft Exceli abil ning mis on mõõdetud LK-de AS Connecto Eesti ehitajate poolt. Töö eesmärgiks on teada saada, kas ja kui palju erinevad teineteisest eelnevalt nimetatud programmide ning ehitajate poolt mõõdetud lühisvoolud ehk millise programmiga saab kõige täpsemalt ühefaasilised lühisvoolud välja arvutada võrreldes liitumispunkti mõõtetulemustega. [2]

Liitumispunktide juures on vaatluse all ühefaasiline lühisvool, sest antud tüüpi lühisvool on minimaalse väärtusega, kuna selle põhjal toimub kaitseseadmete valik JK-sse, alajaamadesse ja mastidele mastilülitite näol ning kontrollitakse veel, kas liitumiskilbis olev peakaitse samuti on võimeline rakenduma võimalikule lühisele. Lisaks korrigeeritakse välja arvatud lühisvoolude põhjal kaitseseadmete sätteid või hoopis vajadusel asendatakse uutega.

2.2 Kaitseseadmete valik

KP ja MP alajaamadesse paigaldatud madalpingefiidri kaitseaparaadid, seksioneerivad kaitseaparaadid fiidritel ning kaitseaparaadid, mis on kasutusel liitumispunktides, peavad võimaliku rikke puhul tagama automaatse väljalülitamise lähtuvalt elektrivõrgu väljaehitamise ajast. Varem väljaehitatud võrgu, mille all on mõeldud elektrivõrku ning mis on projekteeritud ja väljaehitatud enne 01.07.1996 kuupäeva, korral peab kaitseaparaadid rakenduma vastavalt 3-kordse võrgu nõuete järgi, seevastu tänapäeval väljaehitatud võrgu korral, mis on projekteeritud ja väljaehitatud peale 01.07.1996 kuupäeva, peavad kaitseseadmed rakenduma rikkele 5s võrgu nõuete järgi. [3]



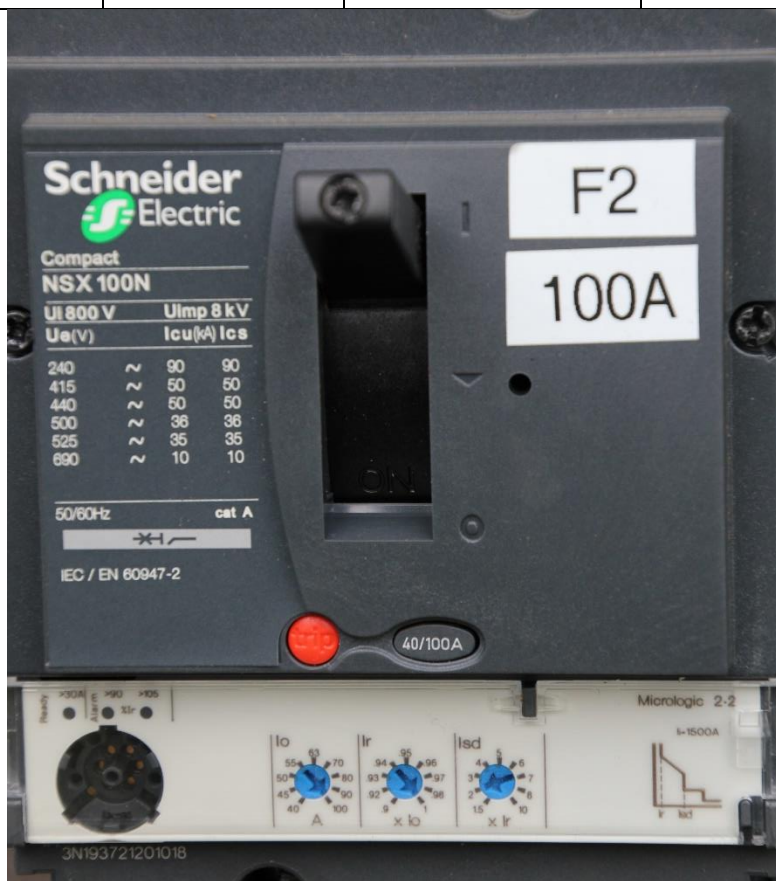
Joonis 2.1 Sularitega jadavinnaklüliti

Joonisel 2.1 on kujutatud sularitega jadavinnaklüliteid, mis on paigaldatud jaotuskilpi. Joonisel olevas jaotuskilbis on kasutusel APATORi poolt toodetud jadavinnaklülid, kus kõige vasakpoolsem on ARS 400 tüüpi jadavinnaklüliti ning kaks teist on ARS 00/100 tüüpi jadavinnaklüliti. Kõige vasakpoolsemat jadavinnaklülid, mis joonisel 2.1 on näidatud, kasutatakse maakaablite ühendamiseks, mille ristlõiked algavad alates 120 mm², madalpinge seadmetesse, milleks võivad olla pildil kujutatud jaotuskilp kui ka 10/0,4 kV alajaam, kus kaablid ühendatakse madalpinge poolele. Kahe väiksema jadavinnaklüliti abil, mis pildil kujutatud on, ühendatakse samuti maakaableid madalpinge seadmetesse. Antud jadavinnaklülid on kasutusel kaablite korral, mille ristlõige jääb alla 120 mm². Jadavinnaklülitel, mis joonisel on kujutatud, on pesad, kuhu saab paigaldada kas sulavkaitsmed või lühisnoad. Sulavkaitsmed ning lühisnoad tuleb valida selliseid, mis on ELV poolt heakskiidetud. [16]

Alajaamades fiidrikaitseseadmetena ning seksioneeritavate kaitseaparaatidena fiidritel tuleks reeglina kasutada sulavkaitsmeid, mis vastavad standardites EVS-EN 60269-1

ja EVS-EN 60269-2 kirjeldatud nõuetele. Samuti võib teatud juhtudel kasutada reguleeritava sättega kaitselüliteid, mis vastavad standardile EVS-EN60947-2. Antud kaitselülid rakenduvad kiiresti ka väikestele lühisvooludele. [3] Seoses sellega, et alajaamades on fiidrikaitsena põhiliselt kasutusel gG-tüüpi sulavkaitsmed, on alljärgnevas tabelis toodud välja seda tüüpi kaitsmete parameetrid.

Nimivool, A	Lahutusaeg, h	Taluvus väärtus, A	Lahutus väärtus, A
$I_n < 4$	1 h	$1,5 I_n$	$2,1 I_n$
$4 < I_n < 16$	1 h	$1,5 I_n$	$1,9 I_n$
$16 < I_n < 63$	1 h	$1,25 I_n$	$1,6 I_n$
$63 < I_n < 160$	2 h	$1,25 I_n$	$1,6 I_n$
$160 < I_n < 400$	3 h	$1,25 I_n$	$1,6 I_n$
$400 < I_n$	4 h	$1,25 I_n$	$1,6 I_n$



Joonis 2.2 Reguleeritava sättega kaitselüliti

Joonisel 2.2 on kujutatud Schneider Electricu poolt toodetud reguleeritavat kaitselüliti. Sellised reguleeritavad kaitselülid on kasutusel alajaama madalpinge fiidrikaitseseadmena lisaks joonisel 2.1 kujutatud jadavinnaklülitele. Teatud olukordades on selliseid kaitselülid kasutusel ka jaotuskilpides, kuna gG/gL tüüpi sularite lühisvoolud ei pruugi tagada vajalikku kaitset lühise eest, seevastu kaitselüliti sätete reguleerimise abil on võimalik tagada kaitse lühiste eest ka keerukamates

olukordades. Joonisel kujutatud kaitselüliti sätete reguleerimine käib kolme pööratava ketta abil, mille tulemusel pannakse paika I_0 , ehk kui suurt koormusvoolu kaitselüliti läbi lasta tohib, milleks antud juhul on 100 A, I_R , millega määratakse ära I_0 täpsus mis konkreetse lüliti korral jääb 100 A peale ning lühisvoolule rakendumine I_{sd} , mis antud sätete korral on 200 A.

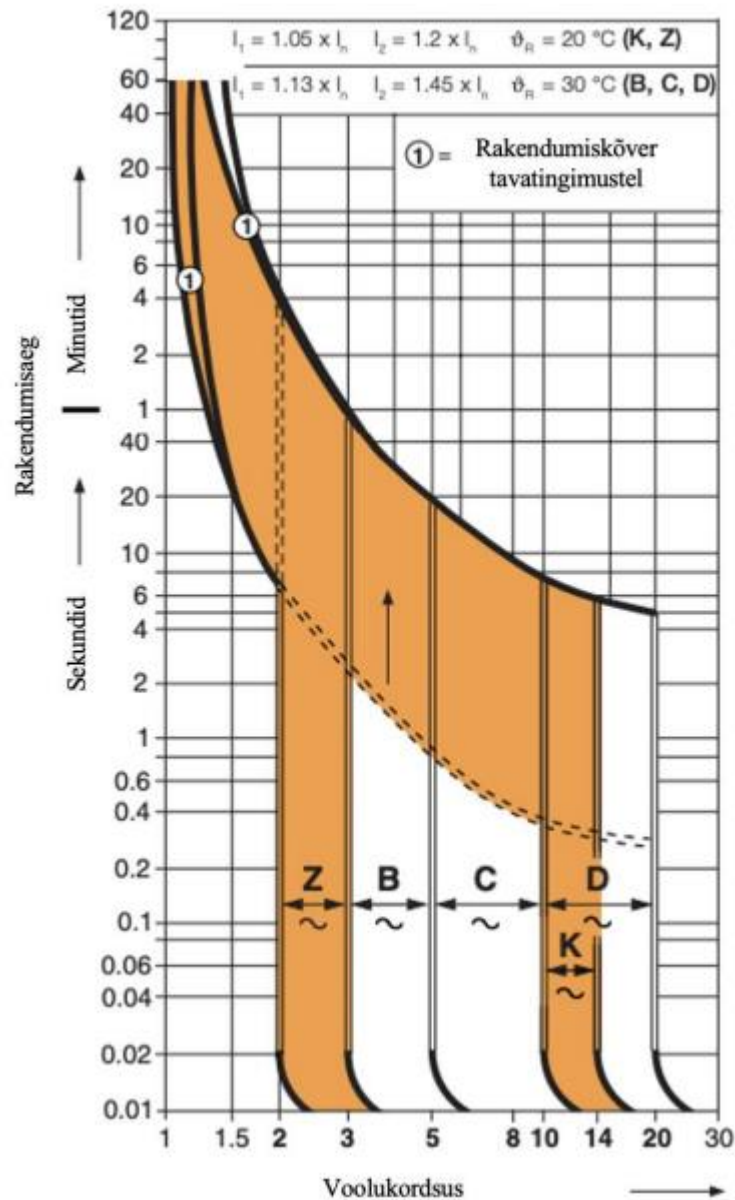
Liitumiskilpides tuleb kasutada peakaitsemena C-tüüpi kaitselüliteid, mis omavad ELV ja EC poolset heakskiitu ning mis vastavad standardile EVS-EN60898-1. Teatud olukordades võib kasutada ka B-tüüpi kaitselüliteid, kui selleks tekib vajadus, kuid sellest tulenevalt tuleb klienti antud olukorrast teavitada, kes liitub elektrivõruga. [3]



Joonis 2.3 Liitumiskilbi peakaitse koos arvesti ning pealülitiga

Joonisel 2.3 on kujutatud liitumiskilbis asetsevat peakaitseülilitit koos arvesti ning pöördülilitiga. Konkreetse kilbis on kasutusel ABB poolt toodetud 3xC25 tüüpi, mis rakendub lühisvoolule 250 A. Enne kaitselüliti on liitumiskilpi paigaldatud veel pealüliti ehk impulsstaluvusega pöördüliti, mis on mõeldud töökindlaks lahutamiseks toiteallikast. Pöördüliti valik toimub tarbijate arvu järgi liitumiskilbis, mis ühekohalise kilbi korral on 63 A, kahekohalise kilbi kasutamise puhul 100 A ning 160 A pealüliti võetakse kasutusel lähtuvalt arvestite arvust. [7]

Kaitseademetele selektiivsus on tagatud jadaühenduses olevate sulavkaitsmete puhul, kui kehtib nimivoolude suhe $\geq 1,6$. Kaitseülite kasutamise korral, mis on jadamisi ühendatud, on selektiivsus tagatud, kui nimivoolude suhe on ≥ 2 . Olukorras, kus kasutatakse B-tüüpi kaitseüliteid, on selektiivsus tagatud, kui nimivoolude suhe on $\geq 1,6$. [3]



Joonis 2.4 Kaitseülite rakendumise tunnusjooned [26]

Joonisel 2.4 on kajastatud kaitseülite rakendumise tunnusjooned, kus on näha, kui suurele lühisvoolule on kaitseüliteid võimelised rakenduma võrreldes kaitseadme enda nimivooluga. Joonisel on välja toodud Z, B, C, K ning D-karakteristikuga kaitseüliteid, kuid kuna liitumiskilpides kasutatakse põhiliselt C-karakteristikuga ning

vajadusel B-karakteristikuga kaitselüliteid, siis ülejäänud kaitseseadmeid edaspidi antud töös ei kajastata. Jooniselt kajastub, et B-karakteristikuga kaitselülite voolukordsus jääb vahemikku 3-5 korda võrreldes kaitselüliti enda nimivooluga ning C-karakteristikuga kaitselüliti puhul on see vastavalt 5-10 korda võrreldes kaitselüliti enda nimivooluga. [26]

Tehnilis-majanduslikel põhjustatud situatsioonides võib selektiivsuse tagamiseks kasutada kaitseseadmete puhul nimivoolude suhet $\geq 1,6$, millega on tagatud osaline selektiivsus. Eri olukordades võib kasutada kaitseseadmeid, mille nimivoolud erinevad teineteisest ühe astme võrra. Selektiivsuse tõhususe tõstmiseks võib veel toite poole peal kasutada kaitselüliteid, millel on sätete reguleerimise võimalus. [3]

2.3 LK kirjeldus



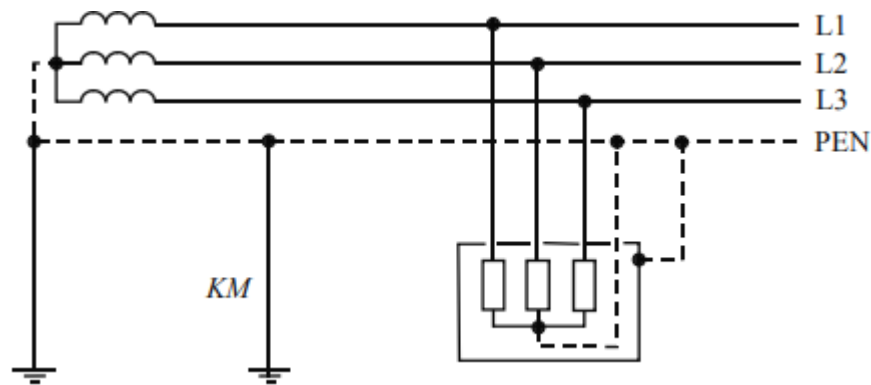
Joonis 2.5 Ühekohaline liitumiskilp

Joonisel 2.5 on kujutatud Harju Elektri ehk HE poolt toodetud ühekohalist liitumiskilpi, mida põhiliselt paigaldatakse kinnistutele, kes on teinud liitumistaotluse elektrivõrguga liitumiseks. Liitumiskilp on valmistatud teraslehtedest, mille paksus on 2 mm ning mis on eelnevalt kuumtsingitud. Liitumiskilp on värvitud RAL 7032 ehk ränihalli pulbervärviga. Joonisel kujutatud liitumiskilbi küljes olevat ust on võimalik kilbi küljest eemaldada. [4]

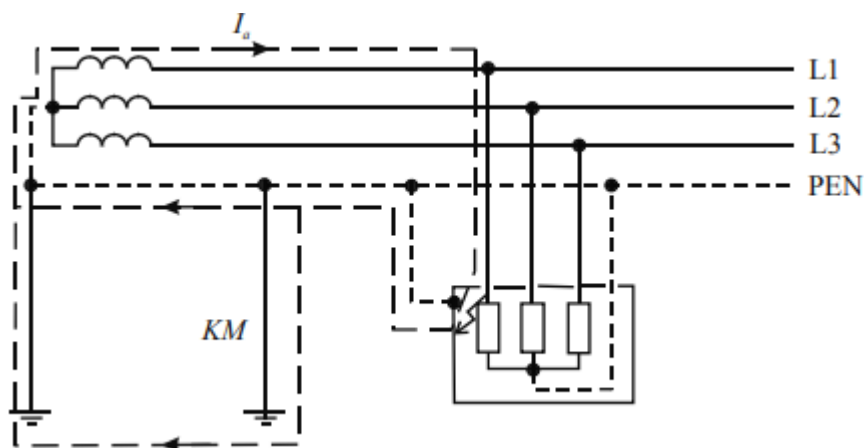
Elektriseadmed, mis on mõeldud liitumiskilpi paigaldamiseks, kinnitatakse kilbis olevatele lattidele või montaažiplaadile. Seadmete kaitsmiseks sademete eest on kilpidel ülekattega katus. Samuti on topelplaega piiratud kondensaadvee kogunemine. Liitumiskilbi kaitseaste koos suletud uksega on IP 34D, seevastu ilma ukseta IP20. Juhistikuna on kasutusel TN-C juhistik ning kilbi nimitalitluspingeks on 230/400 V. [4]

Standardne liitumiskilp sisaldab pealüliti, montaažiplaati koos arvestimutritega, juhtmestikku, mis on markeeritud ja hülsistatud, plastikust puutekaitset, mida on võimalik plommida, sisendklemme ning väljundklemme ja liitumiskilbi võtit. Standard toote puhul ei ole liitumiskilp komplekteeritud arvestiga, tariifjuhtimiskellaga ning peakaitsemega. [4]

2.4 TN-C juhistiküsteem



Joonis 2.6 TN-C juhistiküsteem [1]



Joonis 2.7 Ühefaasiline lühis TN-C juhistiküsteemis [1]

Joonisel 2.6 on kujutatud TN-C juhistiküsteemi, mis on kasutusel Eesti madalpinge süsteemis, mis kulgeb alates alajaamast kuni tarbija kinnistul paiknevasse

liitumiskilpi. TN-C juhistikus kasutusel olev neutraaljuht on kasutusel nii talitlusmaandusena kui ka kaitsemaandusena. Sellest tulenevalt nimetatakse sellist neutraaljuhti PEN-juhiks. Joonisel 2.7 on seevastu kujutatud ühefaasilist lühist ehk kereühendust TN-C juhistiküsteemis, kus ühefaasiline lühis kulgeb alates faasijuhist läbi suure takisti ning PEN-juhi. Ühefaasilise lühise tõttu toimub liigvoolukaitse rakendumise. Kuni kaitseseade ei ole rakendunud, on elektriseadme kere ning maa vaheline pinge võrdne, mis on tingitud lühisvoolu tulemusel tekkinud pingekaoga PEN-juhisis. [1]

