



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

KESKPINGE JAOTUSSEADME MERLIN GERIN RM6 INTEGREERIMINE ÕPPETÖÖSSE

INTEGRATING MEDIUM VOLTAGE SWITCHGEAR MERLIN GERIN RM6 INTO CURRICULAR ACTIVITIES

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Andra Laine

Üliõpilaskood: 213726EAAB

Juhendaja: Ivar Kiitam, teadur

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: Andra Laine

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetööle esitatud nõuetele

"18 " mai 2023

Juhendaja: Ivar Kiitam

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Andra Laine

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Keskpinge jaotusseadme Merlin Gerin RM6 integreerimine õppetöösse, mille juhendaja on Ivar Kiitam,

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

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Andra Laine

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Keskpinge jaotusseadme integreerimine õppetöösse

Kuupäev:
18.05.2023

93 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja: teadur Ivar Kiitam

Sisu kirjeldus:

Tallinna Tehnikaülikoolile on õppe- ja teadustöö edendamiseks annetatud keskpinge jaotusseade Merlin Gerin RM6. Käesoleva lõputöö eesmärgiks on koostada elektroenergeetika ja mehhatroonika õppekavasse sobilik laboratoorne töö, mille saaks lõimida õppetöösse ja mille raames saaks otstarbekalt kasutada ülikooli valduses olevat keskpinge jaotlat.

Jaotusseade on elektrivõrgus laialdaselt kasutatav lülitusseadmete komplekt, mis võimaldab teostada operatiivlülitamisi elektrisüsteemi ahelate kaitsmiseks ja katkestamiseks. Käsitletav jaotusseade Merlin Gerin RM6 on gaasisolatsiooniga sisejaotla, kus on neli kommutatsiooniseadet- kolm koormuslülitit ning võimsuslülitit. Koostatav laboratoorne töö pakub tudengitele võimaluse tutvuda jaotla ehituse ja tööpõhimõtetega. Lisaks käsitleb laboratoorne töö jaotusseadme seisukorra hindamist, lülitamiste kava koostamist ning jaotusseadme ja ühendatava kaabli valimist. Laboratoorse töö õpiväljundid toetavad elektrisüsteemi toimimise tervikpildi kujunemist.

Märksõnad: keskpinge, keskpinge jaotusseade, operatiivlülitamised, lülitamiste kava, releekaitse.

ABSTRACT

Author: Andra Laine

Type of the work: Bachelor Thesis

Title: Integrating Medium Voltage Switchgear Merlin Gerin RM6 into Curricular Activities

Date: 18.05.2023

93 pages

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor of the thesis: Researcher Ivar Kiitam

Abstract:

Tallinn University of Technology has received a medium-voltage switchgear Merlin Gerin RM6 as a donation to promote teaching and research at the university. The aim of this thesis is to create a suitable laboratory assignment to integrate the switchgear into the curricular activities of the Electrical Power Engineering and Mechatronics study program.

Switchgears are widely used in electrical grids, as they allow operational switching both to protect and disconnect electrical system circuits. Merlin Gerin RM6 is an indoor gas-insulated switchgear that consists of four switching devices - three switch-disconnectors and one circuit breaker. The laboratory assignment provides an opportunity for students to familiarize with the construction and operating principles of the switchgear. Additionally, the laboratory assignment includes the assessment of the switchgear's condition, the development of a switching schedule, and the selection of the switchgear and cable. The learning outcomes of the laboratory assignment help to form a comprehensive understanding of the operation of the electrical system.

Keywords: medium voltage, medium voltage switchgear, operational switching, switching schedule, protection relay.

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Keskpinge jaotusseadme Merlin Gerin RM6 integreerimine õppetöösse
Lõputöö teema inglise keeles:	Integrating Medium Voltage Switchgear Merlin Gerin RM6 into Curricular Activities
Üliõpilane:	Andra Laine, 213726EAAB
Eriala:	Elektroenergeetika ja mehhatroonika
Lõputöö liik:	bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	Ivar Kiitam
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	2022/2023 2022/2023 Kevad
Lõputöö esitamise tähtaeg:	18.05.2023

