



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**MAA KAUDU KULGEVATE LÜHISVOOLUDE
LEIDMINE ÕHULIINIDE ÜHEFAASILISTE
LÜHISTE KORRAL LÄHTUDES STANDARDIST
EVS-EN 60909-3:2010**

**FINDING THE SHORT-CIRCUIT CURRENTS FLOWING
THROUGH EARTH IN CASE OF SINGLE-PHASE SHORT-
CIRCUITS OF OVERHEAD LINES BASED ON THE
STANDARD EVS-EN 60909-3:2010**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Hugo Kelt

Üliõpilaskood: 205941EAAB

Juhendaja: Ülo Treufeldt, Kõrgepingevõrkude
peaspetsialist

Tallinn 2023

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.

"18" mai 2023

Autor: Hugo Kelt

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"18" mai 2023

Juhendaja: Ülo Treufeldt

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Hugo Kelt

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Maa kaudu kulgevate lühisvoolude leidmine õhuliinide ühefaasiliste lühiste korral lähtudes standardist EVS-EN 60909-3:2010,

mille juhendaja on Ülo Treufeldt,

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.

18.05.2023

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

Autor: Hugo Kelt

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Maa kaudu kulgevate lühisvoolude leidmine õhuliinide ühefaasiliste lühiste korral lähtudes standardist EVS-EN 60909-3:2010

Kuupäev: 18.05.2023

56 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): Ülo Treufeldt, Kõrgpingevõrkude peaspetsialist

Töö konsultant (konsultandid):

Sisu kirjeldus:

Käesoleva lõputöö eesmärgiks on luua tulevastele lühiste õppeaine (AEK0240) üliõpilastele või lühiste arvutamisele kokku puutuvatele elektroenergeetikutele täiendav loengu- ja õppematerjal läbi maa kulgevate lühisvoolude arvutamiseks õhuliinis esinevate ühefaasiliste lühiste korral lähtudes standardist EVS-EN 60909:3-2010.

Töö on jaotatud neljaks põhiosaks, mis annavad ülevaate teoreetilistest ja arvutuslikest alustest läbi maa kulgevate lühisvoolude arvutamiseks kõrgepinge alajaama sisese ühefaasilise lühise korral, alajaamast kaugel asuval õhuliini mastil esineva ühefaasilise lühise korral ning alajaama lähedasel õhuliini mastil aset leidva ühefaasilise lühise korral. Lisaks käsitletakse keskpingeõrgu õhuliinil esineda võivat kaksikmaaühendusriket.

Teoreetiliste teadmiste ja arvutusoskuste kinnistamiseks on koostatud näiteülesanded, kasutades Eesti elektrivõrgule iseloomulikke lähteandmeid. Arvutused on tehtud parameetrite kompleksarvuliste väärtustega, mistõttu on arvutamise lihtsustamiseks kasutatud numbrilist andmetöötlustarkvara MATLAB. Töö tulemustest selgus, et keskpingeõrgu lõpmatu suur nulljärgnevustakistus muutub kaksikmaaühendusrikke korral lõpliku väärtusega takistuseks ja nulljärgnevuslühisvoolud saavad sulguda läbi maa. Lisaks selgus, et ühefaasilisel lühisel keskpingeõrgus kujunevad maaühendusvoolud ja maaühenduspotentsiaalid on alajaama lähedasel õhuliini mastil aset leidva lühise korral suuremad kui alajaama sisese lühise korral.

Märksõnad: osalühisvoolud, ülimööduvad lühisvoolud, maapotentsiaalid, maaühendusvoolud, piksekaitsetrossi vähendustegurid, päri-, vastu-, nulljärgnevustakistused, kaksikmaaühendusrikked.

ABSTRACT

<i>Author:</i> Hugo Kelt	<i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis
<i>Title:</i> Finding the short-circuit currents flowing through earth in case of single-phase short-circuits of overhead lines based on the standard EVS-EN 60909-3:2010	
<i>Date:</i> 18.05.2023	56 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Ülo Treufdelt, Chief specialist of high-voltage networks	
<i>Consultant(s):</i>	
<i>Abstract:</i> <p>The purpose of this thesis is to create additional lecture and study material for future students of short-circuit courses (AEK0240) or electrical engineers who deal with short-circuit calculations. Thesis gives an overview of theoretical base for finding short-circuit currents flowing through earth in the case of single-phase short-circuits of overhead lines based on the EVS-EN 60909:3-2010 standard.</p> <p>Thesis is divided into four main parts, which provide an overview of the theoretical and computational foundation for calculating short-circuit currents flowing through earth in the case of a line-to-earth short-circuit inside a substation, line-to-earth short-circuit outside a substation and line-to-earth short-circuit in the vicinity of a substation. In addition, the two separate simultaneous line-to-earth short circuits phenomenon that can occur on the medium-voltage network overhead lines is also addressed.</p> <p>To reinforce the theoretical and computational material, sample exercises have been prepared, selecting input data, which is relevant for the Estonian power grid. Calculations were performed using complex number values, which required the use of numerical data processing software MATLAB to simplify the calculations. As a result of the thesis, it was found that total currents through earth and earth potential at the substation are higher in the case of a single-phase short-circuit in the vicinity of a substation than in the case of a single-phase short-circuit within the substation. In case of two separate simultaneous line-to-earth short-circuits happening on the medium-voltage network overhead lines the theory proved that the infinite zero-sequence impedance of the medium-voltage network becomes finite and zero-sequence short-circuit currents can close through the ground.</p>	
<i>Keywords:</i> partial short-circuit currents, initial short-circuit currents, earth potential, current to earth, reduction factors for overhead lines, positive-, negative- and zero-sequence impedances.	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Maa kaudu kulgevate lühisvoolude leidmine õhuliinide ühefaasiliste lühiste korral lähtudes standardist EVS-EN 3:2010.**

Lõputöö teema inglise keeles: **Finding the short-circuit currents flowing through earth in case of single-phase short-circuits of overhead lines based on the standard EVS-EN 60909-3:2010.**

Üliõpilane: **Hugo Kelt, 205941EAAB**

Eriala:

Lõputöö liik: **bakalaureusetöö**

Lõputöö juhendaja: **Ülo Treufeldt**

Lõputöö ülesande

kehtivusaeg: **2022/2023 Kevad**

Lõputöö esitamise tähtaeg: **18.05.2023 kell 15:00**

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Elektrivõrkudes esinevatest lühistest on enamik ühefaasilised lühised. Ühefaasiliste lühiste korral sõltub lühisvoolude suurus oluliselt nulljärgnevusvoolude võimalikest kulgemisteedadest ja nendel teekondadel esinevatest nulljärgnevustakistustest. Liinide nulljärgnevusvoolude teekonnad sulguvad läbi maa ja liiniga rööpsete juhtivate kontuuride, nagu näiteks maandatud piksekaitsetrossid õhuliinidel ja metallkestad kaablitel. Seetõttu on õhuliinide ühefaasiliste lühiste korral oluline osata arvutada maa kaudu sulguvaid osalühisvoolusid ja hinnata piksekaitsetrosside mõju nende suurusele.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärk on luua üliõpilastele aines lühised (AEK0240) täiendav käepärane õppematerjal, mis sisaldab ühefaasilisel lühisel maa kaudu kulgevate osalühisevoolude arvutamise teooriat ja näitearvutusi ning võib kasulik olla ka lühiste arvutamisega kokku puutuvatele elektroenergeetikutele.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Maavoolude leidmisega seotud terminoloogia ja määratlused.
- Pinnase eritakistuste mõju õhuliinide nulljärgnevustakistustele.
- Kahekordne lühis isoleeritud või resonantsmaandatud keskpinge võrgus.
- Ühefaasiliste lühiste erijuhtumid kõrgepingeliinidel.
- Näidisülesannete koostamine ja lahendamine.

4. Lähteandmed

Lähteandmed saab allpool toodud kirjandusallikatest ning elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudist.

5. Uurimismeetodid

Kirjandusallikatega tutvumine. Standardi EVS-EN 60909-3:2010 tõlkimine, selgitamine ja sidumine olemasolevate lühiste loengukonspektide asjakohaste osadega. Arvutusnäidete ülesannete koostamine, kasutades Eesti elektrisüsteemi tüüpiliste elementide parameetreid. Näiteülesannete lahendamine koos vajalike selgitustega. Töö põhilised vahendid on valemid. Arvutuste jaoks kasutada Exceli tarkvara.

6. Graafiline osa

Liinide skeemid ja aseskeemid. Graafiline osa esineb töö põhiosas tekstijoonistena.

7. Töö struktuur

Sisukord

Lõputöö ülesanne

Eessõna

1. Sissejuhatus

2. Ülevaade ühefaasiliste lühisvoolude kulgemisest õhuliinides

2.1 Terminid ja definitsioonid

2.2 Maavoolude kujunemine

2.3 Õhuliinide nulljärgnevustakistused

3. Kaksikmaaühendusriike keskpingevõrkudes

3.1 Ülimööduva lühisvoolu arvutamine

3.2 Löökvoolu, lahtusvoolu ja püsilühisvoolu arvutamine

3.3 Arvutusnäited

4. Ühefaasilised lühised kõrgepingeliinidel

4.1 Maandused kõrgepingevõrkudes

4.2 Ahelimpedantsi leidmine

4.2 Osalühisvoolude leidmine alajaamas toimuva lühise korral

4.3 Osalühisvoolude leidmine alajaamast eemal toimuva lühise korral

4.4 Osalühisvoolude leidmine alajaama läheduses toimuva lühise korral

4.5 Maapinna potentsiaal lühisekoha läheduses

4.6 Arvutusnäited

5. Kokkuvõtte

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Raamatud, standardid, konspektid

1. Treufeldt, Ü. Lühised elektrisüsteemides. TTÜ. Elektroenergeetika instituut. 2002. 158 lk.

2. Meldorf, M. jt. Jaotusvõrgud. Tallinn. 2007. 546 lk.

3. Uljanov, S. A. Elektromagnitnõje perehodnõje protsessõ v elektritcheskih sistemah, "Energia"; Moskva; 1970, 519 s.

4. EVS-EN 60909-0:2016 Lühisvoolud kolmeefaasilistes vahelduvvoolu-süsteemides – Osa 0: 2017, 78 lk.

5. EVS-EN 50522:2022 Üle kV nimivahelduvpingega tugevvoolupaigaldiste maandamine. 84 lk.

6. EN 60909-3:2010. Short-circuit currents in three-phase a.c systems – Part 3: Currents during two separate simultaneous line-to-earth short-circuits and partial short-circuit currents flowing through earth (IEC 60909-3:2009), 58 pp.
7. IEC TR 60909-2:2008, Short-circuit currents in three-phase ac systems – Data of electrical equipment for short-circuit current calculations, 48 pp.
8. Treufeldt, Ü. Lühised. Loengukonspekt. 2022, 119 lk.

9. Lõputöö konsultandid

Puuduvad.

10. Töö etapid ja ajakava

- Kirjanduse läbitöötamine ja standardi EVS-EN 60909-3:2010 asjakohaste osade tõlkimine (20.03.2023)
- Teoreetilise osa kirjutamine (03.04.2023)
- Arvutusnäidete koostamine ja lahendamine: (14.04.2023)
- Kokkuvõtte kirjutamine ja lõplik vormistamine (21.04.2023)
- Juhendajale läbilugemiseks saatmine (21.04.2023)
- Lõputöö esitamine eelkaitsmiseks (24.04.2023)
- Paranduste sisseviimine (08.05.2023)
- Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine (08.05.2023)
- Töö lõplik versioon valmis (15.05.2023)
- Töö esitamine (18.05.2023 kuni kella 15:00-ni)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	12
SISSEJUHATUS	13
1 TERMINID JA MÄÄRATLUSED	14
2 MAAÜHENDUSVOOLUDE KUJUNEMINE	19
3 ÕHULIINIDE KAKSIMAAÜHENDUSRIKKE KORRAL ESINEVATE VOOLUDE ARVUTAMINE	22
3.1 Ülimööduva lühisvoolu efektiivväärtus	22
3.1.1 Päri- ja vastujärgnevussüsteemi vastastikused impedantsid	23
3.1.2 Kaksikmaaühendusrikke lihtsamad juhtumid	23
3.2 Löökvoolu, lahutusvoolu ja püsilühisvoolu arvutamine	24
3.3 Voolude jagunemine kaksikmaaühendurikkel	24
4 LÄBI MAA KULGEVATE OSALÜHISVOOLUDE ARVUTAMINE KÕRGEPIINGEVÕRKUDES	26
4.1 Ühefaasiline maalühis alajaamas	26
4.2 Alajaamast kaugel paiknev ühefaasiline maalühis	27
4.3 Ühefaasiline maalühis alajaama läheduses	30
5 ÕHULIINI TAKISTUSTE ARVUTAMINE	32
5.1 Õhuliini päri- ja vastujärgnevustakistused	32
5.2 Õhuliini nulljärgnevustakistused	33
5.3 Õhuliini faasijuhtmete vaheline keskmine geomeetiline vahekaugus	35
6 PIKSEKAITSETROSSIGA ÕHULIINI VÄHENDUSTEGUR.....	37
6.1 Õhuliinide vähendustegurite väärtused sagedusel 50Hz	39
7 ARVUTUSNÄITED	40
7.1 Keskpingevõrgus esineva kaksikmaaühendusrikke lühisvoolude arvutamine ühepoolse toitega õhuliinil	40
7.1.1 Lähteandmed	40
7.1.2 Arvutused	41
7.2 Läbi maa sulgivate osalühisvoolude arvutamine kõrgepingevõrgus	42
7.2.1 Lähteandmed	42
7.2.2 Ühefaasiline lühis alajaamas	44
7.2.3 Alajaamast kaugel asuval õhuliini mastil T toimuv ühefaasiline lühis	47
7.2.4 Ühefaasiline lühis alajaama lähedal asuval õhuliini mastil T	50

KOKKUVÕTE	54
KASUTATUD KIRJANDUS	56

EESSÕNA

Lõputöö teema „Maa kaudu kulgevate lühisvoolude leidmine õhuliinide ühefaasilise lühise korral lähtudes standardist EVS-EN 60909-3:2010“ valisin elektrisüsteemide uurimisrühma poolt välja pakutud bakalaureuseõppe lõputööde temade pakkumiste seast.

Täna lõputöö juhendajat Ülo Treufeldt'i, kõrgepingevõrkude peaspetsialisti, kes oli suureks abiks bakalaureusetöö juhendamisel ja suurepärasel konsulteerimisel.

SISSEJUHATUS

Lühised on elektrivõrgus üheks levinumaks rikketüübiks. Käesolev lõputöö uurib standardis EVS-EN 60909-3:2010 käsitletavaid teoreetilisi aluseid ning arvutusmeetodeid maa kaudu kulgevate lühisvoolude leidmiseks elektrivõrgus esineda võivate lühiste korral. Lõputöö eesmärgiks on standardi EVS-EN 60909:3-2010 tõlkimine ning kohandamine, mis võimaldab lõputöös käsitletavaid teoreetilisi ja arvutuslike aluseid kasutada lisamaterjalina õppeaines lühised AEK0240.

Lõputöös on peatähelepanu pööratud neljale põhiteemale:

- 1.) Teoreetilised alused õhuliinides esineva kaksikmaaühendusrikke korral esinevate voolu arvutamiseks.
- 2.) Teoreetilised alused läbi maa kulgevate osalühisvoolude arvutamiseks asümmeetriliste lühiste korral.
- 3.) Teoreetilised alused õhuliinide päri-, vastu- ja nulljärgnevustakistuste arvutamiseks.
- 4.) Maa kaudu kulgevate lühisvoolude arvutusnäited õhuliinides esinevate ühefaasiliste lühiste korral, kasutades Eesti elektrivõrgu elementide asjakohaseid andmeid.

Lõputöö esimeses osas käsitletakse õhuliinides esineva kaksikmaaühendusrikke ülিমööduvate lühisvoolude, löökvoolu ja lahutusvoolu arvutamist ning lühisvoolude jagunemist maapinna ja muude juhtivate kontuuride vahel. Antakse ülevaade maaühendusvoolude kujunemisest ja tuuakse välja kaks kaksikmaaühendusrikke lihtsamat juhtumit.

Teises osas vaadeldakse läbi maa kulgevate osalühisvoolude arvutamist kõrgepingevõrgus õhuliinidega seotud ühefaasiliste lühiste korral. Teoreetiline osa on jagatud sõltuvalt lühise asukohast kolmeks alapeatükiks: ühefaasiline lühis alajaamas, alajaamast kaugel asuval õhuliini mastil ning alajaama lähedasel õhuliini mastil.

Töö kolmandas osas koostatakse teoreetilise osa selgitamiseks arvutusnäited koos lahendustega lähtudes standardi EVS-EN 60909:3-2010 arvutusmeetodikast kasutades lähteandmetena Eesti elektrivõrgu iseloomulike elementide parameetreid. Arvutusnäited on koostatud nii keskpinge- kui ka kõrgepingevõrgu jaoks. Kompleksarvuliste arvudega arvutamise lihtsustamiseks on kasutatud numbrilist andmetöötlustarkvara MATLAB.