TN-C juhistiku maanduse poolt, mida sisuliselt võib nimetada talitlusmaanduseks, peab olema tagatud võimalikult väike puutepinge, mis ei tohi olla üle 50 V. Sellest tulenevalt on oluline, et maandustakistuse suurus oleks mõni oom. Lisaks sellele välditakse liigpingete tekkeid, mis on ohtlikud elektriseadmetele. [1]

2.5 Elektriliitumistega seotud tehnilised parameetrid

2.5.1 Elektrivõrguga liitumised 6 – 16 A

Trafo võimsus, kVA	Fiidri- kaitse, A	Kaabli mark ja pikkus, m	JK kaitse, A	SZ- lüliti, A	LK pea- kaitse, A	Tarbija
50 Yzn	63/160	AXPK 4G120, 52 m AXPK 4G25, 58 m	40/160	-	3xC6	1
250 Yyn	250	AXPK 4G95, 173 m AXPK 4G120/4G120, 7/75 m AXPK 4G50, 48 m	160/160 80/160	-	3xC50A	2
250 Yyn	250	AXPK 4G95, 173 m AXPK 4G120, 95 m	80/160	-	3xC50A	3
100 Yzn	25/160	AXPK 4G120, 178 m	-	-	3xC16A	4
50 Yzn	20/400	AXPK 4G120, 27 m	-	-	3xC10A	5
50 Yzn	63/400	AXPK 4G120, 167 m AXPK 4G50, 19 m	25/160	-	3xC10A	6
400 Dyn	160/400	AXPK 4G120, 49 m AVVG 4G120, 61 m AXMK 4G120, 21 m AVVG 4G120, 20 m AXPK 4G120, 23 m AMKA 3X70+95, 220 m AXPK 4G50, 130 m AXPK 4G120, 162 m AXPK 4G120, 46 m	100/400	63/160	3xC16A	7
30 Yzn	40/160	AXMK 4G50, 103 m AXPK 4G50, 68 m	-	-	3xC16A	8
100 Yyn	50	AMKA 3X70+95, 267 m	-	-	3xC16A	9
250	50/160	AXPK 4G50, 54 m	32/160	-	3xC10A	10

Yyn		AXPK/AXMK 4G50, 184 m AXPK 4G50, 143 m				
500 Dyn	40	AXPK 4G120, 50 m	-	-	3xC16A	11

Tabel 2.1 Madalpingevõrgu seadmete andmed 6 – 16 A liitumiste korral

Tabelis 2.1 on välja toodud madalpingevõrguga seonduvad elektriseadmed, kus tarbijad on liitunud elektrivõrguga vahemikus 6 – 16 A, mis on seotud lühisvoolu arvutamise ja vaatluse all olevad tarbijad asuvad kõik eri piirkondades ehk ei ole üksteisega seotud. Sellest tulenevalt iga tarbija ühendatud erineva 10/0,4 kV alajaama külge, mis omakorda on ühendatud juba piirkonna alajaamade külge. Sarnaselt on tarbijad vahemikus 20-25 A ning 32-160 A, kes on avaldanud soovi liituda madalpinge elektrivõrguga, ühendatud erinevate 10/0,4 kV alajaamade külge ehk eraldi seda aspekti järgnevate tarbijate tabelite juures ei kajastata. Tabelis on nimetatud trafo võimsus ning trafo lülitusgrupp, alajaamast väljuva kaabelliini fiidrikaitse, alajaamast kuni liitumiskilbini kulgevad madalpingekaablid, jaotuskilpide kaitseadmed ning liitumiskilpide peakaitsemed. Lisaks on nimetatud elektrienergiat tarbiv kinnistu. Tabelis on näha, et peaaegu kõikides alajaamades on fiidrikaitsetena kasutusel sulavkaitsmed. Sulavkaitsmete puhul on oluline teada, kui suur peab olema lühisvool, et kaitseade rakenduslühisele viie sekundi jooksul. Kaitseadme puhul tasub tähelepanu pöörata, et vooluahel, peab normaaltalitusel laskma läbi nimivoolu lõpmata aja jooksul, lisaks ei tohi kaitseade ületada piirtemperatuure. Oluline on veel aspekt, et kaitseadme oleks piisavalt tundlik, et reageeriks vajadusel vooluahelates leiduvatele väiksematele häiringutele. [17]

Alajaamad, kus on kasutusel kaitseadme, on oluline teada kaitseadme sätteid. Seda tüüpi kaitseadme puhul korrigeeritakse vajadusel lühisvoolu suurust, mille puhul arvatakse kaitseadmele järgnevat kaitseadmeid, mis asuvad jaotuskilpides ning liitumiskilpides. Lühisvoolu põhjal määratakse kaitseadmele rakendusvool ehk millele kaitseadme lühise korral rakenduma peab. Maakaablite ning õhuliinide korral on oluline pidada silmas kaablite maksimaalset lubatavat lühisvoolu, mis lühise toimumise korral rakendub ühe sekundi jooksul. Vastasel korral toimub kaabli riknemine, mille tulemusel kasutusel olev õhuliin ega maakaabel ei ole enam kasutuskõlblik. Samuti tuleb elektrivõrguga liitumiste puhul jälgida kaablite ristlõiked, kuna mida väiksem kaabli ristlõige, seda suurem on pingekadu ning seda madalam on lühisvoolu suurus. Liitumiskilbi peakaitse valitakse alati liitumistaotluses märgitud amprite järgi, milleks on C-karakteristikuga kaitseadme. Antud karakteristikuga kaitseadme peab rakenduma lühisvoolule, mis on kümme korda suurem kaitseadmele märgitud nimivoolust. Tabelis kirjeldatud suurused on piisavad, et teostada lühisvoolu ja pingekao arvutused Simelect võrguarvutus tarkvaraga.

2.5.2 Elektrivõrguga liitumised 20 – 25 A

Trafo võimsus, kVA	Fiidri- kaitse, A	Kaabli mark ja pikkus, m	JK kaitse, A	SZ- lüliti, A	LK pea- kaitse, A	Tarbija
320 Yyn	125	AVVG 4G50, 30 m AMKA 3X70+95, 423 m AXPK 4G50, 70 m	-	-	3xC25	12
100 Yzn	40/160	AXPK 4G50, 100 m	-	-	3xC20A	13
250 Yyn	160/250	AXPK 4G50, 70 m AMKA 3X35+25, 423 m AXPK 4G120, 149 m	-	50/160	3xC20A	14
250 Dyn	63/400	AXPK 4G120, 20 m AMKA 3X120+95, 53 m AXPK 4G50, 35 m	-	-	3xC20A	15
250 Dyn	100/400	AXPK 4G120, 30 m AMKA 3X70+95, 261 m AXPK 4G50, 45 m	-	-	3xC20A	16
250 Dyn	100/400	AXPK 4G120, 24 m AMKA 3X70+95, 330 m AXMK 4G120, 62 m AMKA 3X70+95, 265 m AXPK 4G50, 31 m	-	32/160	3xC20A	17
100 Yzn	80/400	AXPK 4G70, 94 m AMKA 3X50+70, 332 m AXPK 4G50, 130 m AXPK 4G50, 39 m	-	50/160	3xC20A	18
50 Yzn	40/160	AXPK 4G50, 134 m	-	-	3xC25A	19
50 Yzn	63/160	AXPK 4G70, 60 m AMKA 3X70+95, 278 m AXPK 4G120, 345 m	-	-	3xC20A	20
160 Yyn	63/400	AXMK 4G120, 153 m AMKA 3X50+70, 212 m AXPK 4G50, 20 m	-	-	3xC20A	21
50 Yzn	40/400	AXMK 4G70, 13 m AMKA 3X50+70, 111 m AMKA 3X70+95, 206 m AXPK 4G120, 114 m	-	32/160	3xC20A	22
50 Dyn	63/400	AMKA 3X70+95, 151 m AXPK 4G50, 218 m	-	-	3xC20A	23
100 Yzn	50	AXPK 4G50, 45 m AMKA 3X70+95, 141 m AXPK 4G50, 87 m	-	-	3xC20A	24

Tabel 2.2 Madalpingevõrgu seadmete andmed 20 – 25 A liitumiste korral

Tabelis 2.2 on sarnaselt tabelile 2.1 välja toodud 20-25 A elektrivõrguga liitumiste andmed, milleks on alajaamas paikneva trafo võimsus ning lülitusgrupp, sulavkaitsemete ja kaitselüliti andmed, mis on kasutusel fiidrite kaitseseadmetena. Veel on välja toodud õhuliinide ja maakaablite andmed, mis kulgevad alates alajaamast kuni projekteeritud liitumiskilpi. Võrreldes tabeliga 2.1 on tabelis 2.2 kajastatud veel mastilülitite ehk SZ lülitite andmeid, mis paigaldatakse õhuliini

mastile, et kaitsta täiendavalt madalpingevõrku. Peamine põhjus, miks mastilüliteid õhuliini mastidele paigaldatakse, on see, et liitumiskilbile eelnenud kaitseadmed ei pruugi rakenduda lühisvoolule, kuna kaitseülite sätte väärtused ning sulavkaitsmete nõutud lühisvoolu suurused ei pruugi olla vastavuses projekteeritud liitumiskilbi juures välja arvatud lühisvooludega. Lisaks on kajastatud veel liitumiskilpide peakaitsemeid, mille kriteeriumid on eelnevalt välja toodud ning elektrienergiat tarbiva kinnistu nimi. Sarnaselt tabelile 2.1 on tabelis 2.2 olemas piisaval hulgal andmeid, et teostada lühisvoolu arvutused projekteeritud liitumispunkti juures võrguarvutus tarkvara kaasabil.

2.5.3 Elektrivõrguga liitumised 32 – 160 A

Trafo võimsus, kVA	Fiidri-kaitse, A	Kaabli mark ja pikkus, m	JK kaitse, A	SZ-lüliti, A	LK pea-kaitse, A	Tarbija
250 Yzn	200/400	AXPG 4G240, 155 m	-	-	3x160	25
100 Yzn	80/160	AMKA 3X70+95, 227 m AMKA 3X70+95, 78 m AXPK 4G50, 14 m	-	-	3xC63A	26
100 Yzn	63	AMKA 3X70+95, 239 m AXPK 4G50, 8 m	-	-	3xC32A	27
250 Yzn	90	AXPK 4G70, 18 m AMKA 3X70+95, 387 m AXPK 4G120, 36 m	-	50/160	3xC32A	28
100 Yzn	100/400	AXPK 4G120, 157 m	-	-	3xC80A	29
100 Yzn	63/160	AXPK 4G70, 378 m AXPK 4G120, 83 m	-	-	3xC40A	30

Tabel 2.3 Madalpingevõrgu seadmete andmed 32 – 200 A liitumiste korral

Tabelis 2.3 on välja toodud sarnaselt tabelile 2.1 ning 2.2 32-200 A liitumised elektrivõrguga, mille puhul on samuti nimetatud alajaamas paikneva trafo võimsus ning lülitusgrupp, alajaamast väljuva fiidrite kaitseadmed, kaablite nimetused koos pikkustega, mastilüliti andmed ning liitumiskilbi peakaitsemete andmed ja elektrienergiat tarbiva kinnistu nimi. Antud elektrivõrguga liitujate puhul jaotuskilpides kaitseadmeid ei esinenud või jaotuskilpe kasutusel ei olnud, millest tulenevalt puudvad jaotuskilpide kaitseadmete kohta tabelis andmed. Sarnaselt eelnevatele tabelitele on tabelis 2.3 välja toodud andmed piisavad, et teostada lühisvoolu arvutused Simelect tarkvaraga.

2.6 Simelect tarkvara kirjeldus ja arvutatud lühisvool

2.6.1 Simelect tarkvara kasutamine

Simelect tarkvara võimaldab teostada madalpingevõrgus nii ühefaasiliste kui ka kolmefaasiliste lühisvoolude ning pingekao arvutusi. Lisaks võimaldab antud tarkvara leida veel mööduvat lööklühisvoolu, kolmefaasilist lühisvõimsust ning kaablitele lubatud koormusvoolusid ning trafo eri parameetrid. [2]

The screenshot shows the Simelect 4 software interface. The main window displays a table for configuring line types and their parameters. The table has columns for line type, conductor type, conductor cross-section, protection device, and short-circuit current. The summary statistics at the bottom show the total short-circuit current and voltage drop.

Liinilõigu pikkus [m]	Juhi mark	Vool liinis I _B	Kaitseade liinilõigu lõpus	I _Z
1 100	AXMK/AXPK-4x120	50	-Valmata-	I _{Z1} =255 A
2 250	AXMK/AXPK-4x16	25	-Valmata-	I _{Z2} =78 A
3 20	XPJ 4-5G2,5	10	-Valmata-	I _{Z3} =78 A
4 0	-Vali juht-	0	-Valmata-	Teadmata
5 0	-Vali juht-	0	-Valmata-	Teadmata
6 0	-Vali juht-	0	-Valmata-	Teadmata
7 0	-Vali juht-	0	-Valmata-	Teadmata
8 0	-Vali juht-	0	-Valmata-	Teadmata
9 0	-Vali juht-	0	-Valmata-	Teadmata

Σ 370 m

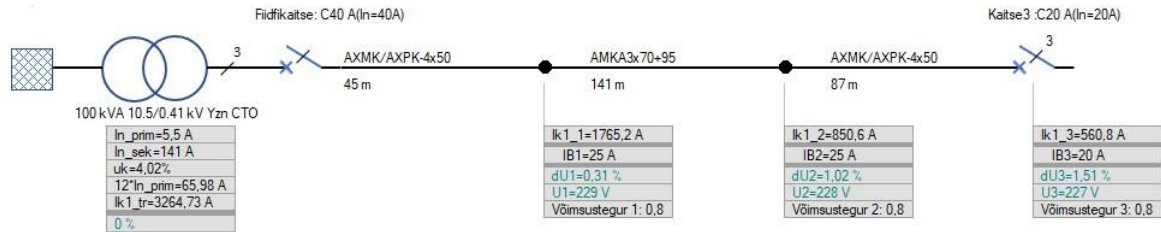
1f lühisvool liini lõpus [A]	131,6	C-tunnusjoonega kaitselüli	C10 A	Reguleeritava fiidrikaitse max	2,63
3f lühisvool liini lõpus [A]	335,67	B-tunnusjoonega kaitselüli	B25 A	lubatud lühisvoolukordsus Im	
Lühisvõimsus liini lõpus [kVA]	231,6	gG tüüpi sular	gG25A	EEE järgne max lubatud	43 A
Pingekadu	6,1%			fiidrikaitse (3xIn<Ik)	

-Fiidrikaitse rakendumine liini lõpuni ei ole tagatud! Lühisvool 131,6 A on väiksem, kui kaitseade voolulõige 250 A.
-Fiidrikaitset läbib lühisvool on väiksem kui kaitseade 3-kordne nimivool (I_n=50 A)!

Joonis 2.8 Simelect tarkvara peaaken [2]

Joonis 2.8 on kujutatud Simelect tarkvara peaakent, kuhu sisestatakse liinilõikude pikkused, valitakse rippmenüüst juhi mark ning sisestatakse vool liinis. Lisaks on võimalik sisestada liinilõigu lõpus olev kaitseade. Võrgu ja trafo andmete alt valitakse arvutuste teostamiseks soovitud võimsuse ning lülitusgrupiga trafo. Peaakna allosas on kuvatud eri andmed, millest olulisemad on ühefaasiline lühisvool liini lõpus ning pingekadu. Ühefaasilise lühisvoolu järgi toimub kaitseadmete valik ning pingekadu näitab, kui suur on pinge muutus liini alguspunkti ja lõpp punkti vahel. Tähelepanu tuleb pöörata veel sellele, et pingekadu ei oleks suurem kui kuus protsenti, kuna vastasel juhul ei ole see ei ole vastavuses ELV poolse J3337 juhendiga. Kuus protsenti pingekadu kehtib rekonstrueeritava või laiendatava võrgu puhul. Antud juhendis on kajastatud veel pingekadu neli protsenti, mis kehtib uue elektrivõrgu korral, kuhu uued liitumispunktid välja ehitatakse. Antud magistritöös on kajastatud

elektrivõrguga liitumisi, kus liitumiskilp rajatakse olemasolevasse madalpingevõrku ehk kehtib pingekadu kuni kuus protsenti. [15]



Joonis 2.9 Simelect programmis kuvatud aseskeem

Joonisel 2.9 on kajastatud Simelecti programmis olevat aseskeemi, mis iseloomustab madalpingevõrku, mille kohta arvutusi teostatakse. Antud aseskeemil on kuvatud trafo, kus on välja toodud primaar poole pinge ning sekundaari poole pinge, lisaks on kajastatud veel ühenduste tüüp trafol. Peale selle on aseskeemil veel välja toodud kaitsmete suurused ning kaablite margid ning pikkused. Olulisematest tulemustest on aseskeemil kajastatud veel ühefaasilise lühisvoolu väärtus ning pingelangud protsentides ning pingete väärtused voltides.

Ühefaasilise lühisvoolu arvutamiseks on Simelect tarkvaras kasutusele võetud Soome rahvuslikust standardist pärinev valem, mis lühendatud kujul on järgmine:

$$I_k^{(1)} = \frac{\sqrt{3} * 0,95 * U_f}{Z} \quad (2.1)$$

kus $I_k^{(1)}$ – ühefaasiline lühisvool, A;

U_f – faasipinge, V;

Z – liini näivtakistus, Ω . [2]

Kuna elektivõrguga liitumiste käigus arvutatakse välja Simelect tarkvara abil kogu pingekadu, avaldub pingekao valem järgnevalm kujul:

$$\Delta U\% = \frac{100 * (U_f - U_{tr}) + \Delta U_{liinis}}{U_f} \quad (2.2)$$

kus U_f – faasipinge, V;

U_{tr} – faasipinge trafo klemmidel, V;

ΔU_{liinis} – pingelang liinis, V. [2]

Simelectis on pingekao arvutamise puhul võetud aluseks standard EVS-EN 50160:2010, kus on välja toodud, et pingekadu ei tohi olla rohkem kui 10 %. Hiljem on antud standardit küll täiendatud erinevate muudatustega, kuid pingekadu kuni 10 % liitumispunktis on jäänud samaks. [21]

2.6.2 6 -16 A liitumiste ühefaasiline lühisvool ja pingekadu

Tarbija	Pingekadu, %	Ühefaasiline lühisvool, A
1	0,6	752
2	4,1	600
3	3,5	866
4	0,3	1380
5	0,03	1530
6	0,6	907
7	5	362
8	1	493
9	1,5	454
10	1,7	372
11	0,1	5084

Tabel 2.4 Pingekadu ja ühefaasiline lühisvool 6 – 16 A liitumiste korral

Tabelis 2.4 on kujutatud 6 – 16 A elektrivõrguga liitumisi, kus on välja toodud iga tarbija kohta pingekadu ning ühefaasiline lühisvool. Pingekaod ning ühefaasiline lühisvool on arvutatud Simelect tarkvara kaasabil. Arvutatud pingekaod jäävad kuni kuue protsendi piiridesse ehk on vastavuses normdokumentidega. Enamus Simelect tarkvaraga välja arvutatud pingekadudest jääb alla kahe protsendi. Seevastu tarbija number 2 ja tarbija number 3 pingekaod liitumispunktis on vastavalt 3,5 % ning 4,1 %, ehk on rohkem kui pool lubatavast pingekaost, mis juhendi kohaselt on lubatud. Ühefaasiliste lühisvoolude arvutused näitavad, et olemasolevad ja uued kaitseseadmed on valitud õigesti ning rakenduvad võimalikele lühistele. Kaitseseadmete valimisel on jälgitud, et kaitselülitid ning sulavkaitsmed töötaksid selektiivselt ehk kaitseseadmete välja lülitumine algaks liitumispunktist.