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Jaotusseade on elektrivõrgus laialdaselt kasutatav lülitus- ja kaitseseade. Lõputöö raames integreeritakse õppetöösse keskpinge jaotusseade Merlin Gerin RM6, mille tulemusel tutvuvad tudengid komplektalajaamas kasutatava jaotla ehituse ja tööpõhimõttega. Lisaks käsitletakse lülitamiste läbiviimisel kehtivaid üldnõudeid ning tööohutust tagavaid meetmeid. Koostatava praktilise töö raames saavad tudengid valida võrku paigaldatava jaotusseadme ja sellega ühendatavate kaablite parameetreid etteantud lähteandmete põhjal. Laboratoorne töö pakub üliõpilastele praktilise kogemuse, mis toetab elektrisüsteemi toimimise tervikpildi kujunemist. Lülitamiste imiteerimine ja seadmete valimine arendab erialases töös vajaminevaid teadmisi ning täiendab õppetöö praktilist osa elektroenergeetika peerialal.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on koostada elektroenergeetika ja mehhatroonika õppekavasse sobilik iseseisev ülesanne, mille saaks lõimida õppetöösse ja mille raames saaks otstarbekalt kasutada ülikooli valduses olevat keskpinge jaotusseadet Merlin Gerin RM6.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

1. Uurida keskpinge jaotusseadme olemust, ehitust ja tööpõhimõtet.
2. Tutvuda lülitamiste tööetappide ja jaotusseadme komponentide valimisel kehtivate nõuetega.
3. Koostada praktiline töö elektrivõrgus jaotusseadmega teostatavate lülitamiste imiteerimiseks ja seadmete valimiseks.
4. Analüüsida kuidas praktiline töö sobituks kõige paremini õppekavasse.

4. Lähteandmed

1. Eestis kehtivad keskpinge jaotusseadmeid käsitlevad standardid
2. Merlin Gerin RM6 tootjapoolsed andmed
3. Lülitamistoiminguid käsitlevad eeskirjad
4. Teemakohased veebimaterjalid ja teadusartiklid

5. Uurimismeetodid

Esmalt uuritakse keskpinge jaotusseadme olemust ja tööpõhimõtet ning tutvutakse lähemalt jaotlaga Merlin Gerin RM6 vaatluse, katsetamise ja kirjanduse analüüsi kaudu. Teostatakse uuring lülitamiste läbiviimise, tööetappide järjekorra, tööohutuse ning muude kehtivate nõuete kohta. Lisaks uuritakse seadmete valimisel kehtivaid nõudeid ning tutvutakse vajalike arvutustega. Kogutud teadmistele tuginedes koostatakse praktiline töö, mis teostatakse ja millele koostatakse näidisaruanne. Arvutuste läbiviimiseks kasutatakse peamiselt tabelarvutustarkvara.

6. Graafiline osa

Teksti sisu paremaks edasiandmiseks ja esitatud mõttekäikude illustreerimiseks esitatakse eelkõige töö põhiosas selgitavad joonised ja tabelid. Nende hulka kuuluvad jaotusseadme ehituslikud joonised, elektriskeemid, fotod olulistest komponentidest jms.

7. Töö struktuur

Sissejuhatus

1. Keskpinge jaotusseadmed
 - 1.1 Jaotusseadme kasutamine elektrivõrgus
 - 1.2 Jaotuseadme ehituse kirjeldus
 - 1.3 Jaotusseadme paigaldus
2. Lülitamised jaotusseadmega
 - 2.1 Lülitamiste läbiviimine jaotusseadmega
 - 2.2 Tööohutus lülitamistel

3. Seadmete valimine alajaama

- 3.1 Seadmete valimise põhimõtted
- 3.2 Võrgu parameetrite arvutamine seadmete valimiseks

4. Jaotusseadme integreerimine õppetöösse

- 4.1 Praktilise töö kirjeldus
- 4.2 Praktilise töö eesmärgid ning õpiväljundid
- 4.3 Omandatavate teadmiste analüüs
- 4.4 Praktilise töö sobitus õppeainetesse

Kokkuvõte

Lisa 1. Praktilise töö juhend

Lisa 2. Praktilise töö näidisaruanne

8. Kasutatud kirjanduse allikad

1. M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt, J. Kilter „Jaotusvõrgud “
2. Merlin Gerin RM6 andmeleht
3. Merlin Gerin RM6 paigaldusjuhend
4. Standard EVS-EN IEC 61936-1:2021 Tugevoolupaigaldised nimivahelduvpingega üle 1 kV ja alalispingega üle 1,5 kV. Osa 1: Vahelduvpinge
5. Jaotusseadmete tootjate juhendmaterjalid
6. Teemakohased veebimaterjalid ja teadusartiklid

9. Lõputöö konsultandid

Puuduvad.