1 TERMINID JA MÄÄRATLUSED

Valemities kasutatavad suurused:

$c \frac{U_n}{\sqrt{3}}$ – ekvivalentne elektromotoorjõud;

D_F – lühise koha F kaugus alajaamast;

d_T – kahe õhuliinimasti vaheline kaugus;

$d_{L1 L2}$ – kahe õhuliini faasijuhtme vaheline kaugus;

$d_{Q1 Q2}$ – kahe piksekaitsetrossi vaheline kaugus;

I_{bEE} – lahutusvool kahekordse maarikke korral;

I_E – maaühendusvool;

I_{EBn} – alajaama maaühendusvool kui lühis toimub alajama läheduses oleval õhuliinimastil;

I_{EBtot} – alajaamas B toimuva ühefaasilise maalühise kogu maaühendusvool;

I_{ETn} – õhuliinimasti maaühendusvool kui lühis toimub alajaama läheduses oleval õhuliinimastil n;

I_{ETtot} – kogu maaühendusvool alajaamast kaugel asuval lühistatud õhuliinimastil T;

I''_{kEE} – ülimööduva lühisvoolu efektiivväärtus kaksikmaaühendusrikke korral;

I''_{kE2E} – ülimööduv maaühendusvool kahefaasilise maalühise korral;

$I_{E\delta}$ – läbi maa kulgev osalühisvool;

I_Q – piksekaitsetrossi läbiv vool;

I_T – läbi õhuliinimasti takistuse R_T sulguv osalühisvool;

i_{pEE} – kaksikmaaühendusrikke löökvool;

$M_{(1)}, M_{(2)}$ – päri- ja vastujärgnevussüsteemi vastastikune impedants;

R_{EA}, R_{EB} – alajaamade A ja B maanduskontuuride valgumistakistused;

R_T – õhuliinimasti maandustakistus;

r – piksekaitsetrossiga õhuliini vähendustegur;

r_Q – piksekaitsetrossi raadius;

$Z_{(1)A}, Z_{(1)B}$ – kolmefaasilise vahelduvvooluga elektrivõrgu pärijärgnevustakistused võrgupunktides A ja B;

$Z_{(0)}$ – lühisekohtade A ja B vaheline nulljärgnevustakistus;

Z_{EB} – alajaama B maandustakistus;

Z_{EBtot} – alajaama B ekvivalentne maandustakistus;

Z_{ET} – lühistatud õhuliinimasti maandustakistus;

Z_{ETtot} – lühistatud õhuliinimasti ekvivalentne maandustakistus;

Z_P – lõputu õhuliini ahelimpedants;

Z_{Pn} – lõpliku õhuliini ahelimpedants;

$Z_Q = Z'_Q d_T$ – kahe maandatud õhuliinimasti vahelise piksekaitsetrossi näivtakistus;

Z'_Q – piksekaitsetrossi näivtakistus pikkusühiku kohta;

Z'_{QL} – faasijuhtmete ja piksekaitsetrossi vastastikune näivtakistus pikkusühiku kohta;

δ – ekvivalentse juhtme sügavus;

μ_0 – vaakumi magnetiline läbitavus, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$;

ρ – pinnase eritakistus;

ω – nurksagedus, $\omega = 2\pi f$;

Kaksikmaaühendusriike – kaks üheaegset ühefaasilist maalühist erinevates faasides õhuliini erinevates kohtades kolmefaasilises resonantsmaandatud või isoleeritud neutraaliga vahelduvvooluvõrgus [1].

Ülimööduvad lühisvoolud õhuliini kaksikmaaühendusrikke korral I_{kEE}'' – sama suurusega ülimööduvate lühisvoolude efektiivväärtused kaksikmaaühendusrikke esinemise asukohtades [1].

Läbi maa kulgev osalühisvool $I_{E\delta}$ – läbi pinnases paikneva fiktiivse ekvivalentse juhtme kulgeva osalühisvoolu efektiivväärtus [1].

Läbi maa kulgeva osalühisvoolu suurus õhuliinis, mis asub lühise kohast ja alajaamast kaugel sõltub õhuliini vähendustegurist, sest voolude jagunemine maa ja maandatud juhtide vahel on konstantne [1].

Kogu maasse kulgev osalühisvool I_{ETtot} kui lühis leiab aset õhuliini mastil T – läbi alajaamast kaugel paikneva õhuliini masti takistuse, mis on ühendatud õhuliini ahelimpedantsiga mõlemast küljest, maha kulgeva osalühisvoolu efektiivväärtus [1].

Kogu maasse kulgev osalühisvool I_{EBtot} kui lühise aukohaks on alajaam B – läbi alajaama B maanduskontuuri kaudu maha kulgeva osalühisvoolu efektiivväärtus [1].

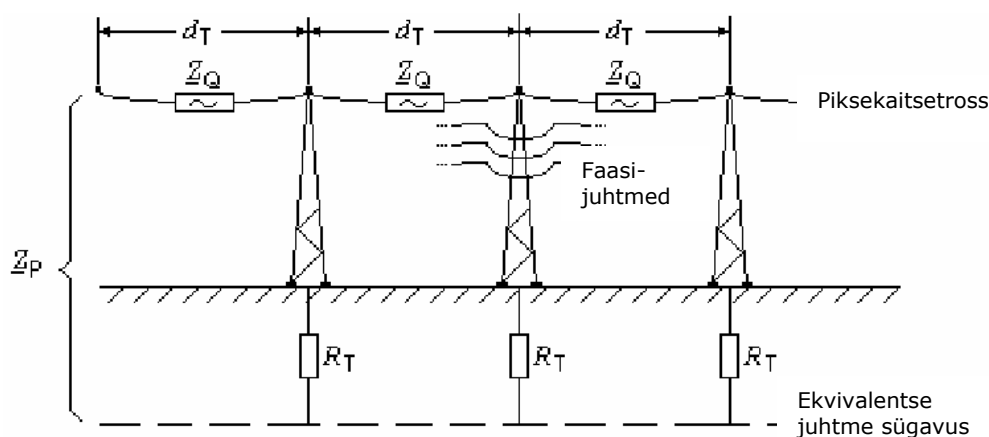
Maaühendusvool I_{ETn} – alajaama lähedal asuvas õhuliinimastis n potentsiaali tõusu põhjustava maaühendusvoolu efektiivväärtus [1].

Maaühendusvool I_{EBn} – alajaamas maa potentsiaali tõusu U_{EBn} põhjustava maaühendusvoolu efektiivväärtus, kui alajaama läheduses asuval õhuliinimastil n toimub ühefaasiline maalühis [1].

Vähendustegur r – määrab õhuliinidel ühefaasilise maalühise lühisvoolude jagunemise läbi maa ja muude juhtivate kontuuride vahel (nt piksekaitsetross) [1].

Lõpmatu pikkusega õhuliini ahelimpedants Z_p – koosneb kahe maandatud õhuliinimasti vahelistest trosside näivtakistustest Z_Q ja õhuliinimastide maandustakistustest R_T kui õhuliini maste on lõpmata palju (vt. joonis 1.1) ning arvutatakse valemiga 1.1 [1].

$$Z_p = 0,5Z_Q + \sqrt{(0,5Z_Q)^2 + R_T Z_Q} \quad (1.1)$$



Joonis 1.1 Lõpmatu õhuliini ahelimpedants Z_P [1]

Ahelimpedantsi Z_P võib lugeda konstantseks kui õhuliin ulatub lühise kohast F kaugemale kui D_F , mis arvutatakse valemiga 1.2 [1].

$$D_F = 3\sqrt{R_T} \frac{d_t}{\operatorname{Re}\left\{\sqrt{Z_Q}\right\}}, \quad (1.2)$$

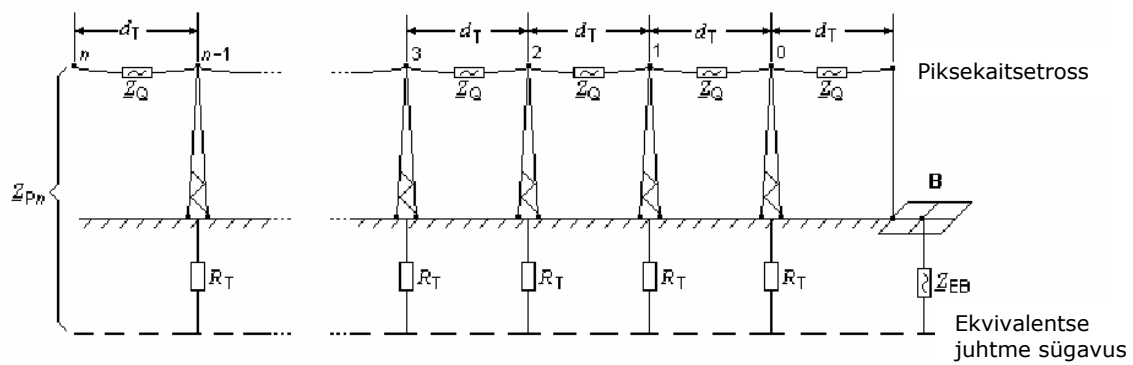
kus $\operatorname{Re}\{\sqrt{Z_Q}\}$ - reaalsosa maandusjuhtme näivtakistuse ruutjuurest.

Lõpliku pikkusega õhuliini ahelimpedants Z_{Pn} - Kui õhuliini mastide arv on n , koosneb ahelimpedants Z_{Pn} kahe õhuliinimasti vahelistest piksekaitsetrossi näivtakistustest Z_Q , õhuliinimastide maandustakistustest R_T ja alajaama B maandustakistusest Z_{EB} (vt. joonis 1.2). Z_{Pn} arvutatakse valemiga 1.3 [1].

$$Z_{Pn} = \frac{Z_P(Z_{EB} + Z_P)k^n + (Z_P - Z_Q)(Z_{EB} - Z_P + Z_Q)k^{-n}}{(Z_{EB} + Z_P)k^n - (Z_{EB} - Z_P + Z_Q)k^{-n}} \quad (1.3)$$

$$k = 1 + \frac{Z_P}{R_T} \quad (1.4)$$

Kui $n \approx 10 - 15$, siis on praktikas tegu juba lõpmata pika õhuliiniga ning ahelimpedantsi arvutamisel tuleb lähtuda valemist 1.1 [1].

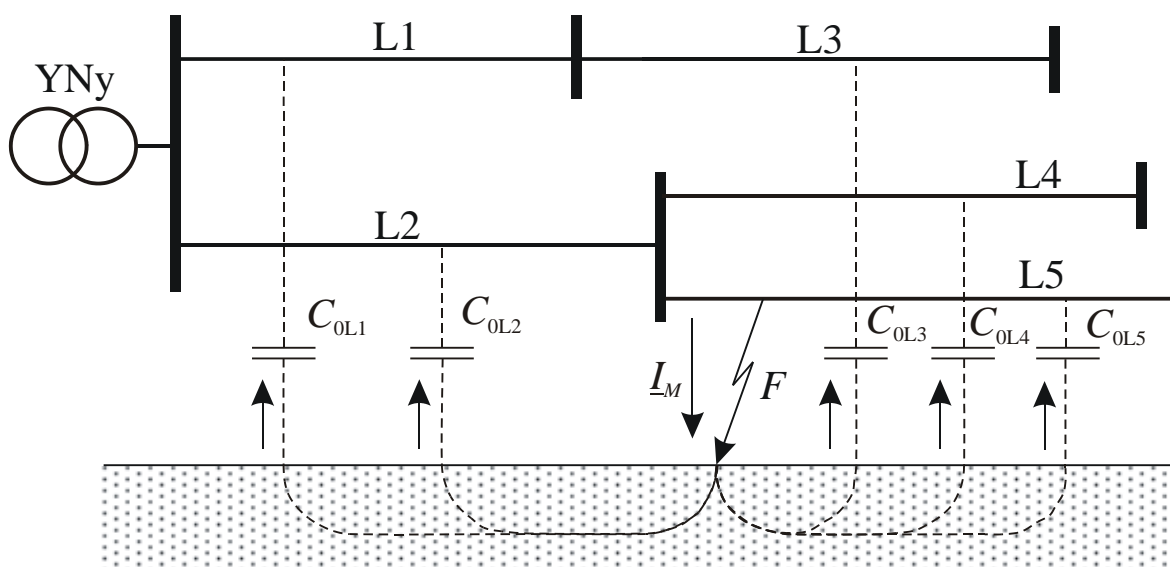


Joonis 1.2 Lõpliku pikkusega õhuliini ahelimpedants Z_{Pn} [1]

2 MAAÜHENDUSVOOLUDE KUJUNEMINE

Tänapäeval on elektrivõrkudes ökonoomsuse huvides kasutusel kolmefaasiline vahelduvvool. Nii on sama metallikulu ja edastatava võimsuse puhul võimsuskaod 30% väiksemad kui ühefaasilises süsteemis. Kasutusel on kolmefaasilised kolme- või neljajuhilised õhuliinid, mis hõlmavad kolme faasijuhet ja neutraali ehk nulljuhti [2].

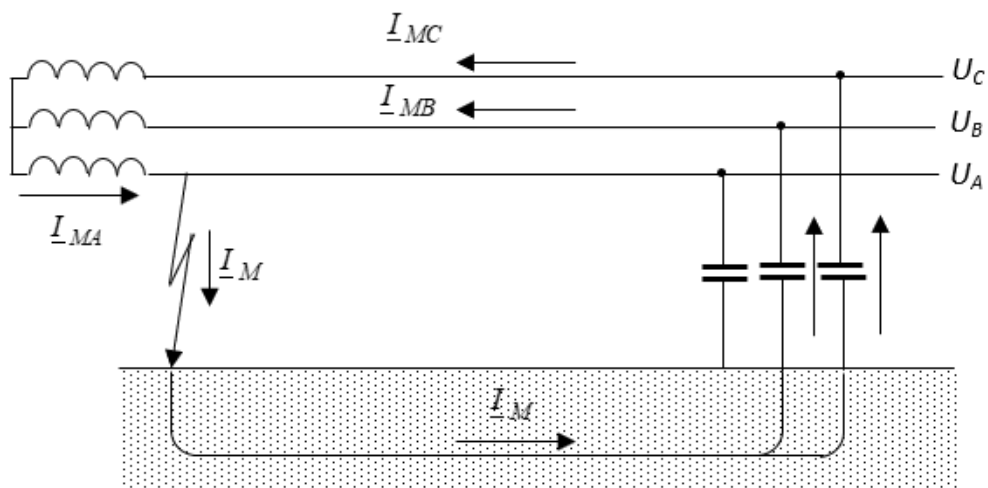
Kolmefaasilise süsteemi neutraal võib olla maast isoleeritud, vahetult maandatud või maandatud läbi kaarekustutuspooli. Keskpingevõrkudes on levinud isoleeritud neutraal, kuid kasutatakse ka resonantsmaandatud neutraali. Isoleeritud neutraaliga võrgus ei saa ühefaasilise lühise korral lühisvool maa kaudu sulguda ja seega ühefaasilist lühisvoolu ei esine. Ühendus maaga toimib läbi võrgu ja maa vahelise mahtuvuse ning tekib mahtvuslik maaühendusvool (vt. joonis 2.1). Maaühendusvoolu suuruse määravad liinide ja maa vahelised mahtvused. Teiste elementide ja maa vahelised mahtvused on liinide mahtvustega võrreldes tühised ning jäetakse arvestamata [3].



Joonis 2.1 Maaühendusvoolu kujunemine isoleeritud neutraaliga võrgus:

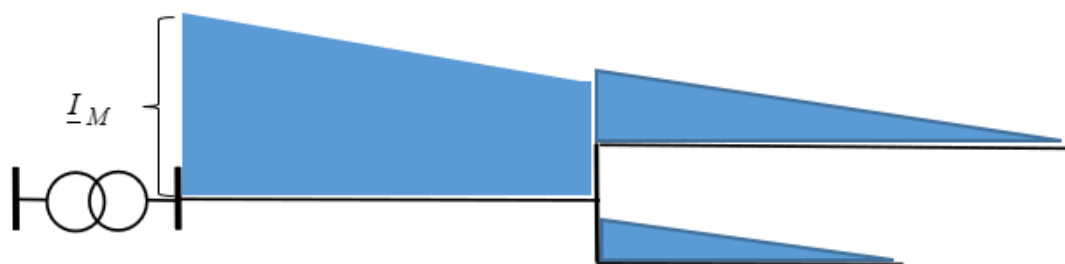
C_{OLn} – n liini ja maa vaheline nulljärgnevusmahtuvus [3].

Lühises oleva faasi maaühendusvool sulgub läbi liinide ja maa vaheliste mahtuvuste ning pöördu tagasi rikkekohta läbi tervete faaside ja trafo mähiste (vt. joonis 2.2) [3].