2.6.3 20 -25 A liitumiste ühefaasiline lühisvool ja pingekadu

Tarbija	Pingekadu, %	Ühefaasiline lühisvool, A
12	3,6	406
13	0,6	1167
14	2,9	428
15	0,6	1960
16	2	647
17	5	423
18	5	282
19	0,9	731
20	2,5	357
21	2,6	454
22	1,8	432
23	1,8	428
24	1,5	612

Tabel 2.5 Pingekadu ja ühefaasiline lühisvool 20 – 25 A liitumiste korral

Tabelis 2.5 on sarnaselt tabelile 2.4 kajastatud elektrivõrguga liitumiste pingekadusid ning lühisvoolusid, kuid nüüd on välja toodud 20 – 25 A liitumised madalpingel. Antud juhul jäävad enamikud pingekaod liitumispunktis, mis on saadud kasutades Simelect tarkavara, alla kolme protsendi. Tarbija number 12 korral on pingekadu liitumispunktis 3,6 % ning tarbija number 17 ning tarbija number 18 korral on pingekadu liitumispunktis juba 5 %. Kuigi kõik pingekaod jäävad kuue protsendi sisse, mis tabelis on kajastatud, tuleks tarbija number 17 ning tarbija number 18 pingekadusid arvesse võttes antud piirkonnas madalpingevõrku korrastada ehk rekonstrueerida, et tulevikus saaksid perspektiivsed elektrienergia tarbijad madalpingevõrguga liituda, vastasel juhul ei pruugi pingekadu jääda kuue protsendi piiridesse, kuna antud hetkel on kasutusel mitmed eri ristlõigetega kaablid, mis võimalusel tuleks viia ühesuguse kaabli ristlõike peale. Lühisvoolud seevastu näitavad, et olemasolevad ning uued kaitseadmed on valitud korrektselt ning rakenduvad lühistele nende tekkimisel. Seejuures on sarnaselt 6 -16 A elektrivõrguga liitumistele jälgitud selektiivsust.

2.6.4 32 -160 A liitumiste ühefaasiline lühisvool ja pingekadu

Tarbija	Pingekadu, %	Ühefaasiline lühisvool, A
25	1,7	1503
26	3,1	659
27	2,1	638

28	3,4	509
29	1,5	1780
30	3,4	472

Tabel 2.6 Pingekadu ja ühefaasiline lühisvool 32 – 200 A liitumiste korral

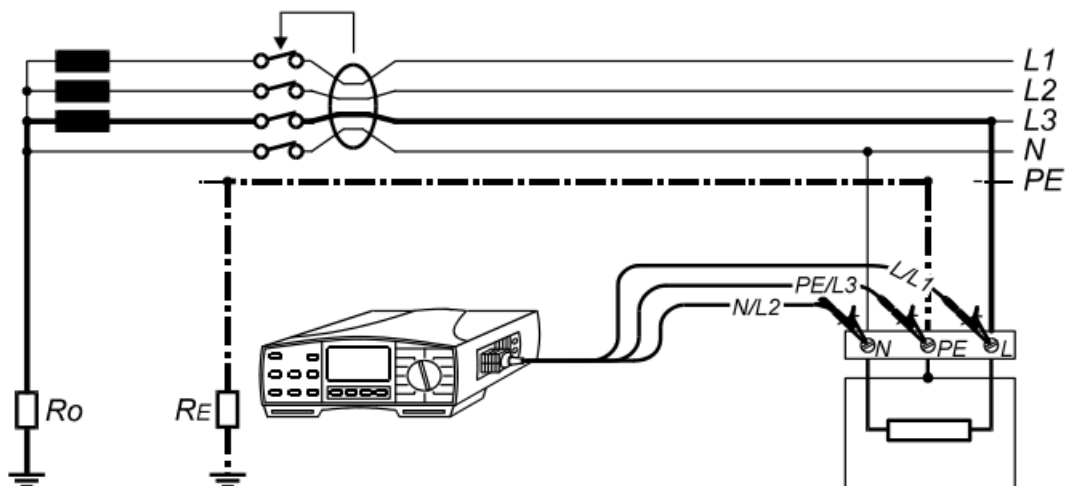
Tabelis 2.6 on sarnaselt viimasele kahele tabelile kajastatud madalpingevõrguga liitunud tarbijate pingekadu ning ühefaasilist lühisvoolu 32 - 160 A liitumiste korral madalpingel. Simelect tarkvaraga välja arvatud pingekaod näitavad, et saadud väärtused jäävad normide piiridesse ehk ei ole üle kuue protsendi. Lühisvoolude väärtused näitavad, et kasutusel olevad kaitseseadmed rakenduvad lühisele ning seejuures on arvestatud sarnaselt eelnevate liitumiste puhul selektiivsust kaitseseadmete valikul.

2.7 Eurotest 61557 mõõteseadme kirjeldus



Joonis 2.9 Eurotest 61557 mõõteseadme [23]

Joonisel 2.9 on kujutatud Eurotest 61557 seadet, mille abil on võimalik teostada mõõtmisi liitumiskilpide juures, et seeläbi teada saada ühefaasilise lühisvoolu väärtus. Lisaks on antud seade võimeline teostama kõiki mõõtmisi, mis vastab EN 61577 standardile. Selleks, et mõõtmisi teostada, tuleb seadme külge ühendada testimiseks mõeldud kaabel. Seejärel tuleb kaabel ühendada objekti külge, mille kohta soovitakse saada mõõteandmeid. Seejärel tuleb vajutada start nuppu, mis joonisel 2.9 kujutatud on punasega, et seade mõõtmisi teostama hakkaks. Mõõtetulemused kuvatakse seadme küljes oleval ekraanil. [23]



Joonis 2.10 Eurotest 61557 ühendamist illustreeriv skeem mõõdetava objekti külge [23]

Joonisel 2.10 on seevastu toodud välja illustreeriv skeem, kus on ära näidatud, kuidas mõõteseade soovitud mõõdetava objekti külge ühendatakse. Sellest tulenevalt on üks testimiseks mõeldud kaabli klemmidest ühendatud faasi külge, teine kaabli klemmidest neutraali külge ning lisaks on kasutusel veel kaitsemaandus, mis joonisel on kujutatud tähisega PE. Lühisvoolu teada saamiseks mõõdab mõõteseade kõige pealt rikkesilmuse takistusi ning seejärel teisendab seade selle automaatselt ümber lühisvooluks, mis saadakse nimipinge ning rikkesilmuse takistuse jagatisena. Mõõteseade on võimeline talitlema nimipingetel 115 V ning 230 V vahemikus 45-65 Hz ning maksimaalne voolutugevus seadmel on 23 A ning seda 10 ms jooksul. Eurotest 61557 lühisvoolu mõõteviga on sõltuvalt rikkesilmuse takistuse väärtusest, kus takistuse enda mõõtevea suurus omakorda on $\pm 2\% + 3D$. [23]

2.8 Liitumispunktis mõõdetud ühefaasiline lühisvool

2.8.1 Liitumiste 6-16 A korral mõõdetud ühefaasiline lühisvool

Tarbija	Rikkesilmuse takistus, Ω	Ühefaasiline lühisvool, A
1	0,23	981
2	0,25	923
3	0,22	1026
4	0,12	1871
5	0,11	2072
6	0,19	1192

7	0,47	489
8	0,34	668
9	0,50	465
10	0,49	474
11	0,06	4129

Tabel 2.7 Mõõdetud rikkesilmus ja ühefaasiline lühisvool 6 – 16 A liitumiste korral

Tabelis 2.7 on välja toodud liitumispunktides mõõdetud rikkesilmuse takistus, mis on aluseks ühefaasilise lühisvoolu määramisel ning ühefaasilne lühisvool 6 – 16 A elektrivõrguga liitumiste korral. Mõõtetulemused pärinevad AS Connecto Eesti ehitajate poolt, kus tulemused on mõõdetud EUROTTEST 61557 seadmega ning millest tulenevalt on mõõtmistel aluseks võetud EVS-HD 60364-6 standard. Mõõdetud tulemuste põhjal selgub, et tabelis 2.1 kajastatud kaitseseadmed rakenduvad lühise korral tabelis 2.7 välja toodud ühefaasilisele lühisvoolule. Erandina saab välja tuua elektrienergia tarbija number 2 ja tarbija number 3 ning tarbija number 9 kinnistute liitumised, kuna 10/0,4 kV alajaamades on kasutusel kaitselülitid. Antud kaitselülitid rakenduvad suurema väärtusega ühefaasilisele lühisele. Sellest tulenevalt on elektrienergia tarbija number 2 ja tarbija number 3 liitumiskilpide toide võetud jaotuskilpist, kuhu on paigaldatud sulavkaitsmed, mis on kinnitatud jadavinnaklüliti külge. Paali kinnistu liitumise puhul seevastu paigaldati õhuliini masti külge mastilüliti, kuna liitumiskilbi toide võeti õhuliini mastist. Liitumispunktis mõõdetud lühisvoolude tulemused on suuremate väärtustega, kui seda on Simelect tarkvaraga välja arvatud tulemused. Peamine põhjus võib peituda selles, et Simelect tarkvaras ei ole olemas kõiki trafode andmeid, mis alajaamades realselt kasutusel on. Sellest tulenevalt on lühisvoolude erinevus sadades amprites.

2.8.2 Liitumiste 20-25 A korral mõõdetud ühefaasiline lühisvool

Tarbija	Rikkesilmus takistus, Ω	Ühefaasiline lühisvool, A
12	0,52	445
13	0,20	1162
14	0,45	515
15	0,11	2018
16	0,34	676
17	0,40	569
18	0,59	389
19	0,23	993
20	0,45	514
21	0,43	538

22	0,40	577
23	0,42	553
24	0,34	667

Tabel 2.8 Mõõdetud rikkesilmus ja ühefaasiline lühisvool 20 – 25 A liitumiste korral

Tabelis 2.8 on kajastatud liitumispunktides mõõdetud rikkesilmuste ning ühefaasiliste lühisvoolude tulemusi elektrivõrguga liitumiste 20 – 25 A korral. Mõõtetulemuste põhjal saab öelda, et tabelis 2.2 välja toodud kaitseseadmed rakenduvad lühisvoolule. juhul kui aset peaks leidma ühefaasiline lühis. Vambola kinnistu liitumise puhul, kus alajaamas on fiidrikaitse kasutusel kaitselüliti, oli võimalik korrigeerida kaitselüliti sätet, mistõttu ei paigaldatud õhuliini masti külge eraldi veel mastikaitselüliti.

Sarnaselt eelnevalt kirjeldatud mõõtetulemustele on tabelis 2.8 kirjeldatud mõõtetulemused suurema väärtusega võrreldes Simelect tarkvaraga arvatud tulemustega. Siinkohal saab samuti välja tuua selle, et võrguarvutus tarkvaras pole saadaval kõikide trafode andmeid, millest tulenevalt on arvutuste puhul kasutatud nii-öelda halvima lühisvooluga trafot, kuid on jälgitud, et trafo võimsus ning lülitusgrupp oleks kindlasti samad.

2.8.3 Liitumiste 32-160 A korral mõõdetud ühefaasiline lühisvool

Tarbija number	Rikkesilmus takistus, Ω	Ühefaasiline lühisvool, A
25	0,15	1493
26	0,31	744
27	0,29	788
28	0,32	714
29	0,10	2421
30	0,56	409

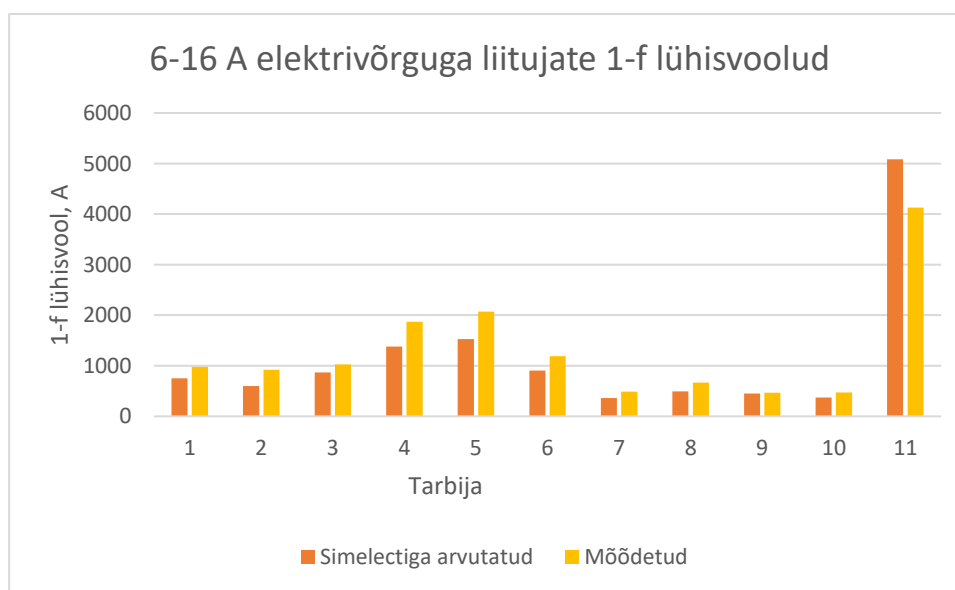
Tabel 2.9 Mõõdetud rikkesilmus ja ühefaasiline lühisvool 20 – 25 A liitumiste korral

Tabelis 2.9 on kirjeldatud liitumispunktides mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude mõõtetulemusi ning rikkesilmuste väärtusi elektrivõrguga liitujate vahemikus 32-160 A korral. Mõõtetulemuste põhjal saab öelda, et tabelis 2.3 nimetatud kaitseseadmed rakenduvad ühefaasilisele lühisele, juhul kui selline olukord peaks teatud põhjustel tekkima. Erandina saab välja tuua tarbija number 28 elektrivõrguga liitunud elektrienergia tarbija, kus varasemalt on kogu liinilõigule paigaldatud mastilüliti, sest alajaamas fiidrikaitse kasutusel olev kaitselüliti ei suuda reageerida potentsiaalsele lühisele, mis madalpingevõrgus tekkida võib.

Tabelist 2.9 saab veel välja tuua tarbija number 30 ühefaasilise lühisvoolu, mille tulemuseks liitumispunktis on mõõdetud 409 A, seevastu kaitselüliti rakendub lühisele väärtusega 400 A, millest tulenevalt saab öelda, et lühisvoolu mõõtetulemus on piiripealne. Võrreldes tabeliga 2.6, kus on kirjeldatud Simelect tarkvaraga arvatud ühefaasiliste lühisvoolude tulemusi, on tarbija number 25, tarbija number 29 ning tarbija number 30 mõõtetulemused tarkvaraga välja arvatud väärtustest väiksemad. Ülejäänud tarbijate mõõtetulemused on tarkvaraga arvatud väärtustest suuremad.

2.9 Liitumispunktis mõõdetud ühefaasilise lühisvoolu ning Simelect tarkvaraga arvatud ühefaasilise lühisvoolu kokkulangevus

2.9.1 Simelect tarkvaraga ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevus 6-16 A elektrivõrguga liitujate korral



Joonis 2.11 Simelect tarkvaraga arvatud ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevust iseloomustav graafik 6 -16 A liitujate korral

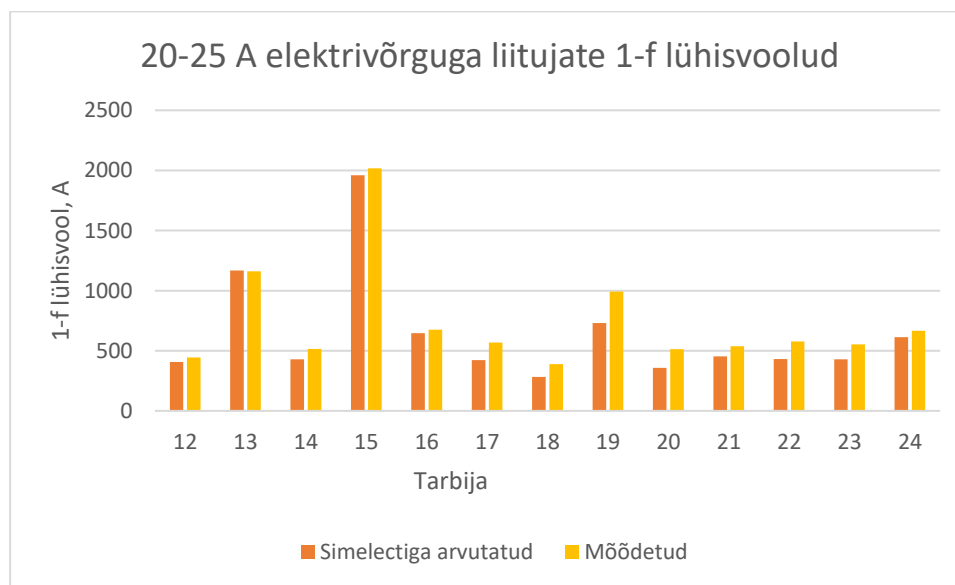
Joonisel 2.11 on kirjeldatud elektrivõrguga liitunud tarbijaid vahemikus 6 – 16, kus on välja toodud kõikide tarbijate ühefaasilised lühisvoolud, mille tulemused on saadud Simelect tarkvaraga arvutades ning liitumispunktis kohapeal mõõtes, et hinnata lühisvoolude omavahelisi kokkulangevusi. Kõige täpsemalt välja arvatud ühefaasiline lühisvool võrrelduna liitumispunktis mõõdetud lühisvooluga on tarbijal number 9, kus Simelectiga välja arvatud ühefaasilise lühisvoolu väärtuseks on 454 A, seevastu mõõdetud väärtus on 465 A ehk erinevus on 11 A. Seevastu kõige suurem lühisvoolu

erinevus on elektrienergiaga tarbijal number 11, kus Simelectiga arvatud lühisvoolu tulemus on 5084 A ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasilise lühisvoolu väärtus on 4129 A ehk erinevus on 955 A.