10. Töö etapid ja ajakava

Lähteandmete kogumine, kirjandusega tutvumine (15.01.2023)

Esimene peatükk valmis ja esitatud juhendajale tutvumiseks (10.02.2023)

Teine peatükk valmis ja esitatud juhendajale tutvumiseks (10.03.2023)

Kolmas peatükk valmis ja esitatud juhendajale tutvumiseks (10.04.2023)

Neljas peatükk valmis ja esitatud juhendajale tutvumiseks (20.04.2023)

Praktilise töö juhend ja näidisaruanne on valmis ning esitatud juhendajale tutvumiseks (30.04.2023)

Viimaste paranduste sisseviimine (05.05.2023)

Lõputöö valmis (10.05.2023)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	11
Lühendite ja tähiste loetelu	12
SISSEJUHATUS	14
1 KESKPINGE JAOTUSSEADE	15
1.1 Keskpinge jaotusseadmest üldiselt	15
1.1.1 Välis- ja sisejaotlad	15
1.1.2 Õhk- ja gaasisolatsiooniga keskpinge jaotlad	16
1.2 Elektrihaar	16
1.3 Lülitusseadmed keskpinge jaotusseadmest	17
1.4 Keskpinge jaotusseade Merlin Gerin RM6	18
1.4.1 Merlin Gerin RM6 ehitus	19
1.4.2 Merlin Gerin RM6 operaatori ohutust tagavad lahendused	21
1.4.3 Merlin Gerin RM6 paigaldus	23
2 LÜLITAMISED KESKPINGE JAOTUSSEADMEGA	25
2.1 Lülitamiste kava koostamine	25
2.2 Tähelepanekud lülitamiste õnnestumiseks	25
2.3 Tööohutusmeetmed	27
2.4 Lülitamiste läbiviimine	28
2.4.1 Lülitamised kommutatsiooniparaatidega	29
2.4.2 Lülitamistoimingud trafo sisse- ja väljalülitamiseks	30
2.4.3 Maandamine lülitamistoimingutel	31
3 SEADMETE VALIMISEL KEHTIVAD PÕHIMÕTTED	32
3.1 Jaotusseadme valimine	32
3.1.1 Jaotusseadme valimine lähtudes pingest	32
3.1.2 Jaotusseadme valimine lähtudes voolust	33
3.1.3 Lülitusseadmete valimine	37
3.2 Ühendatavate kaablite valimine	37
4 JAOTUSSEADME SEISUKORRA HINDAMINE	39
4.1 Käsitletava jaotusseadme seisukorra testimine	41
4.1.1 Lülitite proovilülitamine	41
4.1.2 Seadme testimine suurimal lubataval kestevpingel	41
4.1.3 Pingeindikaatorite testimine	43

4.1.4 Releekaitse rakendumise kontroll	44
5 JAOTUSSEADME INTEGREERIMINE ÕPPETÖÖSSE.....	48
5.1 Koostatava laboratoorse töö ülesehitus ja vajalikkus	48
5.2 Koostatava laboratoorse töö sobitumine õppekavasse	50
5.2.1 Laboratoorse töö integreerimine õppeainesse Alajaamad.....	51
KOKKUVÕTE	53
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	54
LISAD	56
LISA 1.....	57
LISA 2.....	76

EESSÕNA

Lõputöö teema püstitas juhendaja pakkudes välja seisma jäänud keskpinge jaotusseadme integreerimise õppetöösse. Koostöös juhendajaga otsustati koostada laboratoorne töö, mis võimaldaks läbi praktiliste näidete selgitada jaotla ehitust ja tööpõhimõtet. Laboratoorse töö koostamisel peeti silmas, et õpiväljundid toetaksid elektrisüsteemi toimimise tervikpildi kujunemist ning omandatavatest teadmistest oleks kasu erialasel tööl.