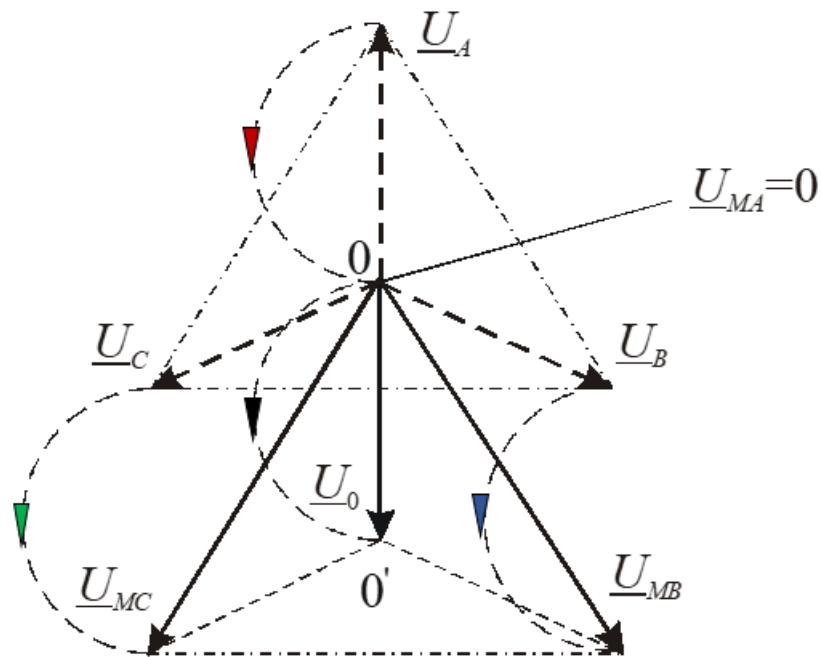
Joonis 2.2 Maaühendusvoolu teekond isoleeritud neutraaliga võrgus [3]

Nulljärgnevusmahtuvus maa suhtes on jaotunud ühtlaselt üle kogu liini. Piirkonnaalajaamast kõige kaugemas punktis on tagasipöörduva maaühendusvoolu väärtus null. Tagasipöörduva voolu väärtus kasvab lineaarselt lähenedes piirkonnaalajaamale (vt. joonis 2.3) [3].



Joonis 2.3 Tervetes faasides tagasipöörduva voolu kasvamine teekonnal liini lõpust kuni piirkonnaalajaamani [3]

Faaside vahelised pinged jäävad ühefaasilise maaühenduse korral muutumatuks, kuid tervete faaside pinged ehk maandamata faaside pinged saavad jääkmaaühenduse korral võrdseks liinipingega ehk suurenevad $\sqrt{3}$ korda [3].



Joonis 2.4 Ühefaasilise maalühise pingete kolmnurk [3]

Lisaks võivad liigpingeid põhjustada vilkuvaid elektrikaari, mis tekivad rikkekohas alates teatud suurusega maaühendusvoolude korral. Selliste vilkuvate elektrikaarte vältimiseks tuleb mahtvuslikke maaühendusvoolusid piirata, kompenseerides neid induktiivsete vooludega. Selleks maandatakse isoleeritud neutraaliga võrk piirkonnaalajamades kaarekustutuspoolide ehk Peterseni poolide abil ja siis on tegu resonantsmaandatud võrguga [2].

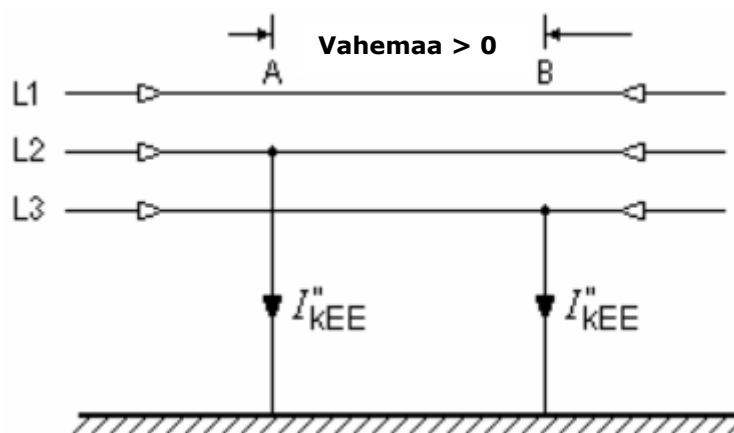
Võrreldes lühisvooludega on keskpingevõrgu mahtvuslikud maaühendusvoolud suhteliselt väikesed ja suuruselt võrreldavad tavaliste koormusvooludega [2].

Kõrgepingevõrkudes ei kasutata isoleeritud neutraali, vaid releekaitse kindlama töö tagamiseks ühefaasiliste lühiste korral on kasutusel efektiivselt maandatud ehk jäikmaandatud või impedantsmaandatud neutraalid. Nii tekib ühefaasiliste lühiste korral suur, tavaliselt kiloampritesse ulatuv lühisvool, millele releekaitse reageerib kiiresti ja kindlalt [2].

3 ÕHULIINIDE KAKSIMAAÜHENDUSRIKKE KORRAL ESINEVATE VOOLUDE ARVUTAMINE

3.1 Ülimööduva lühisvoolu efektiivvärtus

Joonis 3.1 iseloomustab õhuliinil esinevat kaksikmaaühendusriket. Lühiste A ja B vaheline kaugus on lõplik ja eeldatakse, et lühised asuvad kaugel alajaamast [1].



Joonis 3.1 Kaksikmaaühendusrikkete skeem ja sellele vastav ülimööduv lühisvool I''_{KEE} [1]

Isoleeritud või resonantsmaandatud neutraaliga võrgus avaldub kaksikmaaühendusrikkete ülimööduv lühisvool I''_{KEE} valemiga 3.1 [1].

$$I''_{KEE} = \frac{3cU_n}{|\underline{Z}_{(1)A} + \underline{Z}_{(2)A} + \underline{Z}_{(1)B} + \underline{Z}_{(2)B} + \underline{M}_{(1)} + \underline{M}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}|}, \quad (3.1)$$

kus c – IEC standardikohane pingetegur,

U_n – võrgu nimipinge,

$\underline{Z}_{(1)A}, \underline{Z}_{(1)B}$ – lühisekoha A, B pärijärgnevusimpedantsid,

$\underline{Z}_{(2)A}, \underline{Z}_{(2)B}$ – lühisekoha A, B vastujärgnevusimpedantsid,

$\underline{M}_{(1)}$ – vastastikune pärijärgnevusimpedants,

$\underline{M}_{(2)}$ – vastastikune vastujärgnevusimpedants,

$\underline{Z}_{(0)}$ – nulljärgnevusimpedants.

Generaatorist kaugel lühise korral, kui $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ ja $\underline{M}_{(1)} = \underline{M}_{(2)}$ avaldub ülimööduva lühisvoolu efektiivväärtus valemiga 3.2 [1].

$$I''_{kEE} = \frac{3cU_n}{|2\underline{Z}_{(1)A} + 2\underline{Z}_{(1)B} + 2\underline{M}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}|} \quad (3.2)$$

3.1.1 Päri- ja vastujärgnevussüsteemi vastastikused impedantsid

Elektrivõrgu aseskeemis ühendatakse lühise A asukohta pingesallikas A, teisi pingesallikaid aseskeemis ei ole. Sellisel juhul on päri- ja vastujärgnevus aseskeemides lühisekohas A pingesallika A poolt põhjustatud voolud vastavalt $\underline{I}_{(1)A}$ ja $\underline{I}_{(2)A}$ ning lühisekohas B tekkivad pinged $\underline{U}_{(2)B}$ ja $\underline{U}_{(2)B}$ [1].

Vastastikune pärijärgnevusimpedants lühisekoha A suhtes avaldub valemiga 3.3 [1].

$$\underline{M}_{(1)} = \frac{\underline{U}_{(1)B}}{\underline{I}_{(1)A}} \quad (3.3)$$

Vastastikune vastujärgnevusimpedants lühisekoha A suhtes avaldub valemiga 3.4 [1].

$$\underline{M}_{(2)} = \frac{\underline{U}_{(2)B}}{\underline{I}_{(2)A}} \quad (3.4)$$

Vastastikuseid impedantse võib avaldada ka lühisekoha B suhtes vastavalt valemitega 3.5 ja 3.6 [1].

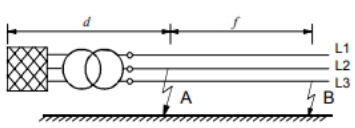
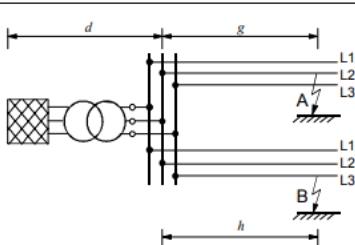
$$\underline{M}_{(1)} = \frac{\underline{U}_{(1)A}}{\underline{I}_{(1)B}} \quad (3.5)$$

$$\underline{M}_{(2)} = \frac{\underline{U}_{(2)A}}{\underline{I}_{(2)B}} \quad (3.6)$$

3.1.2 Kaksikmaaühendusrikke lihtsamad juhtumid

Lihtsatel juhtudel on võimalik kaksikmaaühendusrikke ülimööduva lühisvoolu efektiivväärtus I''_{kEE} arvutada tabeli 3.1 valemite põhjal. Valemid vastavad juhtumile, mille puhul on tegu generaatorist kaugel paikneva lühisega ehk $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ ja $\underline{M}_{(1)} = \underline{M}_{(2)}$. Valemites esinevad näivtakistuste indeksid tähistavad neile vastavat elektrivõrgu osa [1].

Tabel 3.1 Ülimööduvate lühisvoolude efektiivväärtus I''_{kEE} lihtsate kaksikmaaühendusriikete korral [1]

<p>a)</p> 	<p>Ühepoolse toitega radiaalliin</p> $I''_{kEE} = \frac{3cU_n}{\left 6Z_{-(1)d} + 2Z_{-(1)f} + Z_{-(0)f} \right } \quad (3.7)$
<p>b)</p> 	<p>Kaks ühepoolse toitega radiaalliini</p> $I''_{kEE} = \frac{3cU_n}{\left 6Z_{-(1)d} + 2(Z_{-(1)g} + Z_{-(1)h}) + Z_{-(0)g} + Z_{-(0)h} \right } \quad (3.8)$

3.2 Löökvoolu, lahtusvoolu ja püsilühisvoolu arvutamine

Löökvool arvutatakse vastavalt standardile IEC60909-0 valemiga 3.9 [1].

$$I_{pEE} = \kappa \sqrt{2} I''_{kEE}, \quad (3.9)$$

kus löögitegur κ valitakse samamoodi nagu kolmefaasilise lühise korral lühisekohas A või B, sõltuvalt sellest, millises lühisekohas löögitegur on suurem [1].

Generaatorist kaugel lühise korral on lahtusvool I_{bEE} ja lühisvoolu efektiivväärtus I_{kEE} püsitalitlusel võrdsed ülimööduva lühisvooluga I''_{kEE} [1].

$$I_{kEE} = I_{bEE} = I''_{kEE} \quad (3.10)$$

3.3 Voolude jagunemine kaksikmaaühendurikkel

Piksekaitsetrossiga keskpinge võrgu liinidel esineva kaksikmaaühendusriike korral toimub voolude jagunemine maa ja piksekaitsetrossi vahel. Eesti keskpingevõrkudes on piksekaitsetrossid leidnud kasutamist ainult lokaalselt alajaamade läheduses. Üldiselt talitlevad eesti keskpingeliinid ilma piksekaitsetrossita [1].

Kaksikmaaühendusriike esinemisel on läbi maa kulgev osalühisvool $I_{E\delta}$ avaldatav ülimööduva lühisvoolu efektiivväärtuse I''_{kEE} ja piksekaitsetrossiga õhuliini vähendusteguri r kaudu valemiga 3.11 [1].

$$I_{E\delta} = I''_{kEE} r \quad (3.11)$$

Lühise esinemisel alajaamast kaugel paikneval õhuliinimastil on läbi õhuliini masti maandustakistuse sulguv lühisvool arvutatav valemiga 3.12 [1].

$$I_T = I''_{kEE} \gamma \frac{Z_P}{Z_P + 2R_T} \quad (3.12)$$

Ilma piksekaitsetrossita õhuliini lühisvoolud sulguvad ainult läbi maapinna ning sellisel juhul on kaksikmaaühendusrikke korral läbi maa kulgev osalühisvool $I_{E\delta}$ võrdne ülimööduvalühisvooluga I''_{kEE} [1].

4 LÄBI MAA KULGEVATE OSALÜHISVOOLUDE ARVUTAMINE KÕRGEPIINGEVÕRKUDES

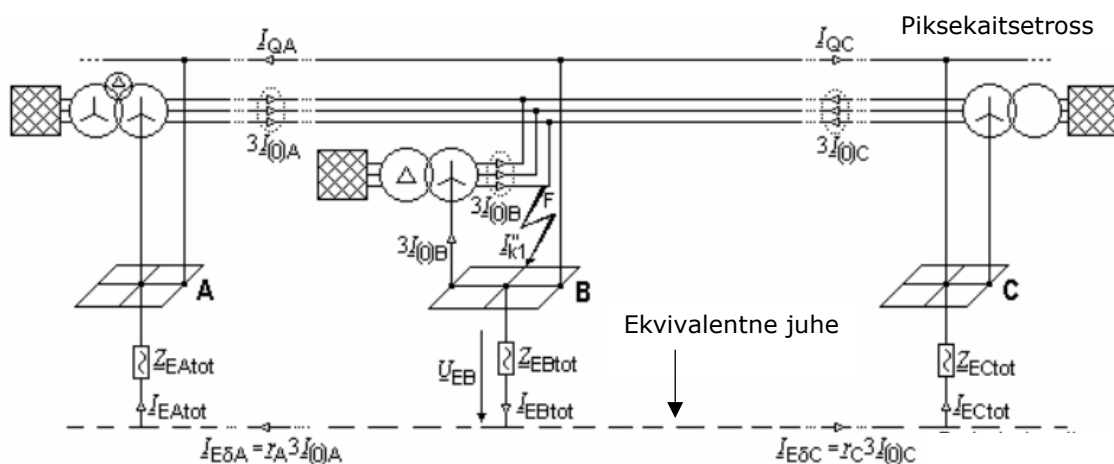
Kõrgepingevõrkudes ei kasutata isoleeritud neutraali, vaid relekaitse kindlama töö tagamiseks ühefaasiliste lühiste korral on kasutusel efektiivselt maandatud ehk jäikmaandatud või impedantsmaandatud neutraalid. Nii tekib ühefaasiliste lühiste korral suur, tavaliselt kiloampritesse ulatuv lühisvool, millele relekaitse reageerib kiiresti ja kindlalt [2].

Ühefaasiline lühis on jäikmaandatud kõrgepingevõrgus kõige sagedamini esinev rike. Võrreldes kahefaasilise maalühisega õhuliinis, kus $Z_{(0)} > Z_{(1)}$, tekitab ühefaasiline lühis suurema lühisvoolu kui kahefaasiline maalühis, $I''_{k1} > I''_{k1}^{(1)}$. [1]

Lühisvoolude arvutamisel lähtutakse lihtsustatud võrguskeemist, mis koosneb kolmest alajaamast A, B ja C ning neid ühendavast piksekaitsetrossiga õhuliinist. Eeldatakse, et alajaamad asuvad üksteisest vähemalt kaks korda kaugemal kui lühisekoha kaugus D_F alajaamast (vt valem 1.2). Vastavalt IEC 60909-0 standardile ei arvestata lühisvoolude arvutamisel õhulini mastide ning maanduskontuuri näivtakistustega [1].

4.1 Ühefaasiline maalühis alajaamas

Joonisel 4.1 on kujutatud alajaama B koos sisendfiidritega alajaamast A ja C.



Joonis 4.1 Alajaamas B ühefaasilise maalühise korral esinevad osalühisvoolud [1]

Ühefaasilise maalühise korral on ülimööduv pärijärgnevus-lühisvool võrdne kolmekordse nulljärgnevusvooluga ning arvutatav valemiga 4.1 [1].

$$I''_{k1} = 3I_{(0)A} + 3I_{(0)B} + 3I_{(0)C} \quad (4.1)$$

Kolmekordne nulljärgnevusvool $3I_{(0)B}$ ei põhjusta alajaamas B potentsiaali tõusu, sest sulgub läbi alajaama maanduskontuuri, jõudes seejärel tagasi trafo neutraalini. Voolud $3I_{(0)A}$ ja $3I_{(0)C}$ sulguvad läbi maapinna ning alajaamu A, B, C ühendava õhuliini piksekaitsetrossi. $3I_{(0)A}$ arvutatakse valemiga 4.2 ning $3I_{(0)C}$ valemiga 4.3 [1].

$$3I_{(0)A} = I_{E\delta A} + I_{QA} = r_A 3I_{(0)A} + (1 - r_A) 3I_{(0)A} \quad (4.2)$$

$$3I_{(0)C} = I_{E\delta C} + I_{QC} = r_C 3I_{(0)C} + (1 - r_C) 3I_{(0)C} \quad (4.3)$$

Kogu maaühendusvool alajaamas B toimuva ühefaasilise maalühise korral on arvutatav valemiga 4.4 [1].

$$I_{EBtot} = r_A 3I_{(0)A} + r_C 3I_{(0)C} \quad (4.4)$$

Maaühendusvool I_{EBtot} läbib alajaama B maandustakistust Z_{EBtot} , mis avaldatakse valemist 4.5 [1].