Joonisel 2.2 kajastub veel see, et tarbija number 11 puhul on liitumispunktis mõõdetud lühisvoolu väärtus madalam, kui seda on Simelect tarkavaraga arvatud tulemus, ülejäänud tarbijate puhul on olukord aga vastupidine ehk mõõdetud lühisvoolu tulemus on suurem kui tarkvaraga arvatud väärtus. Lisaks saab välja tuua selle, et tarbija number 7, 8, 9 ning 10 korral on ühefaasiliste lühisvoolude arvatud ning mõõdetud tulemuste omavahelised erinevused kuni paarsada amprit, seevastu tarbijatel numbritega 1, 2, 3, 4 ning 5 ja 6 korral arvatud ning mõõdetud lühisvoolude omavahelised erinevused on ligi 200-500 A.

Peatükis 3.7 on varasemalt välja toodud Eurotest 61557 mõõteseadme mõõtmis vea täpsus, milleks on $\pm 2\% + 3D$ seadme ekraanil kuvatud tulemuse väärtusest. Sellest tulenevalt täpsema analüüsi käigus selgub, et Simelectiga arvatud ning mõõteseadmega mõõdetud tulemuste omavaheline erinevus jääb vahemikku 21-26 protsenti 6-16 A elektrivõrguga liitujate korral. Tarbija 2 korral on erinevus kõige suurem ehk omavaheline erinevus on 35 protsenti. Tarbija 9 korral seevastu on erinevus arvatud tulemuse ning mõõdetud tulemuse vahel 2,4 protsenti ehk ületab mõõtevea täpsust 0,4 protsenti võrra. Seega antud analüüsi käigus selgub, et vahemikus 6-16 A elektrivõrguga liitujate korral Simelectiga arvatud ühefaasiliste lühisvoolude väärtused ei ole mõõteseadme mõõtevea piirides ehk selle põhjal saab öelda, et arvatud tulemused annavad ligikaudsed ühefaasiliste lühisvoolude väärtused võrreldes mõõtetulemustega.

2.9.2 Simelect tarkavara ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevus 20-25 A elektrivõrguga liitujate korral



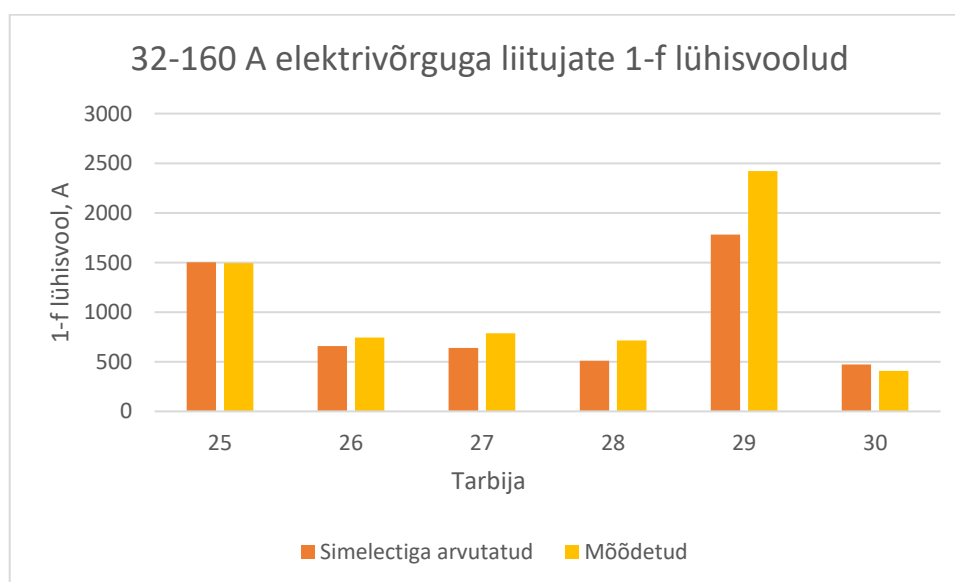
Joonis 2.12 Simelect tarkavaraga arvatatud ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevust iseloomustav graafik 20 - 25 A liitujate korral

Joonisel 2.12 on sarnaselt joonisele 2.11 kajastatud elektrivõrguga liitunud tarbijate ühefaasilisi lühisvoole, kus seekord on välja toodud vahemikus 20-25 A elektrivõrguga liitujad. Antud joonisel saab samuti välja tuua olukorra, kus kõigi tarbijate puhul on, välja arvatud elektrienergia tarbija number 13 korral, Simelect tarkvaraga välja arvatud ühefaasiliste lühisvoolude väärtused madalamad võrreldes liitumispunktis mõõdetud väärtustega.

Siinkohal saab välja tuua selle, et elektrienergia tarbija number 13 puhul arvatud lühisvoolu väärtus on 1167 A ning liitumispunktis mõõdetud tulemus on 1162 A ehk erinevus omavahelisel võrdlusel on viis amprit, mis ühtlasi on kõige täpsemini välja arvatud tulemus. Tarbija number 13 tarbijale järgnevad lühisvoolude omavahelises võrdluses elektrienergia tarbijad numbriga 15, 12, 16 ning 24 välja arvatud ning mõõdetud lühisvoolud, mis tarbija numbriga 15 puhul on vastavalt 1960 A ja 2018 A, tarbija numbriga 12 korral 406 ja 445 A, tarbija numbriga 16 korral 647 A ja 676 A ning tarbija numbriga 24 puhul 612 A ja 667 A ehk erinevused on vastavalt 58 A, 39 A, 29 A ning 55 A. Kõige suurem erinevus välja arvatud ühefaasilise lühisvoolu ning mõõdetud lühisvoolu puhul liitumispunktis on tarbijal numbriga 19, kus erinevus arvatud ning mõõdetud tulemusel on 262 A. Ülejäänud tarbijatel on arvatud ning mõõdetud lühisvoolude erinevus kuni paarsada amprit.

Sarnaselt eelnevale alapeatükile on teostatud ka antud peatükis analüüs mõõtevea kohta ehk kas Simelectiga arvatud ühefaasilise lühisvoolu väärtus jääb mõõteseadmele määratud vea piiridesse. Omavahelise lühisvoolude võrdluse käigus selgus, et elektrivõrguga liitujate 20-25 A korral valdav enamus arvatud lühisvoolude väärtusi võrreldes mõõtetulemusega erineb 22-30 protsenti. Tarbijate 14 ning 21 korral on erinevus vastavalt 16,9 ja 15,6 protsenti. Tarbijatel 15, 16 ning 24 korral on vastavad omavahelised erinevused 2,9, 4,3 ning 8,2 protsenti. Sellest tulenevalt saab öelda, et eelnevalt välja toodud tulemused ei ole mõõtevea piirides. Ainsana jääb mõõtevea piiridesse tarbija 13 tulemus, kus lühisvoolude omavahelises võrdluses on erinevus vaid 0,4 protsenti.

2.9.3 Simelect tarkavara ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevus 32-160 A elektrivõrguga liitujate korral



Joonis 2.13 Simelect tarkavaraga arvatud ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevust iseloomustav graafik 32 - 160 A liitujate korral

Joonisel 2.13 on sarnaselt eelnevale kahele joonisele kujutatud elektrivõrguga liitunud tarbijate ühefaasilisi lühisvoole. Seekord on kirjeldatud vahemikus 32-160 A elektrivõrguga liitunud elektrienergia tarbijaid. Antud elektrivõrguga liitujate puhul on näha, et kõigi tarbijate korral, välja arvatud elektrienergia tarbijate 25 ning 30 korral, on Simelect tarkvaraga arvatud ühefaasiliste lühisvoolude tulemused väiksemad, kui seda on liitumispunktis mõõdetud tulemused.

Kõige täpsemad tulemused on saadud elektrienergia tarbija number 25 puhul, kus arvutustarkavaraga on saadud lühisvoolu väärtuseks 1503 A, seevastu liitumispunktis

saadud mõõtetulemuseks 1493 A ehk erinevus on 10 A, mis ühtlasi on kõige täpsemad tulemused üksteise suhtes. Kõige suurem erinevus arvutustarkvara ning mõõtetulemuse vahel esineb elektrieneriga tarbija number 29 korral, kus arvutatud lühisvoolu tulemuseks on 1780 A, seevastu mõõtetulemuse väärtuseks on 2421 A ehk kahe tulemuse lahknevus on 641 A. Ülejäänud elektrivõrguga liitujate Simelect tarkvaraga saadud lühisvoolude väärtuste ning liitumispunktis mõõtetulemuste omavaheline erinevus jääb vahemikku 63-205 A.

Simelectiga arvutatud ning mõõtetulemuste omavaheline analüüs on samuti teostatud elektrivõrguga vahemikus 32-160 A korral. Kõige rohkem erinevad tulemused omavahel tarbijatel 28 ning 29, kus erinevuse suuruseks on vastavalt 28,7 ning 26,5 protsenti. Ülejäänud tarbijatel jääb tulemuste erinevus vahemikku 11,4-19 protsenti. Ainsana jääb mõõtevea piiridesse tarbija 25 lühisvoolu tulemus, kus omavahelises võrdluses on tulemuste erinevus 0,7 protsenti.

2.10 Peatüki kokkuvõte ja analüüs

Antud peatükis toodi välja antud magistritöö olemus, kirjeldati kaitseseadmete valikut, kuhu juurde lisati iseloomustamiseks fotod kaitselülitist, jadavinnakülitist, reguleeritava sättega kaitselülitist ning liitumiskilbi peakaitsmest. Seejärel selgitati liitumiskilbi eri parameetrid, mille järel kirjeldati TN-C juhistiküsteemi, mis on kasutusel madalpingevõrgus. Toodi välja elektrivõrguga liitunud tarbijate tehnilised parameetrid koos kõigi kaitseseadmete parameetrite ning kaabli parameetritega. Teostati ühefaasiliste lühisvoolude arvutused Simelect tarkvaraga, mida võrreldi omavahel liitumispunktis mõõdetud tulemustega.

Tulemuste analüüsi käigus selgus samuti mitmeid põhjuseid, miks Simelectiga saadud ühefaasiliste lühisvoolude tulemused erinevad täpsete arvutuste tulemustest. Üks põhjustest seisneb selles, et Simelectiga arvutusi teostades ei ole programmis alati õiget trafot, mis realselt alajaamas on, vaid selle asemel tuleb alternatiivne trafo, mille parameetrid siiski on sama, nagu alajaamas paikneval trafolgi. Kuna teatud juhtudel on programmis sama võimsusega trafosi mitmeid, siis igal seadmepool on erinev ühefaasiline lühisvool, mis põhjustab liitumiskilbi juures ühefaasilise lühisvoolu välja arvutamisel tulemuse erinevuse võrreldes hilisema ehituse käigus mõõdetud tulemusega. Teine oluline põhjus, mis põhjustab tulemustes erinevusi, on kaablite pikkused, mis kulgevad alates alajaamast kuni liitumiskilbini. Kuna liitumiskilbi ning kaablitrassi projekteerimisel mõõdistatakse projekteerijale sobilik ala elektripaigaldiste projekteerimiseks, siis sellest tulenevalt kogu kaablitrassi alajaamast geolusele peale mõõdetud ei ole. Seetõttu on võetud kogu ülejäänud kaablitrassi pikkus webmap

tarkvarast, kust saab küllaltki täpselt teada trassi pikkusega, kuid tulenevalt koma kohtade ümardamise pärast kaablite kogupikkuse tõttu põhjustab lõplikes tulemustes teatavaid erinevusi. Seepärast saab öelda, mida suurem on kaablitrassi pikkuse erinevus arvutusprogrammis võrreldes looduses oleva trassiga, seda suurem on erinevus varasemalt välja arvatud ning hiljem ehituse käigus mõõdetud ühefaasilise lühisvoolu vahel.

3 ÜHEFAASILISTE LÜHISVOOLUDE ARVUTAMINE MICROSOFT EXCEL PROGRAMMIGA

3.1 Arvutuste teostamise kirjeldus

Antud peatükis kajastatakse ühefaasiliste lühisvoolude täpseid arvutusi koos Microsoft Exceli tarkvara kaasabiga. Esmalt on välja arvutatud ühefaasiline lühisvool, mille jaoks on kasutatud järgnevat valemit:

$$I_k^{(1)} = \frac{U_f}{Z} \quad (3.1)$$

kus $I_k^{(1)}$ – ühefaasiline lühisvool, A;

U_f – faasipinge, V;

Z – liini näivtakistus, Ω . [8][11]

Ühefaasilise lühisvoolu arvutamisel on arvesse võetud veel pingetegur c , mis antud arvutuste puhul on 0,95, kuna soovitakse arvutada vähimat ühefaasilise lühisvoolu väärtust. Pingetegur võimaldab arvestada paremini ajast ning kohast sõltuvalt pinget, trafo pingelisasid, võimaldab kompenseerida koormuse ning mahtuvuse mitte arvestamist ning suudab arvestada täpsemalt ülimööduvaid seisundeid generaatorite ning mootorite kasutamise korral. [9]

Ühefaasilise lühisvoolu arvutamise puhul tuleb välja arvutada veel liinide kogutakistused, mida saab välja arvutada järgenvolt:

$$Z = (Z_f + Z_n) * l \quad (3.2)$$

kus Z – liini näivtakistus, Ω ;

Z_f – faasisoone näivtakistus, Ω/km ;

Z_n – neutraaljuhi näivtakistus, Ω/km ;

l – liini pikkus, km. [8][11]

Takistuste välja arvutamise puhul kasutatud maakaablite ning õhuliinide korral andmeid, mis on saadud kaablikatoloogidest ning teistes allikatest, mille väärtused on kajastatud tabelis 3.1, tabelis 3.2 ning tabelis 3.3. Lühisvoolude arvutuste teostamise

puhul on arvesse võetud kilpides olevate lüliti kontaktide takistusi, mille väärtus on 0,015 Ω. [8][11]. Lisaks on arvestatud veel temperatuuriteguriga, mille väärtuseks on 1,08, et arvutada lühisvoolud välja temperatuuri +40 °C. [19]

Pingekadu protsentides on välja arvatatud järgneva valemi abil:

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U} * 100\% \quad (3.3)$$

kus $\Delta U\%$ – pingekadu, %;

ΔU – pingekadu, V;

U – pinge, V. [12]

Pingekadu voltides ühefaasilise lühise korral on arvatatud välja järgnevalt:

$$\Delta U = 2 * I * Z * \cos\varphi \quad (3.4)$$

kus ΔU – pingekadu, V;

I – vool, A;

Z – näivtakistus, Ω;

$\cos\varphi$ – üheaegsustegur.

Kaabli mark	Faasijuhi näivtakistus, Ω/km	Neutraaljuhi näivtakistus, Ω/km
AXPK 4G25	1,5	1,5
AXPK 4G50	0,77	0,77
AXPK 4G70	0,53	0,53
AXPK 4G95	0,39	0,39
AXPK 4G120	0,31	0,31

Tabel 3.1 Alumiiniumjuhtmetega ning PEX isolatsiooniga jõukaabel [10]

Kaabli mark	Faasijuhi näivtakistus, Ω/km	Neutraaljuhi näivtakistus, Ω/km
AMKA 3x35+50	1,0	0,720
AMKA 3x50+70	0,77	0,493
AMKA 3x70+95	0,53	0,363
AMKA 3x120+95	0,30	0,363

Tabel 3.2 Alumiiniumsulamist kandetrossiga rippkeerdkaabel [10]

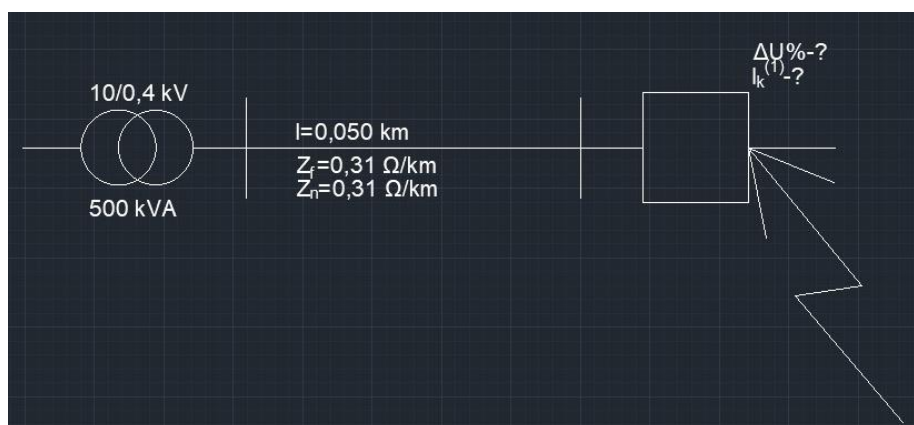
Kaabli mark	Faasijuhi näivtakistus, Ω/km	Neutraaljuhi näivtakistus, Ω/km
AVVG 4G50	0,67	0,67
AVVG 4G120	0,278	0,278

Tabel 3.2 Alumiiniumjuhtmetega ning PVC isolatsiooniga jõukaabel [20]

Kaabli mark	Faasijuhi näivtakistus, Ω/km	Neutraaljuhi näivtakistus, Ω/km
AXMK 4G50	0,641	0,641
AXMK 4G120	0,253	0,253

Tabel 3.3 Alumiiniumjuhtmetega ning PE isolatsiooniga jõukaabel [13][14]

3.2 Arvutuste teostamise näide



Joonis 3.1 Lühise aseskeem

Antud alapeatükis on teostatud ühefaasilise lühisvoolu arvutamise näide, mis näitab ära kuidas teostati ühefaasiliste lühisvoolude täpsed arvutused. Arvutuse näide on teostatud elektrivõrguga liituja tarbija 11 põhjal, mille kohta samuti on välja toodud veel lühise aseskeem joonisel 3.1. Lühise aseskeemil on kajastatud trafo koos

pingeastmete ning trafo koguvõimsusega, liin koos liini parameetritega ning liitumiskilp. Lisaks on joonisel oleval aseskeemil liitumiskilbi juurde märgitud lühise asukoht ning arvutamist vajavad parameetrid. Esmalt arvutati valemi 3.2 abil välja liinilõigu takistused, kus antud näite puhul on kasutusel AXPK 4G120 kaabel. Sellest tulenevalt on takistusi kogu liinilõigus järgnev:

$$Z = (0,31 + 0,31) * 0,050 = 0,031 \Omega$$

Järgneva tegevusena arvutati 3.1 valemi abil välja ühefaasiline lühisvool, kus on juba arvesse võetud pingetegur, temperatuuritegur ning liitumiskilbis paiknevate kontaktide takistus. Ühefaasilise lühisvoolu arvutamine on teostatud järgnevalt:

$$I_k^{(1)} = \frac{0,95 * 400}{(2 * 1,08 * 0,031) + 0,015 + 0,017} = 3839$$

Peale ühefaasilise lühisvoolu leidmist arvutati välja valemite 3.3 ning 3.4 abil pingekadu voltides kui ka protsentides. Voolu puhul on arvestatud ampreid, mida klient on soovinud saada ning üheaegsusteguri puhul on kasutatud Simelect tarkvara vaikimis väärtust erinevuste vältimiseks, milleks on 0,8. Arvutuskäigud tulemuste välja arvutamiseks on järgnevad:

$$\Delta U = 2 * 10 * 0,031 * 0,8 = 0,496 V$$

$$\Delta U\% = \frac{0,496}{400} * 100\% = 0,12 \%$$

3.3 Microsoft Excel programmiga arvutatud ühefaasiline lühisvool

3.3.1 Microsoft Excel programmiga arvutatud ühefaasiline lühisvool ja pingekadu liitumiste 6 -16 A korral

Tarbija	Ühefaasiline lühisvool, A	Pingekadu, %
1	645	0,49
2	570	5,43
3	763	3,87
4	1197	0,70
5	2121	0,06
6	884	0,53
7	274	4,00

8	513	1,51
9	409	1,92
10	297	2,29
11	3839	0,12

Tabel 3.1 Microsoft Excel programmiga arvatud pingekadu ja ühefaasiline lühisvool 6 – 16 A liitumiste korral

Tabelis 3.1 on välja toodud elektrivõrguga liitumiste 6 -16 A korral Microsoft Excel programmi abil välja arvatud pingekadu ja ühefaasiline lühisvool liitumispunktis. Esmalt arvutati eelnevalt nimetatud programmi abil välja ühefaasilised lühisvoolud iga tarbija liitumispunkti kohta, mis tabelis 3.1 on kajastatud. Võrreldes tabeliga 2.4 ja 2.7, kus on välja toodud Simelect tarkvara ning mõõtmiste abil saadud ühefaasiliste lühisvoolude tulemused iga tarbija kohta, on tabelis 3.1 kirjeldatud tulemused üldjoontes sarnased.