Soovin tänada juhendajat panustatud aja, sisukate ettepanekute ja eduka koostöö eest. Lisaks tänan õppejõudusid Jako Kilter, Paul Taklaja ja Reeli Kuhi-Thalfeldt kaasa mõtlemise ja heade soovitude jagamise eest.

Lühendite ja tähiste loetelu

c — pingetegur

I — vool

I_k — lühisvool

i_m — löökvool

$I_{t\%}$ — trafo tühijooksuvooll protsentides nimivoolust

κ — löögitegur

KOL — koormuslüliti

K_T — trafo parandustegur

l — liini pikkus

LL — lahklüliti

ML — maanduslüliti

P —aktiivvõimsus liinis

Q —reaktiivvõimsus liinis

r — ahela aktiivtakistus

R — trafo aktiivtakistus

R' — lühisekoha nimipingele taandatud aktiivtakistus

R_L — liini aktiivtakistus

R_Q — süsteemiharu aktiivtakistus

R_T — trafo aktiivtakistus

S — koormuse näivvõimsus

S_{kQ} — süsteemiharu lühisvõimsus

S_N — trafo nimivõimsus

S_{nT} — trafo nimivõimsus

Z — süsteemi näivtakistus enne lühisekohta

Z' — lühisekoha nimipingele taandatud näivtakistus

Z_Q — süsteemiharu näivtakistus

U — võrgu nimipinge

$u_{k\%}$ — trafo lühisepinge protsentides

$u_{kR\%}$ — trafo lühisepinge aktiivkomponent protsentides

$u_{kX\%}$ — trafo lühisepinge reaktiivkomponent protsentides

$u_{l\%}$ — lühisepinge protsentides nimipingest

U_N — trafo nimipinge

U_{n1} — lühisekoha pingeaaste

U_{n2} — lühisekoha pingeaastmest erinev pingeaaste

U_{nQ} — süsteemiharu nimipinge

U_{nT} — trafo lühise poolse mähise nimipinge

V_L — võimsuslüliti
 x — ahela reaktiivtakistus
 X — trafo reaktiivtakistus
 X' — lühisekoha nimipingele taandatud reaktiivtakistus
 X_L — liini induktiivtakistus
 X_Q — süsteemiharu reaktiivtakistus
 X_T — trafo reaktiivtakistus
 ΔP_{Cu} — trafo vaseskadu
 ΔP_I — trafo lühiskadu
 ΔP_L — liini summaarne aktiivkadu
 ΔP_T — trafo summaarne aktiivvõimsuskadu
 ΔP_t — trafo tühijooksu aktiivvõimsuskadu
 ΔQ_L — liini summaarne reaktiivkadu
 ΔQ_T — trafo summaarne reaktiivvõimsuskadu
 ΔQ_t — trafo tühijooksu reaktiivvõimsuskadu
 ΔQ_X — trafo puistekadu

SISSEJUHATUS

Jaotusseade on elektrivõrgus laialdaselt kasutatav lülitus- ja kaitseseade, mida kasutatakse elektrisüsteemi ahelate juhtimiseks, kaitsmiseks ja katkestamiseks. Tallinna Tehnikaülikoolile on annetatud teadus- ja õppetöö edendamiseks keskpinge jaotusseade Merlin Gerin RM6, kuid antud seade on senini seisnud kasutuseta. Sellest tulenevalt on käesoleva lõputöö eesmärgiks koostada elektroenergeetika ja mehhatroonika õppekavasse sobilik laboratoorne töö, mille saaks lõimida õppetöösse ja mille raames saaks otstarbekalt kasutada ülikooli valduses olevat keskpinge jaotlat.

Laboratoorse töö koostamisel lähtutakse soovist luua praktilisi oskuseid arendav töö, mille sooritamisel mõistaksid tudengid elektrivõrgus laialdaselt kasutatava gaasisolatsiooniga sisejaotla ehitust ja tööpõhimõtet. Koostatava praktilise töö raames saavad tudengid võimaluse tutvuda jaotusseadmega, imiteerida operatiivlülitamisi ning testida seadme komponentide seisukorda. Lisaks käsitletakse lülitamiste läbiviimisel kehtivaid põhimõtteid ning jaotusseadme ja jaotlaga ühendatava kaabli valimist. Laboratoorse töö õpiväljundid toetavad elektrisüsteemi toimimise tervikpildi kujunemist ning seejuures on töö sooritamisel omandatavad teadmised laiahaardelised ning arendavad erialases töös vajaminevaid oskuseid.