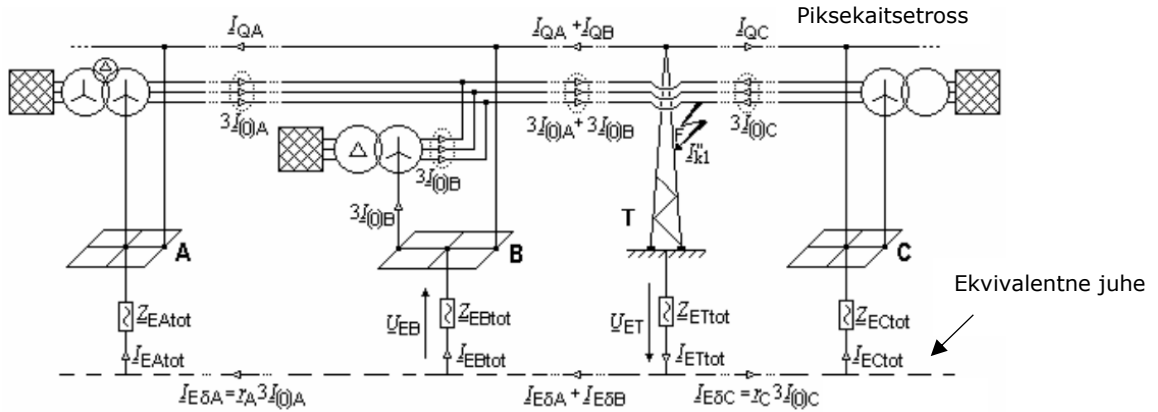
$$Z_{EBtot} = \frac{1}{\frac{1}{R_{EB}} + \sum_i \frac{1}{Z_{Pi}}} \quad (4.5)$$

Alajaama maandustakistust Z_{EBtot} läbiv maaühendusvool põhjustab alajaamas B maapotentiaali U_{EB} tõusu. Alajaama B maapotentiaal arvutatakse valemiga 4.6 [1].

$$U_{EB} = Z_{EBtot} I_{EBtot} \quad (4.6)$$

4.2 Alajaamast kaugel paiknev ühefaasiline maalühis

Joonisel 4.2 on kujutatud alajaamast kaugemal paikneval õhuliini mastil aset leidvat ühefaasilist maalühist.



Joonis 4.2 Osalühisvoolud alajaamast eemal paikneval õhuliinimastil T toimuva ühefaasilise maalühise korral [1]

Alajaamast eemal paikneval õhuliinimastil T toimuva ühefaasilise maalühise ülimööduv lühisvool I''_{k1} on võrdne lühise kohta F voolavate kolmekordsete nulljärgnevusvooludega. I''_{k1} arvutatakse valemiga 4.7 [1].

$$I''_{k1} = 3I_{(0)A} + 3I_{(0)B} + 3I_{(0)C} \quad (4.7)$$

Voolud $3I_{(0)A}$, $3I_{(0)B}$ ja $3I_{(0)C}$ voolavad tagasi alajaamadesse A, B ja C läbi maapinna ning alajaamu ühendava õhuliini piksekaitsetrossi [1].

$$3I_{(0)A} + 3I_{(0)B} = I_{E\delta A} + I_{E\delta B} + I_{QA} + I_{QB} = r_C(3I_{(0)A} + 3I_{(0)B}) + (1 - r_C)(3I_{(0)A} + 3I_{(0)B}), \quad (4.8)$$

kus $3I_{(0)A}$ arvutatakse vastavalt valemile 4.2.

Kogu maaühendusvool I_{ETtot} alajaamast kaugel asuval lühistatud õhuliinimastil T on avaldatud valemiga 4.9 [1].

$$I_{ETtot} = I_{E\delta A} + I_{E\delta B} + I_{E\delta C} = r_C(3I_{(0)A} + 3I_{(0)B} + 3I_{(0)C}) = r_C I''_{k1} \quad (4.9)$$

Maaühendusvool I_{ETtot} läbib lühistatud õhuliini masti T ekvivalentset maandustakistust Z_{ETtot} , kusjuures õhuliini mast T on ühendatud õhuliini \overline{BC} piksekaitsetrossiga (vt. joonis 4.2). Z_{ETtot} arvutatakse valemiga 4.10 [1].

$$Z_{ETtot} = \frac{1}{\frac{1}{R_T} + \frac{2}{Z_P}} \quad (4.10)$$

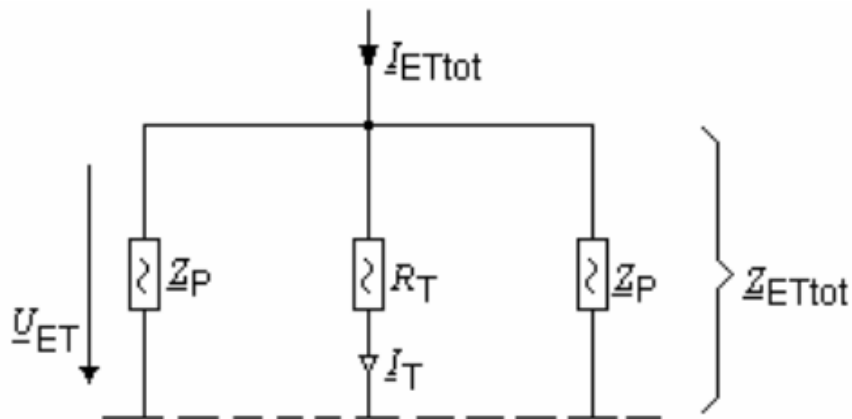
Õhuliini masti T maandustakistust Z_{ETtot} läbib vool I_{ETtot} põhjustab mastil maa potentsiaali U_{ET} , mis arvutatakse valemiga 4.11 (vt. joonis 4.3) [1].

$$\underline{U}_{ET} = \underline{Z}_{ETtot} \underline{I}_{ETtot} = R_T \underline{I}_T \quad (4.11)$$

\underline{I}_T arvutamiseks on asendatud valemisse 3.10 $r_C \underline{I}_{k1}''$ [1].

$$\underline{I}_T = r_C \underline{I}_{k1}'' \frac{\underline{Z}_P}{\underline{Z}_P + 2R_T} \quad (4.12)$$

Ühefaasilise maalühise esinemisel alajaama B läheduses võib maa potentsiaal olla kõrgem kui valemi 4.11 arvutuslik tulemus, sellisel juhul tuleb maa potentsiaali arvutamisel lähtuda eritingimustest alapeatükis 4.3 [1].



Joonis 4.3 Kogu maaühendusvoolu \underline{I}_{ETtot} jagunemine õhuliini mastil T [1]

Alajaamast eemal paikneval (kaugemal kui D_F) õhuliini mastil T toimuva ühefaasilise maalühise korral on alajaama B maaühendusvool arvutatav valemiga 4.13 [1].

$$\underline{I}_{EBtot} = r_C (3\underline{I}_{(0)A} + 3\underline{I}_{(0)B}) - r_A 3\underline{I}_{(0)A} \quad (4.13)$$

Alajaama B maapotsiaal \underline{U}_{EB} arvutatakse valemiga 4.14 [1].

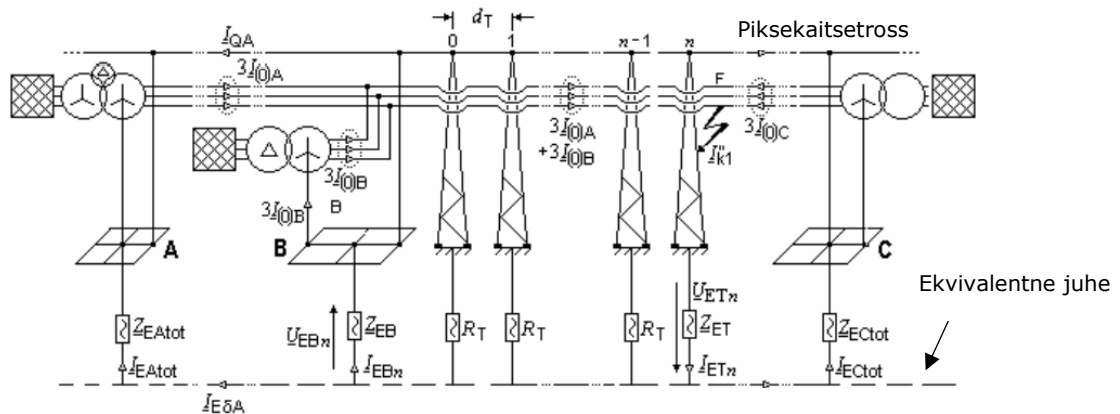
$$\underline{U}_{EB} = \underline{Z}_{EBtot} \underline{I}_{EBtot}, \quad (4.14)$$

kus \underline{I}_{EBtot} on arvutatud kasutades valemit 4.13.

Ühefaasilise maalühise esinemisel alajaama B läheduses võib maaühendusvool \underline{I}_{EBtot} olla suurem kui alajaamas esineva ühefaasilise maalühise korral (vt. joonis 4.1), sellisel juhul tuleb maaühendusvoolu arvutamisel lähtuda eritingimustest alapeatükis 4.3 [1].

4.3 Ühefaasiline maalühis alajaama läheduses

Ühefaasilist maalühist õhuliini mastil nimetatakse alajaama lähedaseks lühiseks kui lühisekoht on alajaamale lähemal kui kaugus D_F (vt. joonis 4.4). Alajaama lähedase lühise korral võib alajaama maapotentiaal \underline{U}_{EBn} olla suurem kui maapotentiaal \underline{U}_{EB} alajaama sisese lühise korral. Indeks n tähistab alajaamast väljaspool asuvat lühistatud õhuliini masti. Sellisel juhul on ka lühistatud õhuliini masti enda maapotentiaal \underline{U}_{ETn} kõrgem kui alajaamast kaugel asuva õhuliini masti maapotentiaal \underline{U}_{ET} (vt. valem 4.11) ühefaasilise maalühise korral [1].



Joonis 4.4 Ühefaasiline maalühis alajaama B läheduses paikneval õhuliini mastil n [1]

Lähtudes joonisest 1.2 peab ülimööduva lühisvoolu I''_{k1} ja nulljärgnevusvoolu $3I_{(0)B}$ arvutamisel arvestama õhuliini masti indeksiga n [1].

Läbi õhuliini masti n maandustakistuse \underline{Z}_{ET} sulguv maaühendusvool I_{ETn} leitakse lühisekoha maaühendusvoolu $r_C I''_{k1}$ ja alajaama B trafo nullpunkti läbiva voolu $r_C 3I_{(0)B}$ superpositsiooni teel valemiga 4.15 [1].

$$I_{ETn} = r_C I''_{k1} \frac{\underline{Z}_{Pn}}{\underline{Z}_{Pn} + \underline{Z}_{ET}} r_C 3I_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EB}}{\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P} \cdot \frac{1}{k^n} \quad (4.15)$$

$$\underline{Z}_{ET} = \frac{1}{\frac{1}{R_T} + \frac{1}{\underline{Z}_P}} \quad (4.16)$$

$$\underline{Z}_{EB} = \frac{1}{\frac{1}{R_{EB}} + \frac{1}{\underline{Z}_P}} \quad (4.17)$$

Lõpmatu pikkusega õhuliini ahelimpedants \underline{Z}_P arvutatakse valemi 1.1 ning lõpliku pikkusega õhuliini ahelimpedants \underline{Z}_{Pn} valemi 1.3 põhjal.

Lühistatud õhuliinimasti n maapotentiaal \underline{U}_{ETn} avaldatakse valemiga 4.18 [1].

$$\underline{U}_{ETn} = \underline{Z}_{ET} \underline{I}_{ETn} \quad (4.18)$$

Alajaama B maaühendusvool \underline{I}_{EBn} , kui lühisekohaks on õhuliini mast n , läbib alajaama maandustakistust \underline{Z}_{EB} . \underline{I}_{EBn} ning arvutatakse valemiga 4.19 [1].

$$\underline{I}_{EBn} = r_C \underline{I}_{k1}'' \frac{\underline{Z}_{ET}}{\underline{Z}_{ET} + \underline{Z}_{Pn}} \cdot \frac{2\underline{Z}_P - \underline{Z}_Q}{(\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P) \underline{k}'' - (\underline{Z}_{EB} - \underline{Z}_P + \underline{Z}_Q) \underline{k}^{-n}} - r_C 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_P}{\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P} \quad (4.19)$$

Alajaama B maapotsiaal \underline{U}_{EBn} arvutatakse valemiga 4.20 [1].

$$\underline{U}_{EBn} = \underline{Z}_{EB} \underline{I}_{EBn} \quad (4.20)$$

5 ÕHULIINI TAKISTUSTE ARVUTAMINE

Õhuliini päri-, vastu- ja nulljärgnevustakistuse arvutamisel lähtutakse standardist IEC 60909-0. Kõikides valemites peab kasutama ühesuguseid pikkusühikuid.

5.1 Õhuliini päri- ja vastujärgnevustakistused

Õhuliinide päri- ja vastujärgnevustakistused on võrdsed. Liini aktiivtakistus pikkusühiku kohta sõltub faasijuhtme materjalist, konstruktsioonist ja ristlõike pindalast ning arvutatakse valemiga 5.1 [4].

$$r'_{(1)L} = r'_{(2)L} = \frac{\rho}{q}, \quad (5.1)$$

kus ρ – faasijuhtme eritakistus temperatuuril $+20^{\circ}\text{C}$, Ω

q – faasijuhtme ristlõike pindala, mm^2 .

Faasijuhtme eritakistus ρ ja ristlõike pindala q on täpselt leitavad juhtme margi järgi vastavatest käsiraamatutest või kataloogidest [4].

Kogu õhuliini päri- ja vastujärgnevusaktiivtakistus leitakse valemiga 5.2 [4].

$$r'_{(1)L} = r'_{(2)L} = l \cdot r'_{(1)L} = l \cdot r'_{(2)L}, \quad (5.2)$$

kus l – õhuliini pikkus.

Päri- ja vastujärgnevusinduktiivtakistused sõltuvad juhtme ristlõikest ja paigutusest. Õhuliini induktiivtakistuse pikkusühiku kohta saab transponeerimist eeldades arvutada valemiga 5.3 [4].

$$x'_{(1)L} = x'_{(2)L} = 0,144lg \frac{D_K}{R} + 0,0157, \quad (5.3)$$

kus D_K - õhuliini faasijuhtmete vaheline keskmine geomeetriline vahekaugus

R – faasijuhtme raadius

Õhuliini faasijuhtmete vaheline keskmine geomeetriline vahekaugus arvutatakse valemiga 5.4 [4].

$$D_K = \sqrt[3]{d_{L1L2}d_{L2L3}d_{L1L3}}, \quad (5.4)$$

kus d_{LnLn} – kahe faasijuhtme vahekaugus.

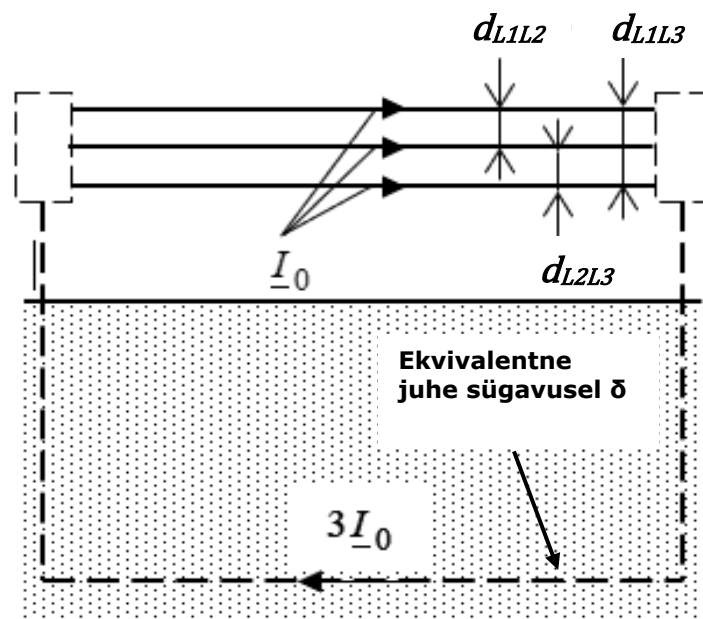
Kogu õhuliini päri- ja vastujärgnevusinduktiivtakistus leitakse valemiga 5.5 [4].

$$x'_{(1)L} = x'_{(2)L} = l \cdot x'_{(1)L} = l \cdot x'_{(2)L} \quad (5.5)$$

5.2 Õhuliini nulljärgnevustakistused

Õhuliinide päri- ja vastujärgnevustakistused on võrdsed, kuid nulljärgnevustakistused erinevad neist oluliselt. Teatavasti sulguvad õhuliinide nulljärgnevusvoolud läbi maa või liiniga rööpselt paiknevate voolujuhtivate kontuuride (nt. piksekaitsetrossid). Nulljärgnevustakistuste määramise keerukus seisneb täpse info puudumises nulljärgnevusvoolude jagunemisest maa ja teiste voolujuhtivate kontuuride vahel [5].