Samas esineb erinevusi Simelect tarkvaraga saadud tulemustega ning liitumispunktis mõõdetud tulemustega, kuna lühisvoolude väärtused on kuni mõnisada amprit erinevad võrreldes tabel 3.1 väärtustega. Kõige suurem erinevus täpselt arvatud tulemuse ja mõõtetulemuse vahel on tarbija 4 korral, kus omavahelises võrdluses kahe tulemuse vahe on 674 A. Seevastu kõige väiksemad erinevused tulemuste omavahelises võrdluses tarbija 5 ja tarbija 9 korral, kus vahed on vastavalt 49 A ja 56 A. Simelecti ja täpsete arvutuste omavahelises võrdluses saab välja tuua selle, et arvutustulemused on suures osas samas suurusjärgus ehk arvutusmetoodikad omavahel ühtivad.

Tabelis 3.1 on samuti toodud välja veel pingekaod iga tarbija kohta, kes elektrivõrguga liitunud on. Võrrelduna tabeliga 2.4 on tabelis 3.1 kajastatud pingekaod samas suurusjärgus, mis on saadud Simelect programmi kasutades. Kõige suurem erinevus on tarbija 2 korral, kus täpselt arvatud tulemus ning Simelectiga saadud tulemused on vastavalt 5,43 ja 4,1 protsenti ehk vahe on 1,33 protsenti, ülejäänud tarbijate korral on pingekao erinevus kuni protsenti. Kuna mõlemal juhul on tulemused samaväärsed, tähendab see seda, et täpselt arvutused antud tarbijate korral on teostatud õigesti. Lisaks saab välja tuua selle, et täpselt arvatud tulemuste puhul jäävad pingekao väärtused alla 6 protsendi ehk vastavad juhendis J3337 välja toodud tingimustele.

3.3.2 Microsoft Excel programmiga arvatud ühefaasiline lühisvool ja pingekadu liitumiste 20 -25 A korral

Tarbija	Ühefaasiline lühisvool, A	Pingekadu, %
12	323	5,25
13	1304	0,61
14	556	1,67
15	1460	0,81
16	517	2,56
17	273	5,00
18	215	6,23
19	645	2,06
20	318	3,89
21	512	2,54
22	370	3,26
23	331	4,70
24	480	2,63

Tabel 3.2 Microsoft Excel programmiga arvatud pingekadu ja ühefaasiline lühisvool 20 – 25 A liitumiste korral

Tabelis 3.2 on sarnaselt tabeliga 3.1 välja toodud ühefaasiline lühisvool ning pingekadu iga tarbija kohta, kes on liitunud elektrivõrguga. Sarnaselt tabelitega 2.5 ja 2.8, kus on kirjeldatud vastavalt Simelect tarkvara ja liitumispunktis mõõdetud tulemusi, on tabeli 3.2 ühefaasilised lühisvoolud samas suurusjärgus, kui seda on eelnevalt nimetatud tabelite korral, ehk suuri erinevusi ei ole. Täpselt arvatud ja mõõdetud ühefaasiliste tulemuste omavahelises võrdluses selgus, et kõige suurem omavaheline erinevus kahe tulemuse vahel on tarbija 15 korral, kus vahe on 558 A. Teisest küljest kõige väiksemad omavahelised erinevused täpselt arvatud tulemuse ja mõõdetud tulemuse puhul on tarbijal 14 ja 21, kus erinevused on vastavalt 41 A ja 26 A. Ülejäänud elektrienergia tarbijate korral on vaatluse all olevate tulemuste erinevused vahemikus 100-350 A.

Tabelis 3.2 on sarnaselt tabeliga 2.5 välja toodud pingekadu iga tarbija kohta, kes elektrivõrguga on liitunud. Võrreldes tabeliga 2.5 on tabelis 3.2 kajastatud pingekadude suurused kohati mõnevõrra suuremad kui Simelectiga välja arvatud tulemuste puhul. Ühiseks nimetajaks antud tarbijate korral saab välja tuua selle, et alates alajaamast kuni liitumiskilbini on mitu erinevat kaablit, kus samaaegselt on kasutusel nii maakaabel kui ka õhukaabel, sealhulgas veel erinevate ristlõigetega. Kõige suurem pingekao erinevus on tarbijal 23, kus täpselt arvatud pingekao

väärtuseks on 4,7 protsenti, seevastu Simelectiga saadud tulemus on 1,8 protsenti ehk vahe on ligikaudu 3 protsenti. Ülejäänud tarbijatel jääb tulemuste omavaheline erinevus 0,5-1,6 protsenti piiridesse. Teisalt saab välja tuua veel tarbija 18, mille pingekao väärtus täpselt arvutades saadi 6,23 protsenti, mis ületab juhendis J3337 kirjeldatud 6 protsenti nõuet ehk antud pingekao tulemus ei vasta nõuetele.

3.3.3 Microsoft Excel programmiga arvatud ühefaasiline lühisvool ja pingekadod liitumiste 32 - 160 A korral

Tarbija	Ühefaasiline lühisvool, A	Pingekadu, %
25	1665	3,17
26	535	7,36
27	670	2,88
28	415	4,95
29	1313	3,11
30	401	6,42

Tabel 3.3 Microsoft Excel programmiga arvatud pingekadu ja ühefaasiline lühisvool 30 -160 A liitumiste korral

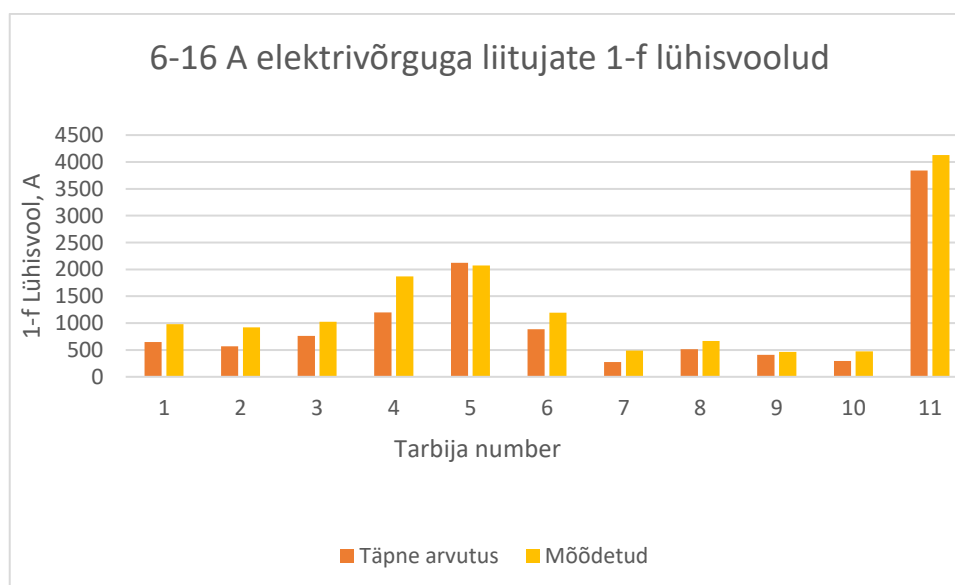
Tabelis 3.3 on kirjeldatud sarnaselt eelneva kahe tabeliga ühefaasilise lühisvoolu ning pingekao väärtusi. Sarnaselt tabelitega 2.6 ning 2.9 on tabeli 3.3 ühefaasiliste lühisvoolude väärtused samas suurusjärgus ehk erinevused on kuni paarsada amprit peamiselt. Suurima erinevusena saab välja tuua tarbija 29, kus täpselt arvatud tulemuse ning mõõtetulemuse väärtused on vastavalt 1313 A ning 2421 A ehk omavaheline tulemuste erinevus on 1108 A. Ülejäänud elektrienergia tarbijatel jäävad omavahelised tulemuste erinevused vahemikku 118-299 A. Kõige täpsemad arvutused on teostatud tarbija 30 korral, kus täpselt arvatud ja mõõdetud tulemuste omavaheline erinevus on 8 A ehk arvatud ja mõõdetud tulemuste väärtused on vastavalt 401 A ja 409 A.

Pingekadude omavaheline võrdlus teostati samuti vahemikus 32-160 A elektrivõrguga liitujate korral. Võrreldes tabelis 2.6 kajastatud tulemustega on tabelis 3.3 pingekadude väärtused mõnevõrra suuremad. Kõige suurem erinevus on tarbijal 26, kus pingekadude erinevus 4,26 protsenti. Lisaks saab tuua välja veel selle, et täpse arvutuse korral on pingekao väärtus 7,36 protsenti ehk ei vasta juhendis J3337 välja toodud tingimustele. Erinevuse põhjuseks saab välja tuua selle, et alates alajaamast kuni liitumiskilbini on kasutusel erinevad kaablid, millest tulenevalt on tingitud pingekao arvutuste erinevused. Lisaks on veel pingekao erinevus tarbijal 30, kus vahe on umbes 3 protsenti. Antud tarbijal on pingekao erinevus tingitud samuti sellest, et kasutusel on erineva ristlõikega kaablid, mis soodustavad pingekao suurenemist.

Ülejäänud tarbijatel on pingekadude erinevused täpsete arvutuste ja Simelect arvutuste korral kuni 2 protsenti.

3.4 Mõõdetud ühefaasilise lühisvoolu ning Microsoft Excelis arvutatud ühefaasilise lühisvoolu kokkulangevus

3.4.1 Microsoft Excelis arvutatud ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevus 6-16 A elektrivõrguga liitujate korral



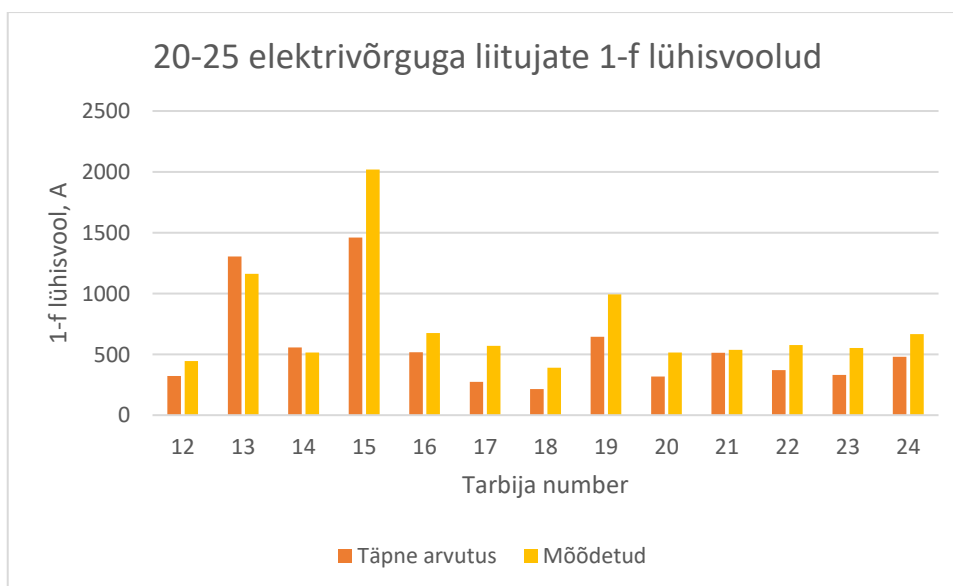
Joonis 3.2 Täpselt arvutatud ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevust iseloomustav graafik 6 - 16 A liitujate korral

Joonisel 3.2 on kujutatud sarnaselt joonistele 2.11 - 2.13 ühefaasiliste lühisvoolude võrdlust igal tarbijal, kuid antud joonisel võrreldakse omavahel elektrivõrguga vahemikus 6-16 A liitunud tarbijate täpselt arvutatud ühefaasilisi lühisvoole, mille arvutused on teostatud Microsoft Exceli kaasabil, ning liitumispunktis kohapeal mõõdetud lühisvoolude tulemusi. Joonisel 3.2 on näha, et kõikidel tarbijatel, välja arvatud tarbija 5, on täpsete arvutuste kaudu saadud tulemused on väiksemad kui mõõdetud tulemuste korral. Üheks põhjuseks on kindlasti see, et arvutustel võetakse arvesse kaablite varud, milleks arvestatakse viis protsenti. Sellest tulenevalt on tingitud olukord, kus arvutustes kajastatud kaablitraasi pikkus võib olla mõnevõrra suurem, kui see on realses madalpingevõrgus. See omakorda avaldab mõju lühisvoolude lõpptulemustele, mis iga tarbija juures välja arvutatakse. Joonisel 3.2 kajastatud tarbijate omavahelises võrdluses on arvutatud tulemuste erinevused

peamiselt vahemikus 150-350 A. Kõige suurem erinevus mõõdetud tulemuse ning arvutatud tulemuse vahel on tarbijal 4, kus tulemuste erinevus on 674 A, mille peamine põhjus on varasemalt välja toodud. Kõige täpsemad tulemused on tarbija 5 ning tarbija 9 korral, kus tulemuste erinevused on vastavalt 49 A ning 56 A.

Sarnaselt Simelecti ja mõõteseadmega saadud mõõtetulemuste omavahelisele mõõtemääramatuse kokkulangevuse analüüsile teostati samalaadne tulemuste võrdlus täpsete arvutuste ning mõõdetud tulemuste vahel. Tulemuste omavahelises võrdluses selgus, et vahemikus 6-16 A elektrivõrguga liitujate korral on täpselt arvutatud ühefaasiliste lühisvoolude erinevus võrreldes mõõtetulemustega 23-38 protsenti. Kõige suurem erinevus mõõtetulemuse ning täpselt arvutatud tulemuse korral tarbija 7 korral, kus kahe tulemuse omavaheline erinevus on 44 protsenti. Seevastu kõige väiksemad omavahelised erinevused on tarbija 5, 9 ja 11 korral, kus vastavad näitajad on 2,4 %, 12 % ning 7 %. Üheks põhjuseks, mis põhjustab tulemuste omavahelist erinevust, on üheaegsustegur. Täpsetel arvutustel on valemisse sisestatud üheaegsusteguriks 0,8, mis mõjutab ühefaasilise lühisvoolu tulemuse väärtust. Kuna mõõteseadet ühendatakse elektrivõrku, siis seade arvestab vaid antud majapidamisi, mis elektrienergiat reaajas tarbivad.

3.4.2 Microsoft Exceli arvutatud ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevus 20-25 A elektrivõrguga liitujate korral



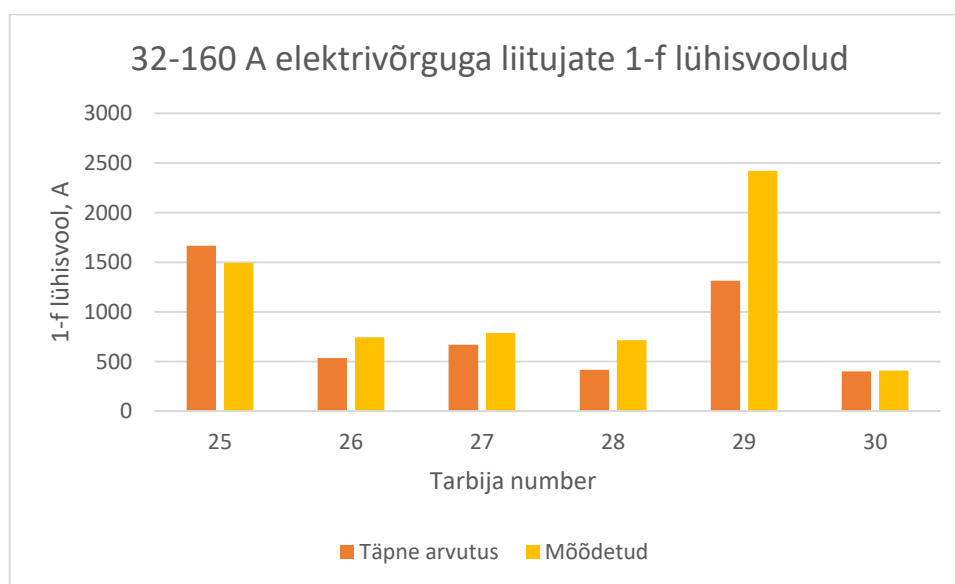
Joonis 3.3 Täpselt arvutatud ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevust iseloomustav graafik 20 - 25 A liitujate korral

Joonisel 3.3 on välja toodud elektrivõrguga vahemikus 20 -25 A liitunud elektrienergia tarbijad, kus on sarnaselt joonisele 3.2 kajastatud mõõdetud ühefaasiliste

lühisvoolude tulemusi ning Microsoft Exceli kaasabil teostatud täpsete arvutuste ühefaasiliste lühisvoolude tulemusi. Võrreldes joonisega 2.12, kus võrreldi omavahel Simelect tarkvaraga arvatud ühefaasiliste lühisvoolude väärtusi ning liitumispunktis mõõdetud lühisvoolude väärtusi, on joonisel 3.3 täpselt arvatud lühisvoolude väärtustel ning mõõdetud lühisvoolude tulemustel mõnevõrra suurem lahknevus teineteisest, välja arvatud elektrienergia tarbija number 21. Võrreldes joonisega 2.12, kus Simelect tarkvaraga saadud tulemus oli 454 A, millest tulenevalt erinevus mõõtetulemuse suhtes oli 84 A. Seevastu täpselt arvatud tulemus on 512 A ehk erinevus mõõtetulemuse suhtes on 26 A, ühtlasi saab välja tuua selle, et täpsete arvutuste juures oli see kõige väiksema lahknevusega tulemus võrreldes sama tarbija mõõtetulemusega. Lisaks saab välja tuua lisaks veel tarbijale number 21 tarbija number 14, kus võrreldes Simelect tarkvaraga saadud täpselt arvatud ühefaasilise lühisvoolu väärtuse ning liitumispunktis mõõdetud tulemuse erinevus on 41 A, seevastu Simelect tarkvaraga saadud tulemus sama tarbija korral oli 428 A ehk erinevus on ligi kahekordne. Ülejäänud tarbijatel täpselt arvatud ühefaasiliste lühisvoolude tulemuste ning liitumispunktis mõõdetud väärtuste erinevus jääb vahemikku 100-300 A.