Lõputöö koosneb viiest osast. Esimeses peatükis selgitatakse, mis on jaotusseade, kirjeldatakse jaotlate liigitust ning seadmes kasutatavaid kommutatsiooniseadmeid. Seejärel tutvustatakse lähemalt jaotusseadme Merlin Gerin RM6 ehitust, operaatori ohutust tagavaid lahendusi ning seadme paigaldamise protsessi. Teises peatükis keskendutakse lülitamiste kava koostamisel kehtivatele põhimõtetele ning seletatakse lahti lülitustoimingute teostamine jaotusseadmega. Kolmandas jaotises tutvustatakse jaotusseadme ja jaotlaga ühendatava kaabli valimisel kehtivaid põhimõtteid ning esitatakse valemid vajalike arvutuste teostamiseks. Neljandas peatükis seletatakse lahti jaotusseadme seisukorra hindamiseks teostatavad katsed. Viimases peatükis kirjeldatakse laboratoorse töö läbimisel omandatavaid teadmisi ning analüüsitakse laboratoorse töö sobituvust õppekavasse.

Lõputöö lisades on esitatud koostatud laboratoorse töö juhend ning laboratoorse töö näidisaruanne. Laboratoorse töö juhend sisaldab teostatava töö teoreetilist tausta, kontrollküsimusi, tegevusjuhust jaotusseadme seisukorra testimiseks, piirkonnaskeemi ning alajaama skeemi põhjal lülituskavade koostamist ning arvutusülesannet jaotusseadme ja ühendatava kaabli valimiseks. Näidisaruandes on esitatud lahendused eeltoodud ülesannetele ja küsimustele.

1 KESKPINGE JAOTUSSEADE

Elektrisüsteem koosneb elektrijaamadest, elektriliinidest, alajaamadest ja tarbijatest. Elektrijaamad on ühendatud kõrgepingeliinidest koosneva ülekandevõrguga, mille kaudu edastatakse elektrienergia elektrijaamadest tarbijate lähedusse. Õhu- ja kaabelliinidest koosnev jaotusvõrk tagab toite jõudmise põhivõrgu liitumispunktidest tarbijateni. Põhivõrku ja jaotusvõrku ühendavad alajaamad, kus toimub elektrienergia muundamine ja jaotamine. Alajaam koosneb tavaliselt ülempingejaotlast, trafost ja alampingejaotlast, kusjuures jaotlaks nimetakse jaotusseadet koos juhtimis-, mõõte-, kaitse- ja reguleerimiseseadmetega.

1.1 Keskpinge jaotusseadmest üldiselt

Keskpinge jaotusseade on metallist korpusesse paigutatud lülitusseadmete komplekt, mida kasutatakse elektrisüsteemi ahelate juhtimiseks, kaitsmiseks ja katkestamiseks [1]. Näiteks kaitseb jaotusseadmesse kuuluv võimsuslüliti elektrisüsteemi lühise korral ning lahkülitid võimaldavad teostada lülitamisi nt hooldustööde läbiviimiseks. Jaotla paikneb tavaliselt eraldi ruumis või kindlalt määratletud alal ning sõltuvalt jaotusseadme asukohast eristatakse sise- ja välisjaotlaid [1]. Lisaks liigitatakse jaotusseadmeid kasutatava isolatsioonikeskkonna põhjal. Järgnevalt kirjeldatakse erinevaid jaotlaid lähemalt.

1.1.1 Välis- ja sisejaotlad

Välisjaotla all mõistetakse jaotusseadet, mis on mõeldud paigaldamiseks välistingimustesse, kus seade puutub kokku raskete ilmastikuolude ja saastega. Tavaliselt on välisjaotlad õhkiisolatsiooniga ja kasutusel kõrgemal pingel talitlevates alajaamades [2]. Isolatsioon peab olema kahe juhtiva osa vahel piisav, mis tähendab seda, et kõrgemal pingel on ettenähtud lülitite ja seadete vaheline kaugus nii suur, et seadmeid ei ole otstarbekas paigaldada siseruumi.