Teoreetiliselt lihtsama meetodika puhul arvestatakse juhtumiga, kus liiniga rööpsed voolujuhtivad kontuurid (piksekaitsetross, raudteerööpad, metalltorud jms) puuduvad. See tähendab, et kogu nulljärgnevusvool sulgub läbi maapinna (vt. joonis 5.1) [5].



Joonis 5.1 Õhuliini nulljärgnevusvoolude sulgumine läbi maa [5]

Nulljärgnevusvoolu jagunemine pinnases sarnaneb voolu jagunemisega massiivjuhis. Kaugenedes liinist ja sügavuse kasvades, voolutihedus väheneb. Kolmefaasilise üheaheelalise täistsükliga transponeeritud õhuliini ja ekvivalentse maajuhtme moodustatud silmuse nulljärgnevus-induktiivtakistus pikkusühiku kohta avaldub valemiga 5.6 [5].

$$x'_{(0)L} = 0,435lg \frac{\delta}{R_K}, \quad (5.6)$$

kus R_K – kolmefaasilise süsteemi faasijuhtmete kolmiku keskmine geomeetriline raadius,

δ - ekvivalentse juhtme sügavus maas, vt. valem 6.4 ja joonis 6.1.

Kolmefaasilise süsteemi faasijuhtmete kolmiku keskmine geomeetriline raadius avaldub valemiga 5.7 [5].

$$R_K = \sqrt[3]{R_{ekv} D_K^2}, \quad (5.7)$$

kus R_{ekv} – faasijuhtmete ekvivalente raadius,

D_K – faasijuhtmete kolmiku keskmine geomeetriline vahekaugus, vt. valem 5.4.

Õhuliini ja ekvivalentse maajuhtme vahelise voluringi nulljärgnevus-aktiivtakistus pikkusühiku kohta summeerub kilomeetripikkuse liinijuhtme aktiivtakistustest r'_L ja kolmekordsest pinnase jooksvast takistusest $3r'_M$. Pinnast läbib kolmekordne nulljärgnevusvool $3I_{(0)}$, mistõttu on pinnase aktiivtakistus arvestatud kolmekordsena [5].

$$r'_{(0)L} = r'_L + 3r'_M \quad (5.8)$$

$$r'_M = \pi^2 \cdot f \cdot 10^{-4} \quad (5.9)$$

Pinnase aktiivtakistus ei sõltu pinnase juhtivusest, sest volutihedus muutub pinnase juhtivuse muutmisel nii, et aktiivvõimsuskaod jäävad antud sagedusel muutumatuks. Pinnase takistuse sõltuvus sagedusest on tingitud maa kui juhi pinnaefektist [5].

Teades üheahelalise ilma piksekaitsetrossita õhuliini nulljärgnevus-aktiivtakistus ja nulljärgnevus-induktiivtakistust avaldub nulljärgnevus-näivtakistus valemiga 5.10 [5].

$$\underline{Z}'_{(0)L} = r'_{(0)L} + jx'_{(0)L} \quad (5.10)$$

Teades õhuliini pikkust l , saab avaldada kogu õhuliini nulljärgnevustakistuse valemiga 5.11 [5].

$$\underline{Z}_{(0)L} = \underline{Z}'_{(0)L} \cdot l \quad (5.11)$$

Piksekaitsetrossi olemasolul õhuliinidel on nad oluliseks nulljärgnevustakistuse kujundajateks. Õhuliini nulljärgnevus-induktiivtakistus väheneb piksekaitsetrossi olemasolul. Õhuliini nulljärgnevus-aktiivtakistusele on kaitsetrossi mõju tühine ning ei

ole ühesuunaline. Mõju suurus sõltub trossi maandamisviisist ja parameetritest nagu trossi aktiivtakistus. Suure aktiivtakistusega piksekaitsetross võib liini nulljärgnevustakistusi suurendada. Väikese aktiivtakistusega tross aga omakorda vähendab nulljärgnevustakistusi. Õhuliini nulljärgnevustakistuse täpseks määramiseks tuleb läbi viia reaalsed mõõtmised õhuliinil. Tabelis 5.1 on esitatud õhuliinide päri- ja nulljärgnevus-induktiivtakistuste keskmised suhted [5].

Tabel 5.1 Õhuliinide päri- ja nulljärgnevus-induktiivtakistuste keskmised suhted [5]

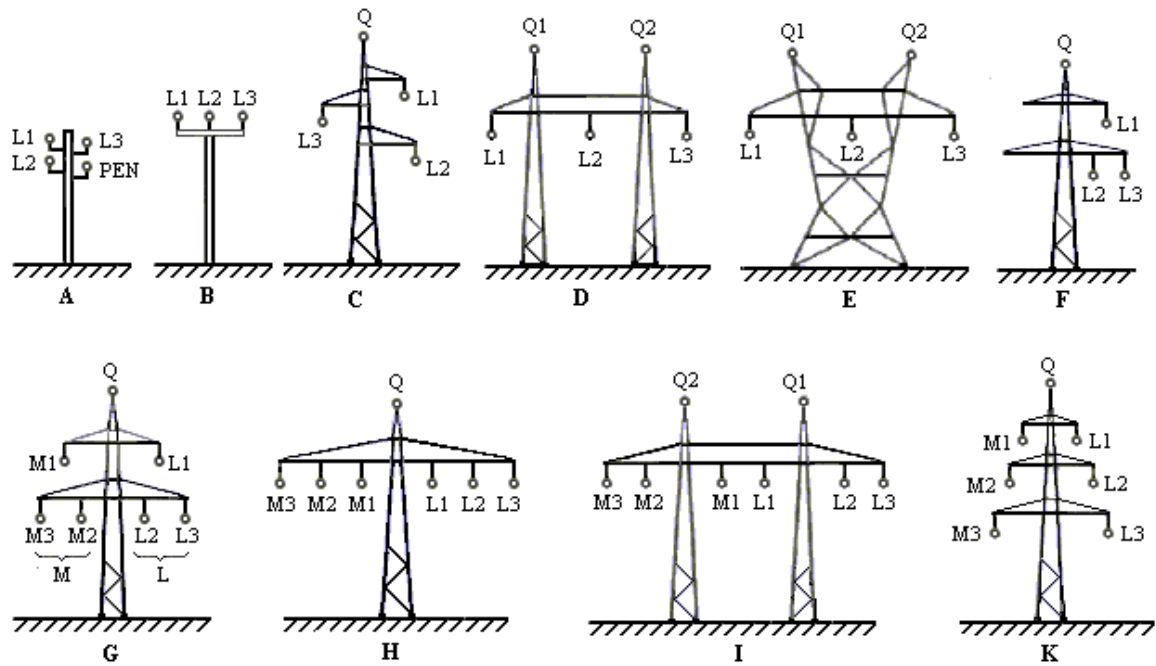
Liini tüüp	Suhe $K = x_{(0)L}/x_{(1)L}$
Üheahelaline, ilma trossita	3,5
Üheahelaline, terastrossiga	3,0
Üheahelaline, hästi juhtiva trossiga	2,0
Kaheahelaline, ilma trossita	5,5
Kaheahelaline, terastrossiga	4,7
Kaheahelaline, hästi juhtiva trossiga	3,0

Ligikaudselt võib õhuliini nulljärgnevus-induktiivtakistust $x_{(0)L}$ leida pärisjärgnevus-induktiivtakistuse $x_{(1)L}$ keskmise suhte K alusel valemiga 5.12 [5].

$$x_{(0)L} = K \cdot x_{(1)L} \quad (5.12)$$

5.3 Õhuliini faasijuhtmete vaheline keskmine geomeetiline vahekaugus

Õhuliini induktiivtakistuse arvutamiseks on oluline teada faasijuhtmete vahelist keskmist geomeetrilist vahekaugust D_K ja faasijuhtme raadiust R . Faasijuhtme raadius sõltub juhtme margist ning on leitav juhtme tootja andmelehel. Õhuliini juhtmete vaheline keskmine geomeetiline vahekaugus sõltub aga nimipingest ja liini tüübist. Arvutustes on lähtutud tüüpiliste õhuliinide tegelikest andmetest vastavalt standardile IEC 60909-2 (vt. tabel 5.2). Tüüpilised õhuliini mastid on näidatud joonisel 5.2. Käesolevas töös lähtutakse keskpinge arvutustes masti tüübist B ning kõrgepingele vastavates arvutustest masti tüübist C [7].



Joonis 5.2 Tüüpilised õhuliini mastid [7]

Tabel 5.2 Tüüpiliste õhuliinide tegelikud andmed vastavalt standardile IEC 60909-2 [7]

Masti tüüp/ ahelate arv	Nimi- pinge U_n	Juhtmete arv faasis × ristlõike pindala, materjal	Pikse- kaitse- trosside arv × ristlõike- pindala, materjal	Geomeetrilised mõõtmed				Pärijärgnevus- takistused $r'_{(1)L} + jx'_{(1)L}$	Nulljärgnevus- takistused $r'_{(0)L} + jx'_{(0)L}$
				R	R_{ekv}	D_k	D_{k12}		
				kV	mm ²	mm ²	mm	m	m
A/1	0,40	1 × 95, AL	PEN	6,25	-	0,6	-	0,31 + j0,302	0,63 + j0,941
B/1	20	1 × 45, Cu	-	3,15	-	1,23	-	0,746 + j0,396	0,854 + j1,643
F/1	110	1 × 240, Al/St	1 × 50, St	10,95	-	4,06	-	0,119 + j0,387	0,309 + j1,382
C/1	110	1 × 185, Al/St	1 × 50, St	9,2	-	4,61	-	0,156 + j0,395	0,370 + j1,34
E/1	220	1 × 291, Al/St	2 × 50, St	11,75	-	6,39	-	0,108 + j0,411	0,352 + j1,242
G/2	220	2 × 240, Al/St	1 × 240, Al/St	10,95	66,2	6,24	15,8	0,06 + j0,299	0,273 + j1,479
K/2	380	2 × 680, Al/St	1 × 240, Al/St	18,0	48,9	11,5	19,2	0,0215 + j0,303	0,243 + j1,400
D/1	500	4 × 291, Al/St	2 × 120, Al/St	11,75	197,3	17,64	-	0,031 + j0,286	0,233 + j0,715

6 PIKSEKAITSETROSSIGA ÕHULIINI VÄHENDUSTEGUR

Vähendustegur määrab õhuliinidel ühefaasilise maalühise lühisvoolude jagunemise läbi maa ja muude juhtivate kontuuride vahel. Õhuliinidel on teiseks juhtivaks kontuuriks piksekaitsetrossid [1].

Piksekaitsetrossiga õhuliini vähendustegur arvutatakse valemiga 6.1 [1].

$$\underline{r} = \frac{I_E \delta}{3I_{(0)}} = 1 - \frac{Z'_{QL}}{Z'_Q} \quad (6.1)$$

Maandatud piksekaitsetrossi näivtakistus pikkusühiku kohta Z'_Q arvutatakse valemiga 6.2 [1].

$$Z'_Q = \frac{R'_Q}{v} + \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{\mu_r}{4v} + \ln \frac{\delta}{r_{QQ}} \right), \quad (6.2)$$

kus R'_Q - piksekaitsetrossi aktiivtakistus pikkusühiku kohta,

r_{QQ} - piksekaitsetrossi ekvivalentne raadius,

μ_r - piksekaitsetrossi materjali suhteline magnetiline läbitavus,

μ_0 - magnetiline konstant ehk vaakumi magnetiline läbitavus, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am,

δ - ekvivalentse juhtme sügavus,

v - piksekaitsetrosside arv ($v = 1,2$).

Piksekaitsetrossi ekvivalente raadius r_{QQ} sõltub piksekaitsetrosside arvust [1]:

1.) Ühe piksekaitsetrossi puhul on $r_{QQ} = r_Q$

2.) Kahe piksekaitsetrossi puhul on $r_{QQ} = \sqrt{r_Q d_{Q1 Q2}}$

Materjali suhteline magnetiline läbitavus μ_r ühe alumiiniumikihiga terasalumiinium (ACSR) piksekaitsetrossi korral on $\mu_r = 5 - 10$. Teistel juhtudel on terasalumiinium piksekaitsetrossi puhul $\mu_r \approx 1$. Terasest piksekaitsetrossi suhteline läbitavus on $\mu_r \approx 75$ [1].

Maandustega õhuliini faasijuhtmete ja piksekaitsetrossi vastastikune näivtakistus pikkusühiku kohta \underline{Z}'_{QL} arvutatakse valemiga 6.3 [1].

$$\underline{Z}'_{QL} = \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{d_{QL}}, \quad (6.3)$$

kus d_{QL} – keskmine geomeetiline vahekaugus õhuliini faasijuhtme ja piksekaitsetrossi vahel.

Keskmine geomeetiline vahekaugus d_{QL} õhuliini faasijuhtmete ja piksekaitsetrossi vahel d_{QL} sõltub piksekaitsetrosside arvust [1]:

1.) Ühe piksekaitsetrossiga õhuliinil on $d_{QL} = \sqrt[3]{d_{QL1}d_{QL2}d_{QL3}}$

2.) Kahe piksekaitsetrossiga õhuliinil on $d_{QL} = \sqrt[6]{d_{Q1L1}d_{Q1L2}d_{Q1L3}d_{Q2L1}d_{Q2L2}d_{Q2L3}}$

Ekvivalentse juhtme sügavus δ sõltub pinnase eritakistusest (vt tabel 6.1) ning arvutatakse valemiga 6.4 [1]. Joonisel 6.1 on esitatud ekvivalentse juhtme sügavuse δ sõltuvusgraafik pinnase eritakistusest ρ .

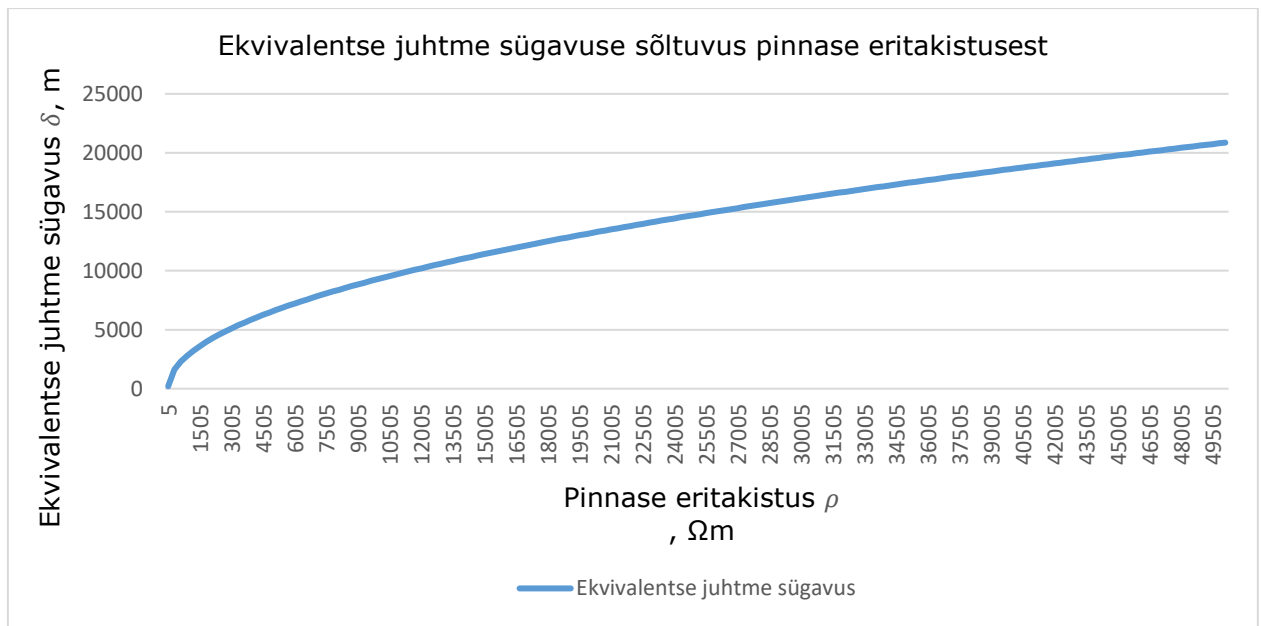
$$\delta = \frac{1,851}{\sqrt{\omega \frac{\mu_0}{\rho}}} \quad (6.4)$$

kus μ_0 – magnetiline konstant ehk vaakumi magnetiline läbitavus, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am
 ω - nurksagedus, $\omega = 2\pi f = 314$ 1/s.