Täpselt arvatud ning mõõdetud tulemuste vahel teostati mõõtemääramatuse analüüs samuti vahemikus 20-25 A elektrivõrguga liitunud tarbijatele. Mõõtemääramatus kahe tulemuse vahel enamikul juhtudel jääb vahemikku 27-39 protsenti. Tarbijatel 17, 18 ja 23 on tulemuste erinevus vastavalt 52 protsenti, 44,7 protsenti ja 40,1 protsenti ehk tulemused jäävad mõõtemääramatuse piirkonnast välja. Väiksemad tulemuste erinevused on tarbijatel 13, 14 ja 16, kus tulemused erinevad vastavalt 12,2 protsenti, 8 protsenti ning 23,5 protsenti ehk jällegi täpselt arvatud tulemused jäävad mõõtemääramatuse piirkonnast välja.

3.4.3 Microsoft Excelis arvatud ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevus 32-160 A elektrivõrguga liitujate korral



Joonis 3.4 Täpselt arvatud ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevust iseloomustav graafik 32 - 160 A liitujate korral

Joonisel 3.4 on kajastatud elektrivõrguga liitujad vahemikus 32-160 A korral, kus on ära kirjeldatud täpselt arvatud ühefaasiliste lühisvoolude tulemused ning liitumispunktis mõõdetud lühisvoolude tulemused. Erinevalt joonisest 2.13, kus on omavahel võrreldud omavahel Simelect arvutustarkvaraga saadud tulemusi ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude andmeid, on joonisel 3.4 teatavad erinevused.

Esmalt saab välja tuua elektrienergia tarbija number 29, kus täpselt arvatud ühefaasilise lühisvoolu tulemuseks saadi 1313, mis erineb mõõtetulemusest 1108 A võrra. Lisaks saab veel välja tuua tarbija number 29 elektrienergia tarbija, kus täpselt arvutades saadi ühefaasilise lühisvoolu tulemuseks 1818 A, mis erineb mõõtetulemusest 603 A võrra. Tarbija 29 peamiseks põhjuseks lühisvoolude tulemuste erinevuseks on see, et liitumiskilbi läheduses on päikeseelektrijaam, mis põhjustab ühefaasilise lühisvoolu tõusu liitumiskilbi juures. Seevastu täpsete arvutuste teostamises ei ole päikeseelektrijaama arvesse võetud, millest tulenevalt tulemuste omavaheline erinevus põhjustatud on. Kõige täpsemalt antud juhul on välja arvatud tarbija 30, kus täpselt arvutades Microsoft Exceli kaasabil saadi ühefaasilise lühisvoolu tulemuseks 401 A, mis erineb mõõtetulemusest 8 A võrra. Elektrienergia tarbija number 30 korral saab eraldi välja tuua veel selle, et kui liitumispunktis kohapeal oleks mõõdetud lühisvoolu väärtus olnud väiksem kui 400 A, siis sellest tulenevalt oleks pidanud liitumiskilpi paigaldama C-karakteristikuga kaitselüliti asemel B-

karakteristikuga kaitselüliti. C-karakteristikuga kaitselüliti rakendub lühisvoolule, mis on kümme korda suurem kaitselüliti nimivoolust, seevastu B-karakteristikuga kaitselüliti rakendub lühisele, mis on viis korda suurem kaitselüliti nimivoolust. Ülejäänud elektrivõrguga liitunud tarbijate ühefaasiliste lühisvoolude omavahelises võrdluses on täpselt arvatud ning liitumispunktis mõõdetud lühisvoolude erinevus vahemikus 150-300 A.

3.5 Peatüki Kokkuvõte ja analüüs

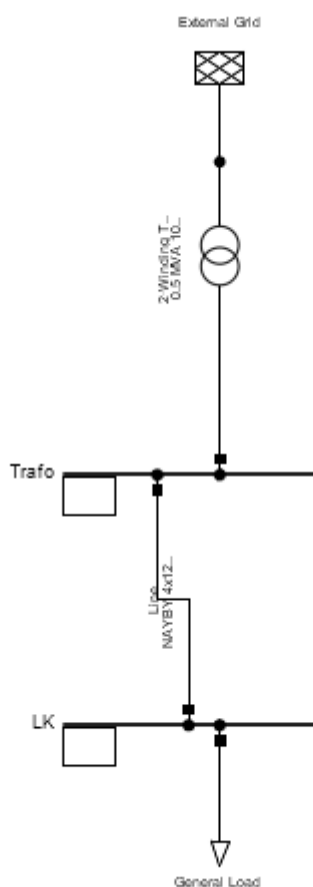
Antud peatükis kirjeldati ühefaasiliste lühisvoolude täpselt arvutamist Microsoft Exceli kaasabil. Toodi välja vajalikud valemid ning tegurid, mida on vaja ühefaasilise lühisvoolu leidmiseks. Kajastati erinevate kaablite juhtide takistusi, mis ühefaasiliste lühisvoolude arvutamiseks vajalikud olid. Seejärel teostati ühefaasilise lühisvoolu arvutuse näide, mis näitab ära etapid, kuidas lühisvoolu väärtus välja arvatud on. Tabelite abil toodi välja iga tarbija kohta lühisvoolu tulemus, mille tulemusi omavahel võrreldi veel mõõtetulemustega liitumispunktis.

Sarnaselt Simelecti ja mõõdetud tulemuste erinevuste kajastamisele eelmises kokkuvõtvas peatükis, siis sellest tulenevalt antud kokkuvõtvas peatükis on välja toodud erinevused täpselt arvutuste ning mõõtetulemuste vahel. Täpselt teostatud arvutuste ning mõõdetud tulemuste omavahelises võrdluses selgus, et ühefaasilised lühisvoolud on samas suurusjärgus, kuid siiski esineb ka teatavaid erinevusi. Üks põhjustest tulemuste erinevusel on see, et täpsetel arvutustel on arvatud ühefaasiline lühisvool alates alajaamast kuni liitumispunktini, kus on arvestatud vaid liituja endaga. Seevastu, kuna mõõteseadet ühendatakse reaalsesse madalpingevõrku, siis seadmele avaldavad mõju teatud määral ka teised elektrienergia tarbijad, kes elektrivõrgus on, ehk mida suurem on tarbijate arv võrgus, seda väiksem on üheaegsustegur ning sellest tulenevalt omakorda on ühefaasilise lühisvoolu tulemus väiksem. Kindlasti on üks oluline tegur veel temperatuuri ehk ümbritseva keskkonna arvestamine. Täpsete arvutuste puhul on võetud temperatuuriks 25 °C, seevastu mõõtmised teostatakse erinevatel temperatuuridel, mis konkreetselt ajahetkel on. Sellest tulenevalt on samuti tingitud lühisvoolude tulemuste erinevus ehk näiteks mida kõrgem on temperatuur, sellest tulenevalt lühisvool madalam on.

4 ÜHEFAASILISTE LÜHISVOOLUDE ARVUTAMINE DIGSILENT TARKVARAGA

4.1 Digsilent programmiga arvatatud ühefaasiline lühisvool

4.1.1 Ühefaasilise lühisvoolu arvutamise näide DIgSILENT programmis



Joonis 4.1 Tarbija number 11 madalpingevõrgu mudel DIgSILENT programmis

Joonisel 4.1 on kujutatud vastavalt elektrienergia tarbija number 11 näite põhjal teostatud madalpingevõrgu mudel ning antud elektrienergia tarbija ühefaasilise lühisvoolu arvutamise mudel DIgSILENT programmis. Joonisel 4.1 on kajastatud kaablitrassi kulgemist alates alajaamast kuni liitumispunktini. Sellest tulenevalt sisestati programmis olevale töölauale võrk (ingl k *External Grid*), trafo, latid, kaabel ning koormus (ingl k *General Load*), mis kujutab liitujat. Kõige pealt lisati töölauale latid, millel määrati pingeks 0,4 kV, sellele järgnevalt kinnitati lattide külge kaabel, koormus ehk elektrienergia tarbija, trafo. Trafo külge eraldi ühendati veel võrk, sest

vastasel juhul joonisel olev skeemi tööle ei hakka. Järgnevalt sisestati tarbija number 11 näite põhjal trafo, kaabli ning koormuse andmed skeemile. Trafo ja kaabli andmed sisestatud DIGSILENT programmi käsitsi ning samuti koormuse puhul sisestati vajalikud andmed skeemile ise, milleks on elektrivõrguga liitumistaotlusel kuvatud amprid, milleks antud juhul on 16 A ning üheaegsustegur, mis kõigi arvutuste puhul on vaikumisi 0,8. Digsilent programmiga arvatud ühefaasiline lühisvool ja pingekadu liitumiste 6 -16 A korral. Programm arvestab ka seda, kas kaabel asub õhus või on maapinnas ning lisaks on määratud ära veel temperatuur. DIGSILENT programmis saab ära määrata veel selle, kas soovitakse arvutada vähimat või suurimat lühisvoolu.

Tarbija	Ühefaasiline lühisvool, A	Pingekadu, %
1	801	0,60
2	764	7,27
3	929	4,71
4	1654	0,96
5	1987	0,05
6	1047	0,62
7	419	6,11
8	622	1,88
9	449	2,10
10	453	3,49
11	4116	0,14

Tabel 5.1 Digsilent programmiga arvatud pingekadu ja ühefaasiline lühisvool 6 – 16 A liitumiste korral

Tabelis 5.1 on kajastatud DIGSILENT programmiga arvatud pingekadu ning ühefaasilist lühisvoolu elektrivõrguga liitujate 6-16 A korral. Võrreldes tabelitega 2.4 ning 2.7 on DIGSILENTiga arvatud ühefaasiliste lühisvoolude tulemused suuremad, kui seda on Simelect tarkvara tulemuste ning täpsete puhul, seevastu on madalamad, kui seda on mõõtetulemused.

Tabelis 5.1 on lisaks ühefaasilistele lühisvooludele veel pingekaod iga tarbija kohta DIGSILENT tarkvara abil. Arvutuste põhjal selgus, et kõikide tarbijate pingekaod, välja arvatud tarbijad 2 ja 7, vastavad juhendis J3337 seatud tingimustele ehk ei ületa 6 protsendi piiri. Arvutuste põhjal selgus, et pingekaod, mis vastavad eelnevalt nimetatud juhendis toodud tingimustele, jäävad vahemikku 0,14-4,71 protsenti. Seevastu elektrienergia number 2 ja 7 pingekaod ületavad juhendis välja toodud nõuet ligi kaks korda ehk pingekaod on vastavalt 7,27 protsenti ja 6,11 protsenti. Selleks, et pingekaod normide piiridesse saada elektrienergia tarbija number 2 ning

number 7 korral, tuleks antud võrgust teostada võrgu rekonstrueerimine, milleks võib olla suurema ristlõikega maakaabli paigaldamine või olemasoleva trafo asendamine võimsama vastu.

4.1.2 Digsilent programmiga arvatud ühefaasiline lühisvool ja pingekadu liitumiste 20 -25 A korral

Tarbija	Ühefaasiline lühisvool, A	Pingekadu, %
12	392	3,30
13	1028	0,48
14	487	1,43
15	1874	1,04
16	574	2,87
17	501	2,46
18	327	5,12
19	879	1,81
20	458	2,61
21	485	2,86
22	509	2,14
23	481	3,76
24	593	1,76

Tabel 5.2 Digsilent programmiga arvatud pingekadu ja ühefaasiline lühisvool 20 – 25 A liitumiste korral

Tabelis 5.2 on kajastatud elektrivõrguga 20-25 A liitunud elektrienergia tarbijate pingekadu ning ühefaasilist lühisvoolu, mille tulemused on arvatud välja DIgSILENT tarkvara kasutades. Sarnaselt tabeliga 5.1 on tabeli 5.2 ühefaasiliste lühisvoolude tulemused kohati palju madalamad, kui seda on Simelect tarkvara tulemuste ning liitumispunktis mõõdetud tulemuste puhul. DIgSILENT tarkvaraga välja arvatud ühefaasiliste lühisvoolude puhul saab öelda, et kõik kaitseseadmed rakenduvad võimalikule lühisele ning tagatud on selektiivsus.

Tabelis 5.2 on ära kirjeldatud veel tarbijate pingekaod, mis samuti arvutati välja DIgSILENT tarkvara kasutades sarnaselt tabelile 5.1. Tabelis 5.2 välja toodud kõik pingekaod vastavad juhendis J3337 toodud nõuetele ehk ei ületa 6 protsendi piiri. Arvutuste käigus selgus, et enamasti on pingekaod vahemikus 1,43-2,87 protsent, Seevastu elektrienergia tarbija korral number 13, 14, 15, 19 ning 24 on pingekaod alla 2 protsendi piiri.

4.1.3 Digsilent programmiga arvatud ühefaasiline lühisvool ja pingekaod liitumiste 32 - 160 A korral

Tarbija	Ühefaasiline lühisvool, A	Pingekadu, %
25	1574	3,80
26	681	5,82
27	692	1,98
28	654	3,52
29	2256	1,57
30	348	7,26

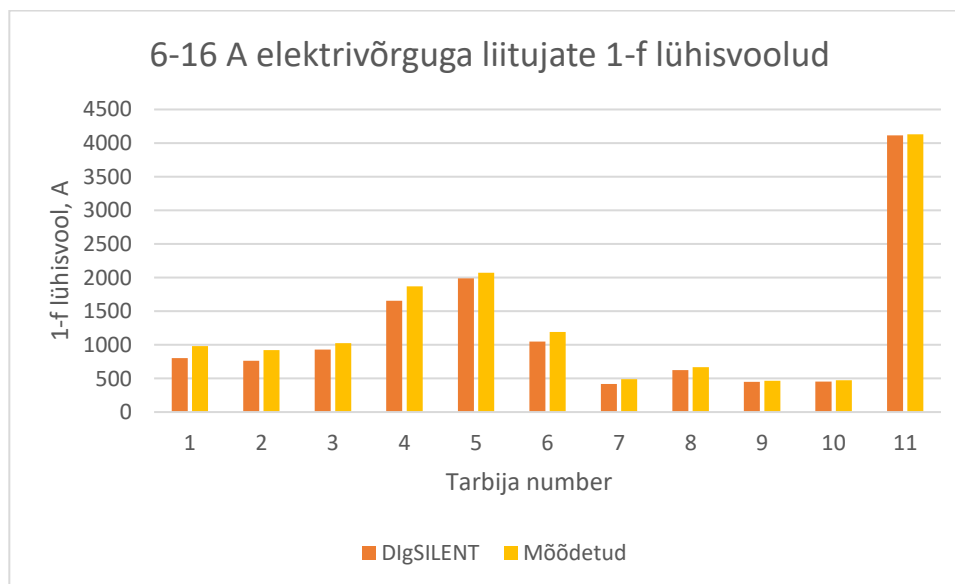
Tabel 5.3 Digsilent programmiga arvatud pingekadu ja ühefaasiline lühisvool 30 - 160 A liitumiste korral

Tabelis 5.3 on kajastatud sarnaselt eelnevale kahele tabelile tarbijate pingekadu ning ühefaasilist lühisvoolu, kus seekord on välja toodud DIgSILENT tarkvaraga saadud tulemused elektrivõrguga vahemikus 30-160 A liitunud elektrienergia tarbijad. Sarnaselt eelnevale kahele tabelile, kus DIgSILENT tarkvaraga saadud ühefaasiliste lühisvoolude tulemused olid palju madalamad võrreldes Simelect tarkvara tulemustele ning mõõtetulemustele liitumispunktis, esineb sarnane olukord ka antud arvutuste juures. Seevastu liitumiskilpidesse määratud peakaitsmed siiski reageerivad ühefaasilistele lühistele välja arvatud elektrienergia tarbijad number 30. Antud elektrivõrguga liitujate liitumiskilpides tuleks DIgSILENT programmi abil teostatud arvutuste põhjal kasutada B-karakteristikuga kaitselüliti C-karakteristikuga kaitselüliti asemel.

Tabelis 5.3 on sarnaselt eelnevale kahele tabelile samuti välja toodud pingekaod kõikide elektrienergia tarbijate kohta, mis tabelis nimetatud on. Antud tabelis välja toodud kõik pingekaod vastavad juhendis toodud 6 protsendi nõudele, mis eelneva kahe tabeli juures nimetatud on. Erandina ületab pingekao 6 protsendi nõuet elektrienergia tarbija number 30, kus pingekao väärtuseks DIgSILENT tarkvara kaasabil saadi 7,26 ehk sellest tulenevalt antud andmete põhjal tingimused ei ole täidetud. Selleks, et pingekadu antud tarbija puhul saada normide piiridesse, tuleks teostada tabeli 4.1 juures nimetatud võrgu rekonstrueerimine, milleks võib olla olemasoleva kaabli asendamine suurema ristlõikega kaabli vastu või 10/0,4 kV alajaamas paikneva trafo asendamine uue ning võimsama trafo vastu.

4.2 Digsilent tarkvaraga arvatud ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevus

4.2.1 Digsilent tarkvaraga ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevus 6-16 A elektrivõrguga liitujate korral



Joonis 4.2 DIGSILENT tarkvaraga arvatud ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevust iseloomustav graafik 6 - 16 A liitujate korral

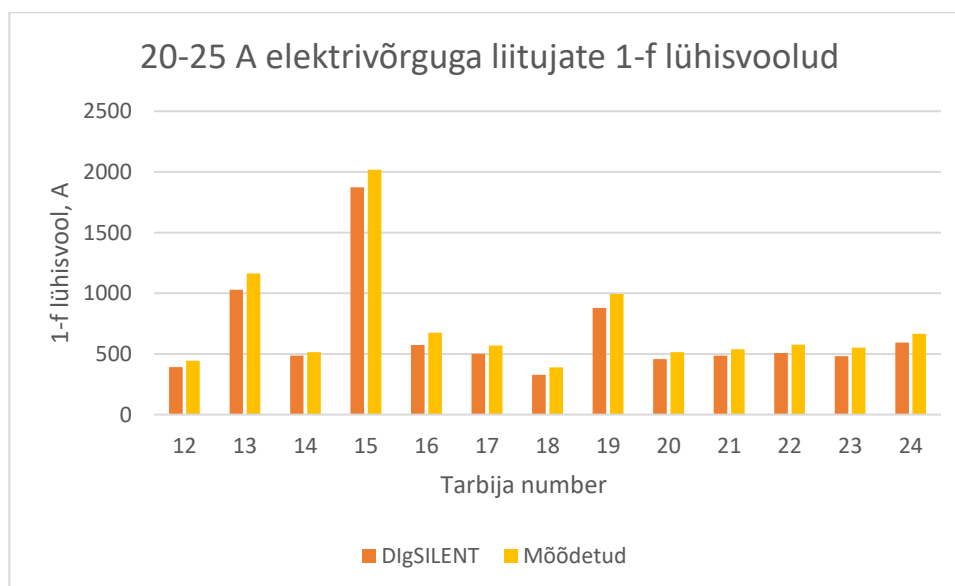
Joonisel 4.2 on toodud välja elektrivõrguga vahemikus 6-16 A liitunud tarbijate DIGSILENT tarkvaraga välja arvatud ning liitumispunktides kohapeal mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude omavaheline võrdlus. Tulemusi omavahel võrreldes selgub, et kõige rohkem omavahel ühtivad omavahel elektrienergia tarbija number 11 ühefaasilise lühisvoolu väärtused, mille väärtuseks DIGSILENT tarkvaraga saadi 4116 A ning mõõdetulemus liitumispunktis oli 4129 A ehk erinevus on 13 A. Lisaks antud tarbijale oli veel kõige täpsemad ühefaasiliste lühisvoolude väärtused tarbijate number 9 ja 13 puhul, kus DIGSILENT tarkvaraga arvatud tulemuste väärtused olid vastavalt 449 A ning 4116 A, seevastu mõõdetulemused olid 465 A ning 4129 A ehk omavahelised erinevused saadud tulemuste vahel olid vastavalt 16 A ning 13 A.

Kõige suuremad erinevused ühefaasilistes lühisvooludes DIGSILENT tarkvara ning mõõdetulemuste puhul jäid vahemikku 140-220 A. Kõige suurem omavaheline erinevus ühefaasilistel lühisvooludel esines tarbijal number 4, kus arvatud väärtuse tulemuseks saadi 1654 A, mõõdetulemus seevastu oli 1871 A. Ülejäänud tarbijate ühefaasiliste lühisvoolude omavahelised erinevused jäid vahemikku 20-100, kus antud

vahemikus kõige suurem erinevus oli elektrienergia tarbijal number 3 korral ning kõige väiksem erinevus oli seevastu tarbijal number 10 puhul.

Lisaks teostati veel mõõtevea analüüs ehk selgitati välja kas saadud tulemused jäävad mõõteriistale määratud vea piiridesse või mitte. Tulemuste analüüsi käigus selgus, et ligikaudu kolmandik ühefaasiliste lühisvoolude väärtustest erinevad mõõdetud tulemustest vahemikus 11,6-17,2 protsenti ehk saadud tulemused ei asu mõõtevea piirides. Seevastu kõige väiksemad erinevused olid tarbijatel 10 ning 11, mille erinevused olid mõlemal juhul vastavalt 0,3 protsenti ehk saadud väärtused jäävad mõõtevea piiridesse. Ülejäänud tarbijatel olid tulemuste erinevused mõõteriista suhtes vahemikus 3,4-9,5 protsenti ehk selle põhjal saab öelda, et tulemused ei ole soovitud mõõtevea piirides.

4.2.2 DigSILENT tarkavaraga ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevus 20-25 A elektrivõrguga liitujate korral



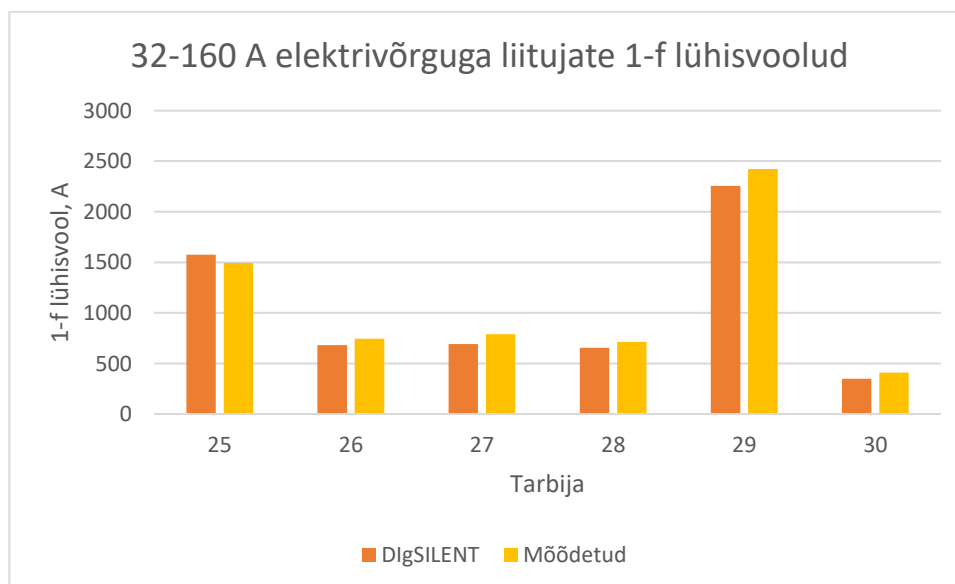
Joonis 4.3 DIGSILENT tarkvaraga arvatud ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevust iseloomustav graafik 20 - 25 A liitujate korral

Joonisel 4.3 on välja toodud elektrivõrguga vahemikus 20-25 A liitunud elektrienergia tarbijate ühefaasiliste lühisvoolude omavaheline võrdlus, mille andmed on saadud DIGSILENT tarkvara kasutades ning liitumispunktis mõõtmisi teostades. Kõige täpsem tulemus DIGSILENT tarkvara kasutades on saadud elektrienergia tarbija number 14 puhul, kus arvatud väärtuseks saadi 487 A, seevastu mõõtetulemuse väärtuseks on 515 A ehk erinevus kahe tulemuse vahel on 28 A. Sellele järgnes elektrienergia tarbija 17 ja 21, kus ühefaasiliste lühisvoolude omavaheline erinevus oli mõlemal juhul 53 A

ehk DIgSILENT tarkvaraga arvatud ning liitumispunktis mõõdetud tulemuse väärtused olid vastavalt 392 A ja 445 A ning 485 A ja 538 A. Kõige suurem erinevus ühefaasilise lühisvoolu tulemustel oli tarbijal number 15, kus DIgSILENT tarkvaraga saadi tulemuseks 1874 A, erinevus mõõdetulemusega oli 144 A ehk mõõdetulemuse väärtuseks oli 2018 A. Veel erines kõige rohkem omavahel tarbija number 13 ühefaasilised lühisvoolud, kus DIgSILENT tarkvaraga saadi lühisvoolu väärtuseks 1028, seevastu mõõdetulemuse väärtus oli 1162 A ehk erinevus oli 134 A. Ülejäänud elektrienergia tarbijate ühefaasiliste lühisvoolude omavahelised erinevused jäid vahemikku 56-102 A.

Sarnaselt selgitati jällegi antud tarbijate korral välja arvatud tulemuste erinevused mõõteriista suhtes, et teada saada, kui suur on lahknevus saadud tulemuste korral. Tarbijate, kes on liitunud elektrivõrguga vahemikus 20-25 A, arvatud tulemused on kõigil juhtudel suurema erinevusega mõõteriista väärtusest, kui see peaks olema. Enamik tulemuste erinevustest jäävad vahemikku 11,1-15,1 protsenti võrreldes mõõdetud tulemustega, seevastu kõige väiksemad erinevused jäävad 5-10 protsenti vahemikku. Antud tulemuste põhjal saab öelda, et tulemused ei ole täpsed, kuid annavad eelaimduse mõõdetava ühefaasilise lühisvoolu suhtes rajatava liitumiskilbi suhtes.

4.2.3 Digsilent tarkvaraga ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevus 32-160 A elektrivõrguga liitujate korral

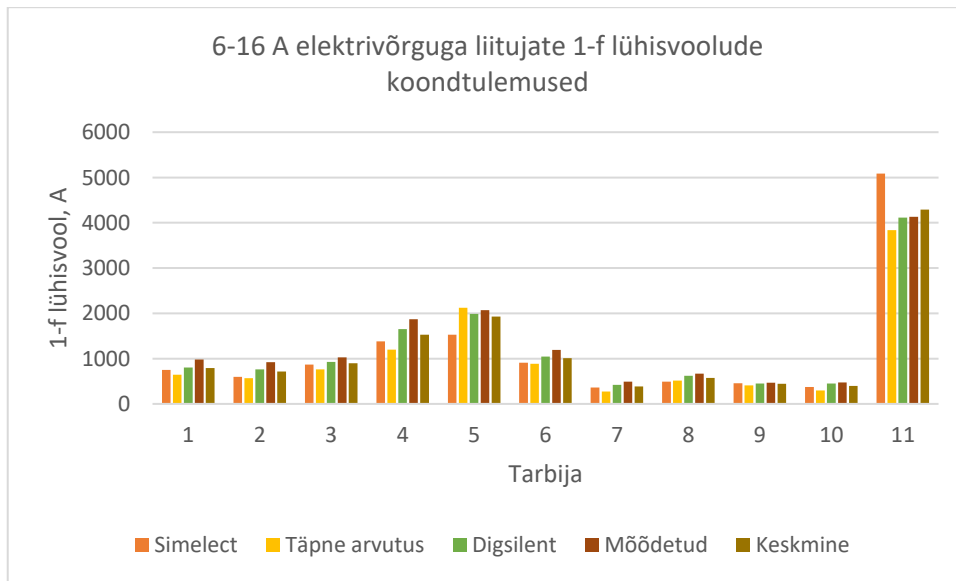


Joonis 4.4 DIgSILENT tarkvaraga arvatud ning liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevust iseloomustav graafik 32 - 160 A liitujate korral

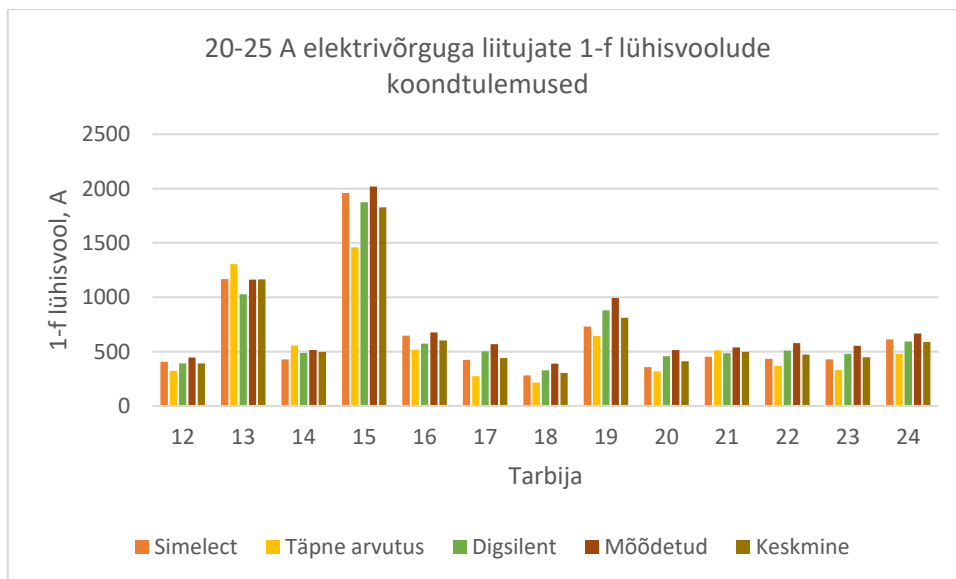
Joonisel 4.4 on välja toodud DIgSILENT tarkvara ning tarbija liitumispunktis mõõdetud ühefaasiliste lühisvoolude omavaheline võrdlus elektrienergia tarbijate kohta, kes on liitunud elektrivõrguga vahemikus 32-160 A. Kõige täpsemini arvatati välja ühefaasiline lühisvool elektrienergia tarbija number 28 puhul, kus DIgSILENT tarkvaraga saadi lühisvoolu tulemuseks 654 A ehk erinevus mõõtetulemuse suhtes oli 61 A, kuna liitumispunktis mõõdetud tulemuseks oli 409 A. Täpsuselt teine tulemus oli tarbija number 30 korral, kus DIgSILENT tarkvaraga arvatati ühefaasilise lühisvoolu väärtuseks 348 A ehk erinevus mõõtetulemuse suhtes oli 81 A, sest liitumispunktis saadud tulemus oli 1493 A. Seevastu kõige suurem lahknevus ühefaasilistel lühisvooludel omavahel oli elektrienergia tarbijal 29, kus DIgSILENT tarkvara ühefaasilise lühisvoolu väärtus oli 1457 ning mõõtepunktis mõõdetud ühefaasiline lühisvool oli 2421 A ehk erinevus oli 964 A. Peamise põhjusena saab välja tuua selle, et liitumiskilbi külge on ühendatud päikeseelektrijaam, mis päikese olemasolul samuti elektrivõrku elektrienergiat toodab ning seeläbi ka lühisvoolu väärtust tõstab, seejuures arvutustes päikeseelektrijaama mõju arvesse ei ole võetud. Ülejäänud elektrienergia tarbijate DIgSILENT tarkvara ning mõõtetulemuste omavaheline erinevus ühefaasilistel lühisvooludel jäi vahemikku 63-81 A.

Mõõtevea erinevuse analüüs teostati samuti vahemikus 32-160 A korral, et teada saada, kas arvatatud tulemused jäävad mõõteriista mõõtevea piiridesse või mitte. Analüüsi käigus selgus tõsiasi, et kõikide tarbijate välja arvatatud mõõtevea tulemused on suuremad, kui seda on kirjeldatud mõõteriista kataloogis. Kõige väiksem erinevus kahe tulemuse vahel on tarbija 25 korral, kus arvatatud väärtuse erinevus mõõtetulemuse suhtes on 5,4 protsenti. Seevastu kõige suurem erinevus on tarbija 29 korral, kus erinevuseks on ligikaudu 40 protsenti. Ülejäänud tarbijate korral jäävad erinevuste suurused vahemikku 8,4-14,9 protsenti.

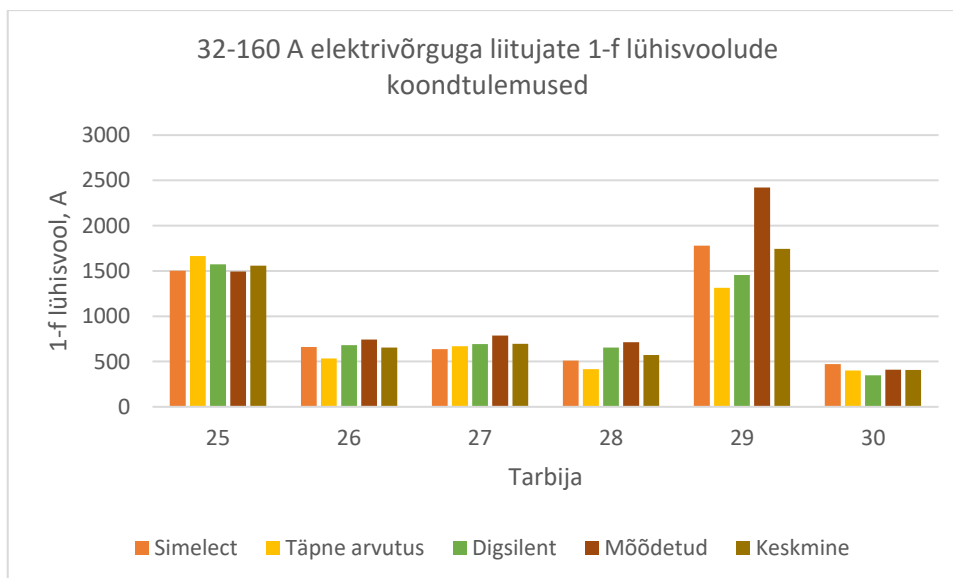
4.3 Teostatud arvutuste tulemuste analüüs



Joonis 4.5 6-16 A elektrivõrguga liitujate 1-f lühisvoolude koondtulemused



Joonis 4.6 20-25 A elektrivõrguga liitujate 1-f lühisvoolude koondtulemused



Joonis 4.7 32-160 A elektrivõrguga liitujate 1-f lühisvoolude koondtulemused

Joonisel 4.5, joonisel 4.6 ning joonisel 4.7 on kujutatud elektrivõrguga liitujaid vahemikus 6-16 A, 20-25 A ja 32-160 A liitunud tarbijate ühefaasiliste lühisvoolude koondtulemusi. Antud joonisel on välja toodud kõikide arvutusmeetodite ja mõõtetulemuste koondtulemused ning lisaks on ära kirjeldatud iga tarbija kohta saadud tulemuste keskmine. Kõikide arvutuste kohta saab ühiselt välja tuua selle, et arvutused on teostatud alates alajaamast väljuvast fiidrist kuni liitumiskilbini, mis tarbija kinnistule on rajatud. Seevastu mõõdetud tulemuste korral mõõteseadet võtab arvesse ka teisi tarbijaid, mis elektrivõrgus asuvad, mille mõju lühisvoolule on varasemalt välja toodud. Lisaks saab välja tuua veel selle, et kõikidel arvutustel on lühisvoolude korral sisestatud paigaldatava kaablitrassi hulk viie protsendilise varuga, sest paigaldatav kaabel tellitakse alati antud varuga, et olla kindel kaabli koguses. Hilisemate mõõtmiste käigus, kui on rajatud juba uus kaablitrass, siis on paigas ka trassi pikkus ehk sellest on tingitud teatavad erinevused tulemustes, mis on saavutatud arvutuste ning mõõtmiste kaudu.