Tabelis 6.1 on esitatud levinumad mõõdetud pinnase eritakistused vahelduvvoolu puhul.

Tabel 6.1 Pinnase eritakistused [6]

Pinnase tüüp	Pinnase eritakistus ρ Ωm
Soine pinnas	5 kuni 40
Liivsavi, savi, mustmuld	20 kuni 200
Liiv	200 kuni 2000
Kruus	2000 kuni 30000
Murenenud kivim	Vähem kui 1000
Liivakivi	2000 kuni 3000
Graniit	Kuni 50000
Moreen	Kuni 30000



Joonis 6.1 Ekvivalentse juhtme sügavuse δ sõltuvus pinnase eritakistusest ρ

6.1 Õhuliinide vähendustegurite väärtused sagedusel 50Hz

Vähendustegur r määrab maaühendusvoolude jagunemise ühefaasilise lühise korral maapinna ja teiste juhtivate kontuuride vahel. Õhuliinidel on teiseks juhtivaks kontuuriks piksekaitsetrossid. Vähendusteguri väärtus sõltub paljudest teguritest ja tingimustest, mistõttu on väärtus varieeruv. Allpool on esitatud soovituslikud vähendustegurid 110 kV õhuliinide piksekaitsetrossidele [7].

Soovituslikud vähendustegurite väärtused 110 kV õhuliinide piksekaitsetrossidele [7]:

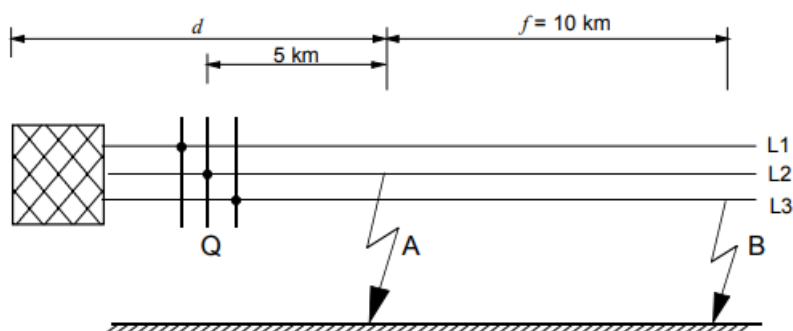
- Teras 50 mm² kuni 70 mm², $r = 0,80 - 0,98$;
- ACSR 44/32 mm², $r = 0,77$;
- ACSR 300/50 mm², $r = 0,61$;
- AACSR 59-94 ühe piksekaitsetrossiga, $r = 0,70 - 0,85$;
- AACSR kahe piksekaitsetrossiga, $r = 0,60 - 0,80$;
- AACSR 116 - 288 ühe piksekaitsetrossiga, $r = 0,55 - 0,80$;
- AACSR 116 - 288 kahe piksekaitsetrossiga, $r = 0,50 - 0,70$;
- Kiudoptiline kaabel OPGW 157, $r = 0,60 - 0,70$;

7 ARVUTUSNÄITED

7.1 Keskpingevõrgus esineva kaksikmaaühendusrikke lühisvoolude arvutamine ühepoolse toitega õhuliinil

7.1.1 Lähteandmed

Lähteandmete valikul on lähtutud Eesti keskpingselise võrgu iseloomulikest parameetritest. Lähteandmed kehtivad tabelis 3.1 toodud ühepoolse toitega radiaalliiniga võrguskeemile. Vaadeldav keskpingseline võrk võib olla nii isoleeritud kui ka resonantsmaandatud neutraaliga. Andmed kehtivad joonisel 7.1 näidatud võrguskeemile.



Joonis 7.1 Keskpingevõrgu lähteskeem [1]

Süsteemiharu lähteandmed:

Keskpingevõrgu nimipinge $U_n = 10$ kV

Võrgusagedus $f = 50$ Hz

Süsteemiharu ja lühisekoha A vaheline kaugus $l_{QA} = 5$ km

Lühisekoha A ja lühisekoha B vaheline kaugus $l_{AB} = 10$ km

Süsteemiharu lühisvõimsus 10 kv võrgu lattidel $S''_{kQ} = 7$ MVA

Vastavalt IEC-60909:0 standardile loeme pingeteguri c võrdseks väärtusega 1,1, sest keskpingselise võrgu nimipinge on suurem kui 1 kV. Süsteemiharu Q pärijärgnevustakistus leitakse vastavalt standardile IEC-60909:0.

$$Z_Q = \frac{cU_n^2}{S'_{kQ}} = \frac{1,1 \cdot 10^2}{7} = 15,7 \Omega$$

$$X_Q = 0,995 \cdot Z_Q = 0,995 \cdot 15,7 = 15,6 \Omega$$

$$R_Q = 0,1 \cdot X_Q = 0,1 \cdot 15,6 = 1,56 \Omega$$

$$\underline{Z}_{Q(1)} = 1,56 + j15,6 \Omega$$

Õhuliini lähteandmed:

Õhuliini parameetrid on valitud masti tüüp B järgi tabelist 5.2. Mast B on tüüpiline Eestis leiduv keskpinge võrgu õhuliini mast. Keskpinge võrgus piksekaitsetrosse ei kasutata, mistõttu arvutustes piksekaitsetrosse ei arvestata.

Faasijuhtmed 3x1x45 mm², Cu

Õhuliini pärijärgnevustakistus $\underline{Z}'_{(1)} = 0,746 + j0,396 \frac{\Omega}{\text{km}}$

Õhuliini nulljärgnevustakistus $\underline{Z}'_{(0)} = 0,854 + j1,643 \frac{\Omega}{\text{km}}$

Pinnaseks on valitud, liiv, kruus, murenenud kivim, liivakivi.

Valitud pinnase eritakistus $\rho = 1000 \Omega\text{m}$ on võetud tabelist 7.2.

Ekvivalentse juhtme sügavus $\delta = 2946 \text{ m}$ (vt. valem 6.4)

Õhuliini masti maandustakistus $R_T = 45 \Omega$ (vt. tabel 6.3)

Õhuliini visangu pikkus $d_T = 60 \text{ m}$

7.1.2 Arvutused

Arvutused teostatakse kompleksarvuliste väärtustega arvutamise lihtsustamiseks tarkvaraga Matlab.

Keskpinge võrgus on õhuliinid ilma piksekaitsetrossita, mistõttu lühistatud õhuliini lühisvoolud sulguvad ainult läbi maapinna ning sellisel juhul on kaksikmaaühendusrikked korral läbi maa kulgev osalühisvool $I_{E\delta}$ võrdne ülimööduvalühisvooluga I''_{kEE} .

Ühepoolse toitega õhuliini ülimööduva lühisvoolu I''_{kEE} arvutamiseks tuleb vastavalt valemile 3.7 esmalt leida takistused $6\underline{Z}_{(1)d}$, $2\underline{Z}_{(1)f}$ ja $\underline{Z}_{(0)f}$. Takistus $6\underline{Z}_{(1)d}$ vastab

süsteemiharu Q ja lühisekoha A vahelisele pärijärgnevustakistusele. Takistus $2\underline{Z}_{(1)f}$ vastab lühisekoha A ja B vahelisele pärijärgnevustakistusele ning $\underline{Z}_{(0)f}$ vastavalt lühisekohtade A ja B vahelisele nulljärgnevustakistusele.

$$6\underline{Z}_{(1)d} = 6 \cdot [(\underline{Z}_{Q(1)}) + l_{QA} \cdot (\underline{Z}'_{(1)})] = 6 \cdot [(1,56 + j15,6) + 5 \cdot (0,746 + j0,396)] = 31,74 + j105,5 \Omega$$

$$2\underline{Z}_{(1)f} = 2 \cdot l_{AB}(\underline{Z}'_{(1)}) = 2 \cdot 10(0,746 + j0,396) = 14,92 + j7,92 \Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)f} = l_{AB}\underline{Z}'_{(0)} = 10(0,854 + j1,643) = 8,54 + j16,43 \Omega$$

Arvutame ülimööduva lühisvoolu I''_{kEE} vastavalt valemile 4.7:

$$I''_{kEE} = I_{E\delta} = \frac{3cU_n}{|6\underline{Z}_{(1)d} + 2\underline{Z}_{(1)f} + \underline{Z}_{(0)f}|} = \frac{3 \cdot 1,1 \cdot 10}{(31,74 + 14,92 + 8,54) + j(105,5 + 7,92 + 16,43)} = 0,092 - j0,22 \text{ kA}$$

$$I''_{kEE} = \sqrt{(0,092)^2 + (0,22)^2} = 0,23 \text{ kA}$$

Võttes arvesse asjaolu, et Eesti keskpingevõrgus on üldiselt kasutusel immutatud puitmastid, mida maandada ei tohi, sest mastide liigpingete taluvuse nivoo on liiga madal. Maandatakse ainult lahtuspunktid. Sellises olukorras sulgub isoleeritud neutraaliga elektrivõrgus lühisvool ainult läbi faasijuhtmete ja maa vahelise mahtuvuse.

7.2 Läbi maa sulguvate osalühisvoolude arvutamine kõrgepingevõrgus

7.2.1 Lähteandmed

Lähteandmete valikul on lähtunud teoreetilistest allikatest leitud reaalistest parameetritest. Kõrgepingevõrgus kasutatakse jäikmaandatud neutraali. Lähteskeemid on esitatud enne lahenduskäiku.

Elektrivõrgu lähteandmed:

Võrgu nimipinge $U_n = 110 \text{ kV}$

Sagedus $f = 50 \text{ Hz}$

Alajaama A lähteandmed:

Trafo nimivõimsus $S_{nT} = 31,5 \text{ MVA}$

Trafo primaarmähise nimipinge $U_{nT1} = 112 \text{ kV}$

Trafo sekundaarmähise nimipinge $U_{nT2} = 22,2$ kV

Trafo lühispinge protsentides $u_{k\%} = 12,8$

Trafo lühispinge aktiivkomponent protsentides $u_{kR\%} = 0,37$

Trafo takistuste arvutamisel loeme aktiivtakistuse võrdseks nulliga ning arvestame arvutamisel ainult reaktiivtakistusega $x_T = Z_T = \frac{u_{k\%} U_{nT1}^2}{100 S_{nT}} = \frac{12,8 \cdot 112^2}{100 \cdot 31,5} = 51 \Omega$

Trafo nulljärgnevustakistuse arvutamisel korrutatakse pärijärgnevustakistus läbi teguriga b , mille väärtus on ligikaudsel lahendamisel $b=0,9$.

Trafo pärijärgnevustakistus $\underline{Z}_{(1)A} = 0 + j51 \Omega$

Trafo nulljärgnevustakistus $\underline{Z}_{(0)A} = b \underline{Z}_{(1)A} = 0,9(0 + j51) = 0 + j45,9 \Omega$

Alajaama B lähteandmed:

Trafo pärijärgnevustakistus $\underline{Z}_{(1)B} = 0 + j7,6 \Omega$

Trafo nulljärgnevustakistus $\underline{Z}_{(0)B} = 0 + j7 \Omega$

Alajaama maanduskontuuri valgumistakistus $R_{EB} = 5 \Omega$

Alajaama C lähteandmed:

Trafo pärijärgnevustakistus $\underline{Z}_{(1)C} = 0 + j21 \Omega$

Trafo nulljärgnevustakistus $\underline{Z}_{(0)C} = 0 + j20,3 \Omega$

Õhuliini lähteandmed:

Õhuliini parameetrid on valitud masti tüüp C järgi tabelist 5.2. Mast C on tüüpiline Eestis leiduv 110 kV õhuliini mast. Õhuliinil on üks piksekaitsetross.

Faasijuhtmed $3 \times 1 \times 185$ mm² ACSR

Õhuliini pärijärgnevustakistus $\underline{Z}'_{(1)L} = 0,156 + j0,395 \frac{\Omega}{\text{km}}$

Õhuliini nulljärgnevustakistus $\underline{Z}'_{(0)L} = 0,370 + j1,34 \frac{\Omega}{\text{km}}$

Pinnase eritakistus valitakse tabelist 6.1. Pinnaseks on liiv.

Pinnase eritakistus $\rho = 1000 \Omega\text{m}$

Ekvivalentse juhtme sügavus $\delta = 2946 \text{ m}$ (vt. valem 6.4)

Õhuliini masti maandustakistus $R_T = 15 \Omega$ (vt. tabel 5.3)

Õhuliini visangu pikkus $d_T = 180 \text{ m}$

Alajaamade A ja B vahelise õhuliini pikkus $l_1 = 20 \text{ km}$

Alajaamade B ja C vahelise õhuliini pikkus $l_2 = 30 \text{ km}$

Piksekaitsetrossi lähteandmed:

Piksekaitsetrosside arv $v = 1$

Terasest piksekaitsetross $1 \times 50 \text{ mm}^2$

Terasest piksekaitsetrossi raadius $r_Q = 4 \text{ mm}$ [8]

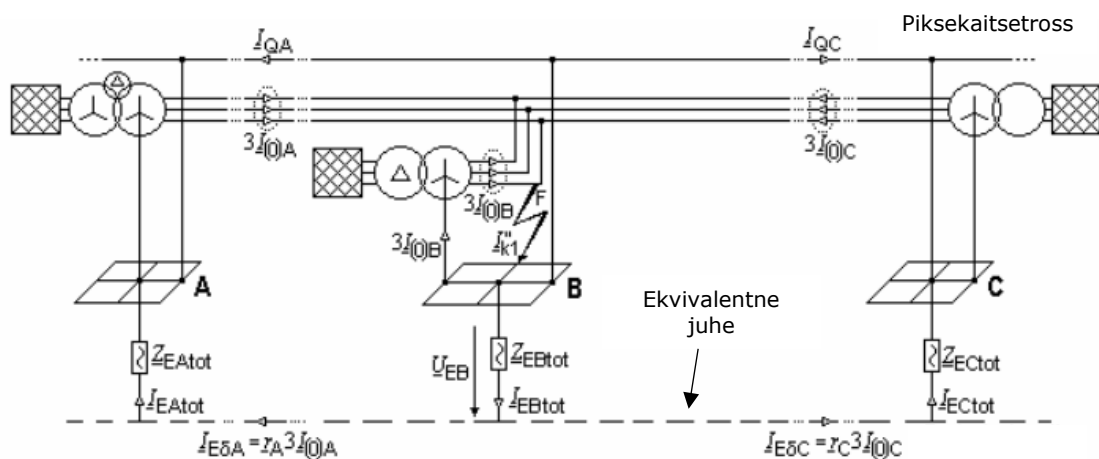
Terasest piksekaitsetrossi aktiivtakistus $R'_Q = 0,72 \frac{\Omega}{\text{km}}$ [8]

Piksekaitsetrossi suhteline magnetiline läbitavus $\mu_r \approx 75$ (vt. peatükk 6)

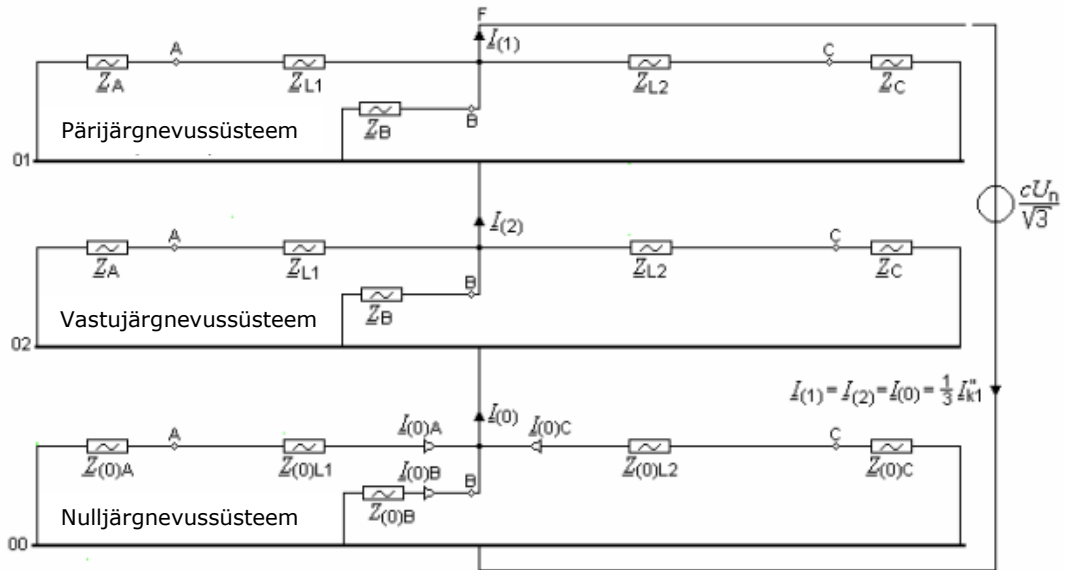
Piksekaitsetrossi vähendustegur $r_A = r_C = r \approx 0,8$ (vt. alapeatükk 6.1)

Piksekaitsetrossi näivtakistus $Z'_Q = \frac{R'_Q}{v} + \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{\mu_r}{4v} + \ln \frac{\delta}{r_{QQ}} \right) = 0,72 \frac{\Omega}{\text{km}}$ (vt. valem 6.2)

7.2.2 Ühefaasiline lühis alajaamas



Joonis 7.2 Alajaamas B toimuva ühefaasilise lühise lähteskeem [1]



Joonis 7.3 Päri-, vastu- ja nulljärgnevusvoolude jagunemine alajaama sisese ühefaasilise lühise korral [1]

Kõigepealt arvutatakse nulljärgnevusvoolude leidmiseks ühefaasiline lühisvool I''_{k1} vastavalt standardile IEC 60909-0. Ühefaasilise lühisvoolu arvutamiseks on vaja leida päri-, vastu- ja nulljärgnevustakistused $Z_{(1)}$, $Z_{(2)}$ ja $Z_{(0)}$.

Päri- ja vastujärgnevustakistused on võrdsed ning leitakse vastavalt joonise 8.2 lähteskeemile alajaamade A, B ja C ning nende vaheliste õhuliinide päri- ja vastujärgnevustakistuste kaudu. Õhuliinide päri- ja vastujärgnevustakistused on läbi korrutatud alajaamade vaheliste kaugustega l_1 ja l_2 . Tegu on rööpühendusega.

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{(1)A} + \underline{Z}_{(1)L1}} + \frac{1}{\underline{Z}_{(1)B}} + \frac{1}{\underline{Z}_{(1)C} + \underline{Z}_{(1)L2}}} = 0,1617 - j5,6024 \Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)L1}} + \frac{1}{\underline{Z}_{(0)B}} + \frac{1}{\underline{Z}_{(0)C} + \underline{Z}_{(0)L2}}} = 0,1451 - j5,7947 \Omega$$

Ülimööduva lühisvoolu arvutamine vastavalt standardile IEC 60909-0:

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 110}{2(0,1617 - j5,6024) + (0,1451 - j5,7947)} = 0,3395 - j12,3190 \text{ kA}$$

$$I''_{k1} = \sqrt{(0,3395)^2 + (12,3190)^2} = 12,32 \text{ kA}$$

Ühefaasilise lühise korral on ülimööduv lühisvool vastavalt valemile 4.1 võrdne kolmekordse nulljärgnevusvooluga. Valemist 4.1 saame avaldada lühisekoha nulljärgnevusvoolu $I_{(0)}$.

$$I_{(0)} = \frac{1}{3} I''_{k1} = \frac{1}{3} (0,3395 - j12,3190) = 0,1132 - j4,1063 \text{ kA}$$

Osa-nulljärgnevuslühisvoolud $I_{(0)A}$, $I_{(0)B}$ ja $I_{(0)C}$ vastavalt voolude jagunemisele joonise 7.3 põhjal on järgmised:

$$I_{(0)A} = 0,0461 - j0,346 \text{ kA}$$

$$I_{(0)B} = 0,0467 - j3,6139 \text{ kA}$$

$$I_{(0)C} = 0,0204 - j0,146 \text{ kA}$$

Kogu alajaama maaühendusvool I_{EBtot} läbib alajaama ekvivalentset maandustakistust Z_{EBtot} ning arvutatakse vastavalt valemile 4.4.

$$\underline{I}_{EBtot} = \underline{r} \cdot 3(I_{(0)A} + I_{(0)C}) = 0,2227 - j9,5038 \text{ kA}$$

$$I_{EBtot} = \sqrt{(0,2227)^2 + (9,5038)^2} = 9,51 \text{ kA}$$

Ekvivalentse maandustakistuse Z_{EBtot} arvutamiseks on vaja teada lõpmatu pikkusega õhuliini ahelimpedantsi Z_P , mis arvutatakse vastavalt valemile 1.1.

$$\underline{Z}_P = 0,5(\underline{Z}'_Q \cdot d_T) + \sqrt{(0,5\underline{Z}'_Q \cdot d_T)^2 + R_T(\underline{Z}'_Q \cdot d_T)} = 2,2274 \Omega$$

Teades lõpmatu pikkusega õhuliini ahelimpedantsi Z_P ja alajaama B valgumistakistust R_{EB} arvutatakse valemiga 4.5 ekvivalentne maandustakistus Z_{EBtot} .

$$\underline{Z}_{EBtot} = \frac{1}{\frac{1}{R_{EB}} + \frac{1}{Z_P}} = 0,9108 \Omega$$

Alajaama maandustakistust Z_{EBtot} läbib maaühendusvool I_{EBtot} põhjustab alajaamas B maapotentsiaali U_{EB} tõusu. Alajaama B maapotentsiaal arvutatakse valemiga 4.6.

$$\underline{U}_{EB} = \underline{Z}_{EBtot} \underline{I}_{EBtot} = 0,2029 - j8,6562 \text{ kV}$$

$$U_{EB} = \sqrt{(0,2029)^2 + (8,6562)^2} = 8,66 \text{ kV}$$

$3I_{(0)A}$ ja $3I_{(0)C}$ sulguvad läbi maapinna ning alajaamu A, B, C ühendava õhuliini piksekaitsetrossi. Piksekaitsetrossi läbivad voolud I_{QA} ja I_{QC} ning läbi maa sulguvad voolud $I_{E\delta A}$ ja $I_{E\delta C}$ arvutatakse vastavalt valemitega 4.2 ning 4.3.

$$\underline{I}_{QA} = (1 - \underline{r}_A)3I_{(0)A} = (1 - 0,8) \cdot 3I_{(0)A} = 0,0277 - j0,2076 \text{ kA}$$

$$I_{QA} = \sqrt{(0,0277)^2 + (0,2076)^2} = 0,21 \text{ kA}$$

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \frac{1}{\frac{1}{(\underline{Z}'_{(1)L^{12b}} + \underline{Z}_{(1)C}) + \frac{1}{\frac{1}{(\underline{Z}'_{(1)L^{12a}} + \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{(1)B} + \underline{Z}_{(1)A} + \underline{Z}_{(1)L1}}}}}}}} = 2,1705 + j11,8209 \Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{1}{\frac{1}{(\underline{Z}'_{(0)L^{12b}} + \underline{Z}_{(0)C}) + \frac{1}{\frac{1}{(\underline{Z}'_{(0)L^{12a}} + \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{(0)B} + \underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)L1}}}}}}}} = 4,4825 + j23,5343 \Omega$$

Arvutame ülimööduva lühisvoolu vastavalt standardile IEC 60909-0:

$$\underline{I}''_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 110}{2(2,1705 + j11,8209) + (4,4825 + j23,5343)} = 0,8028 - j4,2923 \text{ kA}$$

$$\underline{I}''_{k1} = \sqrt{(0,8028)^2 + (4,2923)^2} = 4,37 \text{ kA}$$

Ühefaasilise lühise korral on ülimööduv lühisvool vastavalt valemile 4.1 võrdne kolmekordse nulljärgnevusvooluga. Valemist 5.1 saame avaldada lühisekoha nulljärgnevusvoolu $\underline{I}_{(0)}$.

$$\underline{I}_{(0)} = \frac{1}{3} \underline{I}''_{k1} = \frac{1}{3} (0,8028 - j4,2923) = 0,2676 - j1,4308 \text{ kA}$$

Nulljärgnevus-osalühisvoolude $\underline{I}_{(0)A}$ ja $\underline{I}_{(0)B}$ arvutamiseks on vaja määrata lühisekohast ehk õhuliini mastist T paremale ja vasakule jäävad osalühisvoolud $\underline{I}_{(0)a}$ ja $\underline{I}_{(0)b}$.

$$\underline{I}_{(0)a} = \underline{I}_{(0)} \frac{(\underline{Z}'_{(0)L^{12b}} + \underline{Z}_{(0)C})}{(\underline{Z}'_{(0)L^{12b}} + \underline{Z}_{(0)C}) + \frac{1}{\frac{1}{(\underline{Z}'_{(0)L^{12a}} + \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{(0)B} + \underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)L1}}}}}}}} = 0,2298 - 1,0384 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(0)b} = \underline{I}_{(0)} - \underline{I}_{(0)a} = (0,2676 - j1,4308) - (0,2298 - 1,0384) = 0,0378 - j0,3924 \text{ kA} = \underline{I}_{(0)c}$$

Nulljärgnevus-osalühisvoolu $\underline{I}_{(0)a}$ kaudu avaldatakse $\underline{I}_{(0)A}$ ja $\underline{I}_{(0)B}$.

$$\underline{I}_{(0)A} = \underline{I}_{(0)a} \frac{\underline{Z}_{(0)B}}{\underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)B} + \underline{Z}_{(0)L1}} = 0,0284 + j0,0886 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(0)A} = \sqrt{(0,0284)^2 + (0,0886)^2} = 0,0930 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(0)B} = \underline{I}_{(0)a} \frac{\underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)L1}}{\underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)B} + \underline{Z}_{(0)L1}} = 0,2014 - j0,9498 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(0)B} = \sqrt{(0,2014)^2 + (0,9498)^2} = 0,9709 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(0)c} = \sqrt{(0,0378)^2 + (0,9498)^2} = 0,9498 \text{ kA}$$

Teades ühefaasilist ülimööduvat lühisvoolu I''_{k1} ja vähendustegurit r on võimalik arvutada kogu maaühendusvool I_{ETtot} alajaamast kaugel asuval lühistatud õhuliinimastil T vastavalt valemile 4.9.

$$I_{ETtot} = r I''_{k1} = 0,8 \cdot (0,8028 - j4,2923) = 0,6422 - j3,4338 \text{ kA}$$

$$I_{ETtot} = \sqrt{(0,6422)^2 + (3,4338)^2} = 3,52 \text{ kA}$$

Maaühendusvool I_{ETtot} läbib lühistatud õhuliini masti T ekvivalentset maandustakistust Z_{ETtot} . Õhuliini masti T ekvivalentne maandustakistus Z_{ETtot} avaldatakse lõpmatu pikkusega õhuliini ahelimpedantsi Z_P ja maandustakistuse R_T kaudu vastavalt valemile 4.10.

$$Z_P = 0,5(Z'_Q \cdot d_T) + \sqrt{(0,5Z'_Q \cdot d_T)^2 + R_T(Z'_Q \cdot d_T)} = 2,2274 \Omega$$

$$Z_{ETtot} = \frac{1}{\frac{1}{R_T} + \frac{2}{Z_P}} = \frac{1}{\frac{1}{15} + \frac{2}{2,2274}} = 1,0367 \Omega$$

Teades õhuliini masti T kogu maaühendusvoolu I_{ETtot} ja ekvivalentset maandustakistust Z_{ETtot} avaldame õhuliini masti maapotentiaali U_{ET} valemi 4.11 järgi.

$$U_{ET} = Z_{ETtot} I_{ETtot} = (2,2274)(0,6422 - j3,4338) = 0,6658 - j3,5599 \text{ kV}$$

$$U_{ET} = \sqrt{(0,6658)^2 + (3,5599)^2} = 3,62 \text{ kV}$$

Järgnevalt arvutatakse alajaamade A, B ja C ekvivalentsed maaühendusvoolud I_{EAtot} , I_{EBtot} ja I_{ECtot} vastavate alajaamade nulljärgnevus-osalühisvoolude $I_{(0)A}$, $I_{(0)B}$ ning $I_{(0)C}$ ja piksekaitsetrossi vähendusteguri r kaudu.

$$I_{EAtot} = r \cdot 3I_{(0)A} = 0,8 \cdot 3 \cdot 0,0930 = 0,22 \text{ kA}$$

$$I_{EBtot} = r \cdot 3I_{(0)B} = 0,8 \cdot 3 \cdot 0,9709 = 2,33 \text{ kA}$$

$$I_{ECtot} = r \cdot 3I_{(0)C} = 0,8 \cdot 3 \cdot 0,3942 = 0,95 \text{ kA}$$

Alajaama maandustakistust Z_{EBtot} läbib maaühendusvool I_{EBtot} põhjustab alajaamas B maapotentiaali U_{EB} tõusu. Alajaama B maapotentiaal U_{EB} arvutatakse valemiga 4.6 ning ekvivalentne maandustakistus Z_{EBtot} valemiga 4.5.

$$Z_{EBtot} = \frac{1}{\frac{1}{R_{EB}} + \frac{2}{Z_P}} = \frac{1}{\frac{1}{5} + \frac{2}{2,2274}} = 0,9108 \Omega$$

$$\underline{U}_{EB} = \underline{Z}_{EBtot} \underline{I}_{EBtot} = \underline{Z}_{EBtot} \cdot \underline{r} \cdot 3\underline{I}_{(0)B} = (0,9108) \cdot 0,8 \cdot 3 \cdot (0,2014 - j0,9498) = 0,4402 - j2,0762 \text{ kV}$$

$$U_{EB} = \sqrt{(0,4402)^2 + (2,0762)^2} = 2,12 \text{ kV}$$

$3\underline{I}_{(0)A}$ ja $3\underline{I}_{(0)C}$ sulguvad läbi maapinna ning alajaamu A, B, C ühendava õhuliini piksekaitsetrossi. Vastavad voolud \underline{I}_{QA} , $\underline{I}_{E\delta A}$ ning \underline{I}_{QC} ja $\underline{I}_{E\delta C}$ arvutatakse vastavalt valemitele 4.2 ja 4.3.

$$\underline{I}_{QA} = (1 - \underline{r}) 3\underline{I}_{(0)A} = (1 - 0,8) \cdot 3(0,0284 + j0,0886) = 0,0170 - j0,0531 \text{ kA}$$

$$I_{QA} = \sqrt{(0,017)^2 + (0,0531)^2} = 0,056 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{E\delta A} = \underline{r} \cdot 3\underline{I}_{(0)A} = 0,8 \cdot 3 \cdot 0,0930 = 0,22 \text{ kA}$$

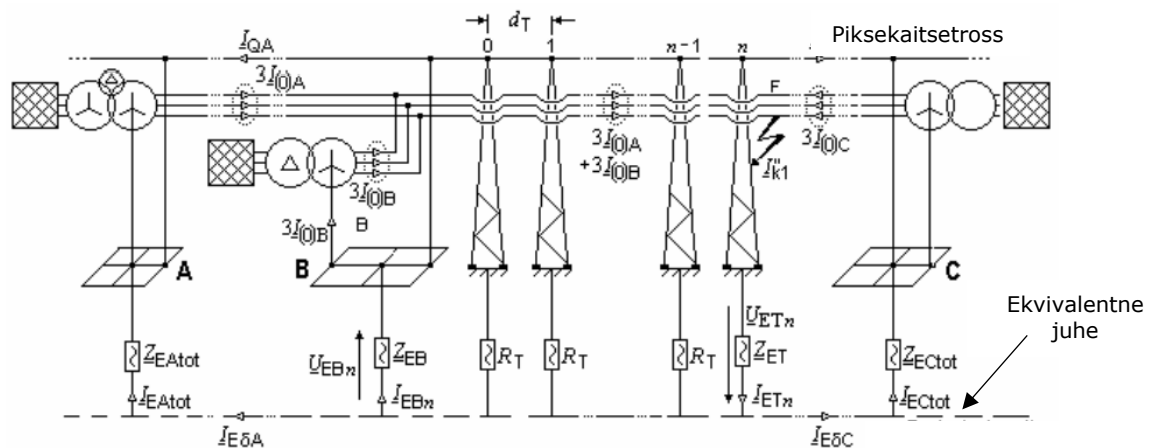
$$\underline{I}_{QC} = (1 - \underline{r}) 3\underline{I}_{(0)C} = (1 - 0,8) \cdot 3(0,0378 - j0,3924) = 0,0227 - j0,2354 \text{ kA}$$

$$I_{QC} = \sqrt{(0,0227)^2 + (0,2354)^2} = 0,24 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{E\delta C} = \underline{r} \cdot 3\underline{I}_{(0)C} = 0,6 \cdot 3 \cdot 0,3942 = 0,95 \text{ kA}$$

7.2.4 Ühefaasiline lühis alajaama lähedal asuval õhuliini mastil T

Ühefaasiline lühis leiab aset alajaamade B ja C vahelisel õhuliinimastil. Joonisel 7.5 on esitatud lähteskeem ühefaasilise lühise toimumisel alajaama lähedasel õhuliini mastil numbriga n=9. Masti kaugus alajaamast B on 3,5 km.