Eelneva kolme graafiku põhjal saab öelda, et nii 6-16 A, 20-25 A ning 32-160 A elektrivõrguga liitujate korral arvutuste kaudu saadud tulemused annavad küll eelaimduse, et missuguses suurusjärgus ühefaasiline lühisvool rajatava liitumiskilbi juures olema peaks, kuid hilisemate mõõtmiste käigus selgub tihti see, et mõõteriistaga saadud väärtused erinevad sadades amprites. Seetõttu tulemuste võrdluses kajastub see, et suurem osa välja arvutatud ühefaasilistest lühisvooludest ei ole mõõteriista veapiirides, mis on kajastatud mõõteriista kirjelduse juures. Antud tulemuste põhjal saab öelda vaatluse all olevad arvutusmeetodid ei anna täpseid tulemusi, vaid annavad eeldatava väärtuse rajatava liitumiskilbi juures. Saadud

tulemuste põhjal saab küll valida välja vajaminevad kaitselülid ning sulavkaitsmed elektrivõrku, kuid määravaks saavad saadud tulemused sätteregeeritavate kaitselülite puhul, kus oluliseks teguriks on täpsus. Selle põhjuseks on juba eelnevalt nimetatud olukorrad ehk arvutuste teostamisel varu arvestamine rajataval kaablitrassil ja arvutuste teostamine alates alajaamast kuni rajatava liitumiskilbini. Lisaks saab veel välja tuua selle, et projekteerimise käigus lühisvoolude arvutamisel Simelect tarkvaraga tuleb välja olukord, kus arvutusprogrammis on puudu trafo andmed, mis alajaamas realsuses paikneb. Seetõttu esineb tihti ka olukord, kus lühisvoolude arvutused tuleb teostada teise tootja poolt toodetud trafoga. Sellest tulenevalt saab tuua näite olukorrast, kus ühefaasilise lühisvoolu välja arvutamisel puudusid Simelect tarkvarast andmed olemasoleva trafo kohta, seevastu oli valikus kolm erinevat samasuguse võimsusega ning lülitusgrupiga trafot, kuid sellest tingituna olid ühefaasilised lühisvoolud erinevad, mis kajastuvad siinkohal ka tulemuste võrdluses. Siiski saab siinkohal välja tuua selle, et igapäevaseks tööks on kõige mugavam siiski kasutada Simelect tarkvara erinevalt täpsete arvutuste meetodist ning DIgSILENT programmist, kuna programmi on lihtne andmeid sisestada ning tulemused saab koheselt. Siiski tasub tuua välja selle, et Simelectile oleks vaja sellest tulenevalt teostada arendaja poolt pidevalt uuendusi andmebaasis, et saadud tulemused oleks tulevikus mõõteriista vea piirides. Täpsete arvutuste meetod ning DIgSILENTi kasutamine on see eest rohkem ajakulukamad ning kuna mõlemal juhul tuleb esmalt andmed sisestada vastavalt Excelis olevasse valemisse või DIgSILENT programmis olevasse mudelisse. Seetõttu on oht sellele, et võivad tekkida saadud vastustes.

4.4 Peatüki kokkuvõte

Antud peatükis toodi välja DIgSILENT tarkvaraga teostatud arvutused ühefaasiliste lühisvoolude kohta igas liitumispunktis, mis vaatluse all on. Sellele järgnevalt kajastati DIgSILENT programmi abil saadud tulemusi. Analüüsi käigus kajastati veel seda, kas DIgSILENT programmiga saadud tulemused jäävad mõõteriista vea piiridesse või mitte. Antud peatükis kajastati veel kõikide tarbijate kohta saadud koondtulemusi ning toodi välja sellest tulenevalt põhjused, miks tulemused erinevad. Lisaks andis antud töö autor omapoolse soovitusel, millist meetodit on mõttekam kasutada igapäevaseks tööks elektrivõrkude projekteerimisel.

KOKKUVÕTE

Magistritöö eesmärgiks oli analüüsida omavahel ühefaasilis lühisvoole, mis on arvutatud Simelect arvutustarkvaraga, täpsed arvutused Microsoft Exceli kaasabil, DIGSILENT tarkvara kasutades, ning mis on mõõdetud liitumispunktis kohapeal. Selle tulemusel sooviti teada, millise arvutusmeetodiga on võimalik arvutada kõige täpsem ühefaasiline lühisvool võrreldes tarbija juures mõõdetud tulemusega. Teisalt võeti antud probleem vaatluse alla veel sellepärast, et see on seotud elektriohutusega ehk madalpingevõrgus esineb veel väga palju olukordi, kus väikese lühisvoolu tõttu kaitseseadmed lühisele ei rakendu. Seetõttu on tingitud olukorrad, kus esineb tuleõnnetusi tarbija elektripaigaldistes või rikkeid elektriseadmetes. Sellest tulenevalt on tingitud kaablite või erinevate elektriseadmete riknemine ning on suur oht inimese elule. Sellest tulenevalt pidas antud töö autor oluliseks uurida, kuidas olukorda elektrivõrgus parandada saaks. Lisaks oli töö autori enda soov teada ühefaasilise lühisvoolu arvutamise kohta ning üldiselt lühisvoolude kohta, kuna antud töö autor tegeleb igapäevaselt liitumiskilpide projekteerimisega madalpingevõrku, kus oluline osa on ka ühefaasiliste lühisvoolude arvutamisel.

Magistritöö esimeses osas oli välja toodud lühisvoolu iseloomustus, mis kirjeldab peamiselt lühise teket ning sellega kaasnevaid protsesse. Seejärel on kajastatud erinevaid lühise tüüpe, mis elektrivõrgus tekkida võivad. Iga lühise tüübi juures on ära kirjeldatud lühise tekkimise protsessi. Lisaks on välja toodud faaside voolude ning pingete olukord enne ja pärast lühist.

Töö teises osas on esmalt välja toodud, mille põhjal toimub kaitseseadmete valik madalpingevõrku, kuna antud seadmed katkestavad lühise tekkimisel vooluahela. Peale selle on ära kirjeldatud liitumiskilbi ehituslik pool ning madalpinge võrgus kasutusel olev juhistiküsteem. Peamise osana oli antud peatükis välja toodud esmalt kõigi elektrivõrguga liitunud tarbijatega seotud elektriseadmed, kuna antud seadmed on peamiselt vaatluse all lühisvoolude arvutamise pool. Sellele järgnevalt on kategooriate kaupa välja toodud elektrivõrguga liitunud iga tarbija pingekadu ning ühefaasiliste lühisvoolude tulemused, mis on välja arvutatud Simelect tarkvara kaasabil. Samuti on välja toodud eelnevalt nimetatud tarbijate kohta rikkesilmuse ning ühefaasiliste lühisvoolude tulemused, mis on mõõdetud liitumispunktis. Teostatud veel eelnevalt nimetatud tulemuste vahel omavaheline analüüs, et saada teada ühefaasiliste lühisvoolude kokkulangevus.

Töö kolmandas osas on teostatud ühefaasiliste lühisvoolude ning pingekadude täpsed arvutused, mis on teostatud Microsoft Exceli kaasabil. Sellest tulenevalt on näitena

välja toodud arvutuste teostamise käik, mis kirjeldab lühisvoolu ning pingekao arvutamist kõikide tarbijate puhul. Samuti on välja toodud kategooriate kaupa ühefaasilised lühisvoolud ning pingekaod kõikide elektrienergia tarbijate kohta. Sellele järgnevalt on teostatud samuti omavaheline võrdlus täpselt teostatud arvutuste kohta ning liitumispunktis mõõdetud tulemuste kohta, et teada saada kokkulangevus antud tulemuste vahel.

Magistritöö neljandas ning viimases osas on välja toodud ühefaasiliste lühisvoolude arvutamine DIgSILENT tarkvaraga, kus arvutuste tulemused on samuti kategooriate kaupa välja toodud. Eelnevalt on ära kirjeldatud, kuidas on DIgSILENT tarkvaras olevale töölauale loodud mudel alates 10/0,4 kV alajaamast kuni madalpingevõrgus liitunud elektrienergia tarbijaga. Antud ühefaasiliste lühisvoolude tulemusi on seejärel samuti võrreldud liitumispunktis mõõdetud tulemustega, kus on välja toodud tulemuste kokkulangevus üksteise suhtes. Peale selle on teostatud veel saadud tulemuste kohta analüüs.

Elektriohutuse vaatepunktist tuleb edaspidistes projektides veel rohkem tähelepanu pöörata olemasoleva elektrivõrgu rekonstrueerimisele lisaks liitumiskilpide paigaldamisele. Olemasoleva magistritöö käigus on välja toodud erinevaid elektrivõrguga liitujaid, kus on selgelt näha teatud tarbijate puhul, et alates alajaamast kuni liitumiskilbini on kasutusel mitmeid erinevaid elektrijuhtide tüüpe, kus ristlõiked on varieeruvad. Sellest tulenevalt tuleks edaspidistes investeeringutes raha suunata kaablitrasside uuendamisse, et seeläbi ühtlustada juhtide ristlõikeid ning seejuures suurendada ühefaasiliste lühisvoolude väärtusi. Erilist tähelepanu tuleb pöörata õhuliinide koridoridele, kus kasutusel on veel paljasjuhtmeline õhuliin ehk selle asemel tuleks paigaldada uued õhukaablid, mille abil paraneb nii eelnevalt mainitud lühisvoolude tulemused, kuid seeläbi on ka suurem kindlus rikete vastu. Lisaks tasub veelgi enam raha investeerida tulevikus alajaamade rekonstrueerimisse, mille käigus on võimalik asendada olemasolevad elektripaigaldised uute vastu. Selle käigus on võimalik läbi uue trafo paigaldamisega suurendada lühisvoolu väärtust ning olemasolevate kaitseseadmete asendamisega uute vastu on võimalik suurendada ohutust elektrivõrgus, kuna on kasutusel seadmeid, mis on amortiseerunud ning millega ei pruugi olla tagatud lühisele rakendumine.

SUMMARY

The task of master's thesis was analyze single-phase short-circuit current, which was calculated with Simelect computing software, manually with Microsoft Excel, with DIgSILENT software and measured at the connection shield. Also the problem was taken into consideration, because it is related to electrical safety, there are still many situations in the low-voltage network, where protective devices will not apply due to a small short-circuit current. This is the main reason, why those situations are taking place at consumer's electrical installations and at electrical devices. As a result, cables or various electrical devices are damaged and there is great danger to human life. Consequently, the author of this paper considered it important to investigate how the situation in the electricity network could be improved. As a result, the author of master's thesis wanted to know which calculation method will give the most accurate results compared measurement data. In addition the author of master's thesis wanted more to know about short circuit currents, because the compiler of work to deal with the desing of connection shield for the low-voltage network on daily basis.

In the first part of master's thesis was brought out specification of short-circuit, which describe mainly the occurrence of short circuit and accompanying processes. After that was brought out different types of short circuits, what can happen in the electrical network. At the every type of short circuit was brought out, how the short circuit will form. Also there were brought out the phase voltage and phase current situations before and after the short circuit.

The second part of master's thesis firstly was brought out, how to choose protection devices to low-voltage network, beacuse these devices will the circuit after the occurrence of a short circuit. After that there is description of connection shield and guidance system. The main part of this chapter were brought out all devices, which is related with low-voltage network and short circuit. After that are mentioned by categories the consumers of electrical energy results of voltage drop and single-phase short-circuit, which is calculated with Simelect computing software. Also there are brought out results of fault loop and single-phase short-circuit, which are measured at the connection shield. After that there is done analysis between Simelect computing software results and measurement data to get know the differences of these results.

The third part of master's thesis was carried out calculations manually about single-phase short-circuit current with Microsoft Excel. According to this there is example of these calculations, which will describe calculations of short circuit and voltage drop for all of electrical energy consumers. Also there are mentioned by categories the

consumers of electrical energy results of voltage drop and single-phase short-circuit, which is calculated by manually with Microsoft Excel. At the end is done again the analysis of results to get know the differences of calculation results and measurement data.

The fourth and last part of master's thesis is brought out calculations of single-phase short-circuit current with DIgSILENT software, where results of calculations are categorized by results. Previously, there is described, how the model is created in DIgSILNET software from 10/0,4 kV substation to connection shield at low-voltage network. The single-phase short-circuit current results are compared with measurement data at connection shield. After that there are done analysis of results.

From the point of view of electrical safety, in future projects even more attention must be paid to the reconstruction of the existing electrical network in addition to the installation of connection shields. In the course of the existing master's thesis, various connectors to the electrical network have been identified where it is clearly visible for certain consumers that, from the substation to the connection shield, several different types of electrical conductors are used, with varying cross-sections. As result, in future investments, money should be directed to the renewal of cable routes in order to standardize the cross-sections of conductors and thereby increase the values of single-phase short-circuit currents. Special attention must be paid to overhead line corridors, where there is still a bare overhead line in use, new overhead cables should be installed instead, which will improve the results of the short-circuit currents mentioned earlier, but also provide greater safety against failures. In addition, it is worth investing even more money in the reconstruction of substations in the future, during which it will be possible to replace the existing electrical installations with new ones. In the process, it is possible to increase the value of the short-circuit current by installing a new transformer and by replacing the existing protection devices with new ones, it is possible to increase the safety in the electrical network, since there are devices in use that have depreciated and may not be guaranteed to be short-circuited.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt, J. Kilter, „Jaotusvõrgud“, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2007
- [2] Simelect, Kasutusjuhend – Versioon 4.2.0 [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.simelect.ee/Kasutusjuhend.pdf> [Kasutatud 29.01.2023]
- [3] R.Rebane, A. Mazikas, „Juhend toite automaatset väljalülitamist tagavate nõuete rakendamiseks madalpinge elektripaigaldistes. Kaitseseadmete valik“, Elektrilevi OÜ, 2022.
- [4] AS Harju Elekter Elektrotehnika, Kaabel- ja jaotuskilbid HETR, [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://harjuelekter.com/wp-content/uploads/2021/01/tooteleht_hetr_veeb_est.pdf [Kasutatud 25.02.2023]
- [5] „Fault Types“, Valence Electrical Training Services LLC, [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://relaytraining.com/updatefiles/TRTH-A_38-46.pdf [Kasutatud 27.02.2023]
- [6] „Phase-to-Phase-to-Ground Faults“, Valence Electrical Training Services LLC, [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://relaytraining.com/updatefiles/TRTH-Ae_46.pdf [Kasutatud 01.03.2023]
- [7] G. Matt, „Madalpinge liitumiskilpide paigaldusviiside võrdlus“, Tartu, Eesti Maaülikooli Energeetika osakond, 2017.
- [8] K-Martin. Põldsam, „Mõnuvere alajaama võrgupiirkonna elektrivarustuse rekonstruktsioon“, Tartu, Eesti Maaülikooli Energiakasutuse õppetool, 2018.
- [9] Ü.Treufeldt, „Lühised elektrisüsteemides“, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Raamatukogu, 2002.
- [10] AS Draka Keila Cables, Tootekataloog, [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://petz.planet.ee/elekter/varia/Draka_Catalogue_EST.pdf [Kasutatud 09.03.2023]
- [11] J.Lepa, K.Jürgenson, „Energiavarustus“, Tartu: Eesti Põllumajanduslikülikool, 2000.
- [12] R. Kasuk, „Torma valla Vanamõisa piirkonna elektrivarustuse rekonstruktsioon“, Tartu, Eesti Maaülikooli Tehnikainstituut, 2012.
- [13] Nexans, AXMK PE 1 kV 4G50 SM, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.nexans.fi/en/products/Power-cables-1-145-kV/LV-power-cables-1-kV/Aluminium-cables/AXMK-PE-1k25337/product~35015098~.html#> [Kasutatud 26.03.2023]
- [14] Nexans, AXMK PE 1 kV 4G120 SM, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.nexans.fi/en/products/Power-cables-1-145-kV/LV-power-cables-1-kV/Aluminium-cables/AXMK-PE-1k25337/product~35032598~.html> [Kasutatud 26.03.2023]

- [15] R. Armas, S. Hunt, „Planeerimise põhimõtted“, Elektrilevi OÜ, 2023
- [16] L. Zvorovski, „Madalpinge kaitsmete rakendumiskarakteristikud lühisele rakendumisel“, Enefit Connect OÜ, 2021.
- [17] R. Teemets, „Kaitseülilid“, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Elektriagamite ja jõuelektroonika instituut, 1994.
- [18] Eesti Standardikeskus, „Lühisvoolud kolmefaasilistes vahelduvvoolusüsteemides Osa 0: Voolude arvutamine“, 2016
- [19] S. Vihtol, „Tallinnas Preesi tänava elektrivõrgu rekonstrueerimine tarbimiskohtade üleviimiseks 3x220 V pingesüsteemilt 3x230/400 V pingesüsteemile“, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituut, 2015
- [20] Simelect, „Vahendid-Andmebaas“, Simelect OÜ, 2022
- [21] Eesti Standardikeskus, „Avalike elektrivõrkude pinge tunnussuurused“, 2019
- [22] „Võru kortermajas süttis elektrikilp“, Lõunaeestlane, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://lounaeestlane.ee/voru-kortermajas-suttis-elektrikilp/> [Kasutatud 17.01.2024]
- [23] „Eurotest 61557 MI 2086 User Manual“, METREL, [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.metrel.si/assets/Metrel/Navodila_instrumentov/Instruments/MI_2086_Eurotest_61557/Ang/MI_2086_Eurotest_ANG_Ver_4.3_20_750_719.pdf [Kasutatud 01.02.2024]
- [24] T. Lehtla, T. Vinnal, H. Mölder, M. Jarkovoi, K. Janson, R. Teemets, „Madalpingefiidrite kaitserakendumise kaardistamine ja olukorra analüüs ettevõttes Elektrilevi OÜ ning soovitatavad meetmed ohutuse taseme tagamiseks“, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli elektrotehnika instituut, 2016
- [25] T. Post, „Jaotusvõrgus esinevate rikete mõju uurimine tarbijate pingetele programmiga PSCAD“, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituut, 2015
- [26] M. Leht, „Kommutatsiooniprotsessi analüüs“, Tartu, Eesti Maaülikooli Tehnikainstituut, 2021.
- [27] „Madalpingekaitsme ehitus ja tüübid“, [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://petz.planet.ee/elekter/varia/3_2_Sulavkaitsmete_ehitus_ja_tyybid.pdf [Kasutatud 31.03.2024]