Joonis 7.3 Alajaama lähedasel õhuliini mastil T aset leidva ühefaasilise lühise lähteskeem [1]

Lahendus algab alati ühefaasilise lühisvoolu \underline{I}_{k1}'' arvutamisega lähtudes standardis IEC 60909-0 esitatud valemist. Kõigepealt leiame vaadeldava võrgu ekvivalentse päri-, vastu- ja nulljärgnevustakistused $\underline{Z}_{(1)}$, $\underline{Z}_{(2)}$ ja $\underline{Z}_{(0)}$.

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}'_{(1)L}(l_2-11 \cdot d_T) + \underline{Z}_{(1)C}} + \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}'_{(1)L} \cdot 11 \cdot d_T} + \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{(1)B} + \underline{Z}_{(1)A} + \underline{Z}_{(1)L1}}}}} = 2,0808 + j11,1054 \Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}'_{(0)L}(l_2-11 \cdot d_T) + \underline{Z}_{(0)C}} + \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}'_{(0)L} \cdot 11 \cdot d_T} + \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{(0)B} + \underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)L1}}}}} = 4,7104 + j23,1187 \Omega$$

Teades ekvivalentseid päri-, vastu- ja nulljärgnevustakistusi arvutame ühefaasilise lühisvoolu \underline{I}''_{k1} .

$$\underline{I}''_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 110}{2(2,0808 + j11,1054) + (4,7104 + j23,1187)} = 0,8715 - j4,4529 \text{ kA}$$

$$I''_{k1} = \sqrt{(0,8715)^2 + (4,4529)^2} = 4,54 \text{ kA}$$

Ühefaasilise lühisvoolu \underline{I}''_{k1} kaudu avaldame lühisekoha nulljärgnevusvoolu $\underline{I}_{(0)}$.

$$\underline{I}_{(0)} = \frac{1}{3} \underline{I}''_{k1} = \frac{1}{3} (0,8715 - j4,4529) = 0,2905 - j1,4843 \text{ kA}$$

Nulljärgnevus-osalühisvoolude $I_{(0)A}$ ja $I_{(0)B}$ arvutamiseks on vaja määrata lühisekohast ehk õhuliini mastist T paremale ja vasakule jäävad osalühisvoolud $I_{(0)a}$ ja $I_{(0)b}$.

$$\underline{I}_{(0)a} = \underline{I}_{(0)} \frac{\underline{Z}'_{(0)L}(l_2-11 \cdot d_T) + \underline{Z}_{(0)C}}{\underline{Z}'_{(0)L}(l_2-11 \cdot d_T) + \underline{Z}_{(0)C} + \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}'_{(0)L} \cdot 11 \cdot d_T} + \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{(0)B} + \underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)L1}}}}} = 0,2295 - j1,2145 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(0)b} = \underline{I}_{(0)} - \underline{I}_{(0)a} = (0,2905 - j1,4843) - (0,2295 - j1,2145) = 0,0610 - j0,2698 \text{ kA}$$

Nulljärgnevus-osalühisvoolu $I_{(0)a}$ kaudu avaldatakse alajaama A ja B nulljärgnevus-osalühisvoolud $I_{(0)A}$ ja $I_{(0)B}$.

$$\underline{I}_{(0)A} = \underline{I}_{(0)a} \frac{\underline{Z}_{(0)B}}{\underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)B} + \underline{Z}_{(0)L1}} = 0,0298 - j0,2698 \text{ kA}$$

$$I_{(0)A} = \sqrt{(0,0298)^2 + (0,2698)^2} = 0,11 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(0)B} = \underline{I}_{(0)a} \frac{\underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)L1}}{\underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)B} + \underline{Z}_{(0)L1}} = 0,1197 - j1,1106 \text{ kA}$$

$$I_{(0)B} = \sqrt{(0,1197)^2 + (1,1106)^2} = 1,13 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(0)C} = \underline{I}_{(0)b} = 0,0610 - j0,2698 \text{ kA}$$

$$I_{(0)C} = \sqrt{(0,0610)^2 + (0,2698)^2} = 0,28 \text{ kA}$$

Läbi lühisega masti T_9 maandustakistuse \underline{Z}_{ET} sulguv maaühendusvool \underline{I}_{ET9} leitakse lühisekoha maaühendusvoolu $\underline{r}_C \underline{I}_{k1}''$ ja alajaama B trafo nullpunkti läbiva voolu $\underline{r}_C 3\underline{I}_{(0)B}$ superpositsiooni teel vastavalt valemile 4.15.

Kõigepealt on vaja arvutada lõpliku pikkusega õhuliini ahelimpedants \underline{Z}_{Pn} , mis avaldatakse teguri \underline{k} ja alajaama B maandustakistuse \underline{Z}_{EB} kaudu valemiga 1.3. Tegur \underline{k} avaldatakse valemist 1.4. Arvutustes kasutame ka lõpmatu pikkusega õhuliini ahelimpedantsi \underline{Z}_P , mis on arvutatud eelmises näiteülesandes $\underline{Z}_P = 2,2274 \Omega$.

$$\underline{k} = 1 + \frac{\underline{Z}_P}{R_T} = 1 + \frac{2,2274}{15} = 1,1485$$

$$\underline{Z}_{EB} = \frac{1}{\frac{1}{R_{EB}} + \frac{1}{\underline{Z}_P}} = \frac{1}{\frac{1}{5} + \frac{1}{(2,2274)}} = 1,5409 \Omega$$

$$\underline{Z}_{P9} = \frac{\underline{Z}_P(\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P)\underline{k}^n + (\underline{Z}_P - \underline{Z}'_Q \cdot d_T)(\underline{Z}_{EB} - \underline{Z}_P + \underline{Z}'_Q \cdot d_T)\underline{k}^{-n}}{(\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P)\underline{k}^n - (\underline{Z}_{EB} - \underline{Z}_P + \underline{Z}'_Q \cdot d_T)\underline{k}^{-n}} = 2,1913 \Omega$$

Järgnevalt arvutatakse lühistatud õhuliinimasti T_9 maandustakistus \underline{Z}_{ET} vastavalt valemile 4.16.

$$\underline{Z}_{ET} = \frac{1}{\frac{1}{R_T} + \frac{1}{\underline{Z}_P}} = 1,9394 \Omega$$

Nüüd on olemas kõik parameetrid maaühendusvoolu \underline{I}_{ET9} arvutamiseks vastavalt valemile 4.15.

$$\underline{I}_{ET9} = \underline{r}_C \underline{I}_{k1}'' \frac{\underline{Z}_{P9}}{\underline{Z}_{P9} + \underline{Z}_{ET}} - \underline{r}_C 3\underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EB}}{\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P} \cdot \frac{1}{\underline{k}^n} = 1,6044 - j7,9967 \text{ kA}$$

$$I_{ET9} = \sqrt{(1,6044)^2 + (7,9967)^2} = 8,16 \text{ kA}$$

Teades maaühendusvoolu \underline{I}_{ET9} ja masti T maandustakistust \underline{Z}_{ET} avaldub valemist 4.18 õhuliini masti T maapotentiaal \underline{U}_{ET9} .

$$\underline{U}_{ET9} = \underline{Z}_{ET} \underline{I}_{ET9} = 3,1117 - j15,5088 \text{ kV}$$

$$U_{ET9} = \sqrt{(3,1117)^2 + (15,5088)^2} = 15,82 \text{ kV}$$

Alajaama B maaühendusvool \underline{I}_{EB9} , kui lühisekohaks on alajaama lähendane õhuliini mast T_9 , läbib alajaama maandustakistust \underline{Z}_{EB} . Alajaama B maaühendusvool \underline{I}_{EB9} arvutatakse valemiga 4.19.

$$\underline{I}_{EB9} = \underline{r}_C \underline{I}_{k1}'' \frac{\underline{Z}_{ET}}{\underline{Z}_{ET} + \underline{Z}_{Pn}} \cdot \frac{2\underline{Z}_P - \underline{Z}'_Q \cdot d_T}{(\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P)\underline{k}^n - (\underline{Z}_{EB} - \underline{Z}_P + \underline{Z}'_Q \cdot d_T)\underline{k}^{-n}} - \underline{r}_C 3\underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_P}{\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P} = 0,4182 - j2,0088 \text{ kA}$$

$$I_{EB9} = \sqrt{(0,4182)^2 + (2,0088)^2} = 2,05 \text{ kA}$$

Teades alajaama maaühendusvoolu I_{EB9} on võimalik arvutada ka maapotentiaal \underline{U}_{EB9} vastavalt valemile 4.20.

$$\underline{U}_{EB9} = \underline{Z}_{EB} I_{EB9} = 0,6444 - j3,09555 \text{ kV}$$

$$U_{EB9} = \sqrt{(0,6444)^2 + (3,09555)^2} = 3,16 \text{ kV}$$

Võrreldes alajaama B maapotentiaale U_{EB} ühefaasilise lühise esinemisel alajaama läheduses ning alajaamast kaugel asuval õhuliinimastil T on vastavalt teooriale suurem maapotentiaal juhul kui ühefaasiline lühis toimub alajaama läheduses. Maapotentiaal ühefaasilise lühise esinemisel alajaama läheduses on $U_{EB} = 3,16 \text{ kV}$ ning alajaamast kaugel lühise korral $U_{EB} = 2,12 \text{ kV}$.

KOKKUVÕTE

Ühefaasilised lühised on elektrivõrgus üheks sagedamini esinevaks rikketüübiks. Bakalaureusetöö eesmärgiks oli selgitada standardis EVS-EN 60909:3-2010 käsitletud teoreetilisi seisukohti ja koostada arvutusnäited läbi maa kulgevate osalühisvoolude arvutamiseks ühefaasiliste lühiste korral kesk- ja kõrgepingevõrgus. Oluliseks eesmärgiks oli luua täiendav käepärane õppematerjal koos arvutusnäidetega õppeaine lühised AEK0240 üliõpilastele või lühiste arvutamisega kokku puutuvatele elektroenergeetikutele.

Standard on juriidiline dokument ning ei ole sobiv õppematerjaliks. Eesmärgi täitmiseks tuli standard tõlkida ja kohendada üliõpilastele läbi maa kulgevate lühisvoolude arvutusprotsessi selgitamiseks. Bakalaureusetöös käsitleti vastavalt standardile EVS-EN 60909:3-2010 nelja põhiteemat koos selgitavate osadega seitsmes peatükis.

Esimeses peatükis toodi välja lõputöös käsitletava teooria seisukohalt olulisemad ja laialdasemalt levinumad põhiterminid ning terminite määratlused.

Teises peatükis antakse ülevaade maaühendusvoolude kujunemisest sõltuvalt elektrivõrgu neutraali maandusviisist. Elektrivõrgu neutraal võib olla maast isoleeritud, vahetult maandatud või maandatud läbi kaarekustuspooli.

Töö põhiosa kolmandas peatükis anti ülevaade õhuliinides esineda võiva kaksikmaaühendusrikke korral tekkivate lühisvoolude arvutamisest. Arvutatavate lühisvoolude hulka kuuluvad ülilmööduv lühisvool, löökvool ja lahtusvool. Lisaks on toodud näiteid kaksikmaaühendusrikke lihtsamatest juhtudest ja kirjeldatakse lühisvoolude jagunemist maa ja muude juhtivate kontuuride vahel.

Töö põhiosa neljandas suuremas peatükis keskenduti läbi maa kulgevate osalühisvoolude arvutamisele kõrgepingevõrgus esineva ühefaasilise lühisekorral sõltuvalt lühisekohast. Arvutuslikud alused käsitlevad ühefaasilist lühist alajaamas, alajaamast kaugel asuval õhuliinimastil aset leidvat ühefaasilist lühist ning alajaama lähedasel õhuliinimastil toimuvat ühefaasilist lühist. Arvutuslikust seisukohast on oluline osata arvutada alajaama ja õhuliini masti maapotentsiaale, maaühendusvoole, ekvivalentseid maandustakistusi ning lühise korral läbi maa ja piksekaitsetrossi kulgevaid lühisvoole.

Töö viiendas peatükis käsitleti näiteülesannete lahendamise seisukohalt oluliste parameetrite õhuliini päri-, vastu- ja nulljärgnevustakistuste arvutusmetoodikat vastavalt standardile IEC 60909:0 ning antakse ülevaade piksekaitsetrossi mõjule õhuliini nulljärgnevustakistuste kujunemisel sõltuvalt piksekaitsetrossi aktiivtakistusest.

Töö kuuendas sisupeatükis käsitletakse õhuliini piksekaitsetrossi olemust ning piksekaitsetrossiga seotud olulisemate parameetrite arvutamist: piksekaitsetrossi vähendustegur r , näivtakistus pikkusühikus kohta \underline{Z}'_Q , ekvivalentne raadius r_{QQ} , keskmine geomeetiline vahekaugus õhuliini faasijuhtmete ja piksekaitsetrossi vahel d_{QL} ning ekvivalentse juhtme sügavus δ . Lisaks tuuakse levinumad 110 kV õhuliinide vähendustegurite väärtused võrgusagedusel 50 Hz.

Põhiosa viimases, seitsmendas peatükis on teoreetilise osa alusel koostatud arvutusnäited, kasutades Eesti elektrivõrgu elementidele asjakohaseid lähteandmeid. Näidisarvutused on loodud nii kaksikmaaühendusrikke jaoks keskpingevõrgus kui ka ühefaasilise lühise jaoks kõrgepingevõrgus. Arvutuskäik on esitatud samm-sammuliseks ülesande lahendamiseks vastavalt lühise asukohale elektrivõrgus. Kõik arvutused on tehtud kompleksarvudega arvutamise lihtsustamiseks matemaatilise tarkavara MATLAB-i abil.

Bakalaureusetöö tulemusel selgus, et keskpingevõrgu lõpmatu suur nulljärgnevustakistus muutub kaksikmaaühendusrikke korral lõpliku väärtusega takistuseks ja nulljärgnevuslühisvoolud saavad sulguda läbi maa. Kõrgepingevõrgus esineva ühefaasilise lühisekorral alajaama maapotentsiaali U_{EB} ja maaühendusvoolu I_{EB} väärtused on mõjutatud lühise asukohast alajaama suhtes. Ühefaasilise lühise esinemise korral alajaamas võib alajaama maaühendusvool ja maapotentsiaal olla väiksem kui alajaama lähedasel õhuliini mastil aset leidva ühefaasilise lühise korral, mistõttu on osalühisvoolude arvutamisel oluline kasutada asjakohast arvutusmetoodikat vastavalt lühise asukohale. Alajaama B maapotentsiaal ühefaasilise lühise esinemisel alajaama lähedasel õhuliini mastil $U_{EB} = 3,16$ kV ning alajaamast kaugel lühise korral $U_{EB} = 2,12$ kV ja alajaama sisese ühefaasilise lühise korral on alajaama maapotentsiaal $U_{EB} = 8,66$ kV. Maapotentsiaalide erinevus on tingitud maandustakistuste erinevusest alajaamas ja alajaama lähedasel õhuliini mastil. Õhuliini masti maandustakistus on suurem kui alajaama maandustakistus. Maaühendusvool alajaamas alajaama lähedasel õhuliini mastil aset leidva ühefaasilise lühise korral oli $I_{EB} = 2,05$ kA ning alajaama sisese ühefaasilise lühise korral $I_{EB} = 9,51$ kA.

KASUTATUD KIRJANDUS

[1] *EVS-EN 60909-3:2010 Short-Circuit currents in three-phase a.c systems. Part 3: Currents during two sperate simultaneous line-to-earth short-circuits and partial short-circuit currents flowing through earth.*

[2] E. Tiigimägi, *Elektrivõrgud*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2004. [Online]. Loetud aadressil: https://petz.planet.ee/elekter/ttu/el_vorgud_1-2.pdf. Kasutatud: 03.04.2023.

[3] Ü. Treufeldt, *Lühised loengukonspekt 5. osa*. Inseneriteaduskond, Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut, Taltech, 2022.

[4] Ü. Treufeldt, „Lühised elektrisüsteemides,“ asümmeetrilised lühised. Inseneriteaduskond, Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut, Taltech, 2002, lk 28-29.

[5] Ü. Treufeldt, „Lühised elektrisüsteemides,“ lühiste arvutamise alused. Inseneriteaduskond, Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut, Taltech, 2002, lk 105-108.

[6] R. Kivistik, „330/110 kV õhullini maanduse projekteerimine“, [Magistritöö], Inseneriteaduskond, Taltech, Tallinn, Eesti, 2019. [Online]. Loetud aadressil: <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/6e9fd316-ea32-4b4d-a1b1-87710ab0f80f>. Kasutatud 20.03.2023.

[7] IEC TR 60909-2:2008, Short-circuit currents in three-phase ac systems – Data of electrical equipment for short-circuit current calculations.

[8] Dehn International. Steel Wire. [www] <https://www.dehn-international.com/store/p/en-DE/F2355/round-wire-10mm-stst-1-4404-coil-length-approx-80m-?product=P2399>. Kasutatud 02.04.2023.