Sisejaotlad paigaldatakse sistingimustesse, kus jaotla on kaitstud erinevate ilmastiku- ja keskkonnaolude eest nagu tuul ja saaste. Sisejaotlad võivad olla nii õhk- kui ka gaasisolatsiooniga. Selline jaotusseade on ümbritsetud metallkorpusega ning erinevad lülitusseadmed on paigutatud maandatud metallist vaheseintega kambritesse. [3] Võrreldes välisjaotlaga tagab maandatud korpus suurema ohutuse jaotla juures töötavale inimesele. Lisaks on sisejaotla ruumivajadus madalam võrreldes välisjaotlaga. Kaitse ilmastikuolude eest tähendab ka suuremat töökindlust ja madalamaid hoolduskulusid. Siiski on selline lahendus võrreldes välisjaotlaga oluliselt kallim. [4]

1.1.2 Õhk- ja gaasisolatsiooniga keskpinge jaotlad

Jaotusseadmeid saab klassifitseerida kasutatava isolatsiooni põhjal. Isolatsioonikeskkond asub jaotusseadme korpuses eesmärgiga kaitsta pingestatunud osasid (nt latte) kaarleegi tekkimise eest. Õhkisolatsiooniga jaotusseadme puhul on isolatsiooniks õhk. Sellist tüüpi jaotusseadme eeliseks on odavus ja hooldustööde teostamise lihtsus. Õhkisolatsiooni puuduseks on õhu madal elektriline tugevus, mistõttu peab kasutama suuremaid seadmeid [5]. Õhkisolatsiooniga jaotusseadmeid kasutatakse kõrgema pingega alajaamades.

Gaasisolatsiooniga jaotusseadme puhul on isolatsioonikeskkonnaks gaas. Enim kasutatavaks gaasiks on väävelheksafluoriid (SF_6) ehk elegaas. Sellisel juhul paiknevad elektrilised kontaktid ja teised pingestatunud osad rõhu all oleva SF_6 -ga täidetud suletud mahutis. Selline lahendus ei vaja suletud mahuti tõttu palju hooldust. Lisaks on SF_6 võrreldes õhuga suurema elektrilise tugevusega ning jaotusseade on kompaktsem. [5] SF_6 gaasil on küll head kaarekustutusomadused, kuid tegu on kasvuhoonegaasiga ning seega hakatakse tulevikus eelistama SF_6 vabasid seadmeid kasvuhoonegaaside heitekoguse vähendamiseks ja kliimanetraalsuse saavutamiseks.

1.2 Elektrihaar

Elektrihaare puhul on tegemist elektrilahendusega, mis tekib pingestatunud kontaktide avamisel lülitis. Elektrihaar tekib, sest avanevate kontaktide vaheline keskkond muutub tugevalt ioniseerituks, takistus väheneb ning kaarevahemik muutub voolujuhiks. Sellised tingimused soodustavad voolu liikumist kontaktide vahel, kusjuures voolu liikumine elektroodide vahel toimub ka siis, kui kontaktid on füüsiliselt eraldatud. [6] Voolu tekkimiseks kaarvahemikus peab pinge elektroodidel tõusma süttimispingeni. Vahelduvvooluahelas tekkiva elektrihaare omaduseks on kaare kustumine hetkel, mil vool läbib poolperioodis nullpunkti ning järgneval poolperioodil süttib haar uuesti. Elektrihaare kustumiseks peab kaarvahemiku läbilöögipingest suurenemine ennetama pinge tõusmist elektroodide vahel. Vastasel korral süttib haar uuesti hetkel, mil kontaktidevaheline pinge on suurem läbilöögipingest. [7] Elektrihaar kustutatakse kaarekustutuskaambris, kusjuures lüliteid liigitatakse kasutatava kaarekustutuskeskkonna järgi. Eesti elektrivõrgus on levinud õilülitid, vaakumlülitid ning SF_6 lülitid. Sulavkaitsmes tekkiv elektrihaar kustutatakse kõrge temperatuuri tõttu sulavpanusest eralduva gaasi abil [8]. Teiseks variandiks on sulavpanuse täitmine kvartslüüvaga, mis tagab samuti sulavkaitsmes tekkiva elektrihaare kustumise [8].

1.3 Lülitusseadmed keskpinge jaotusseadmes

Hooldustööde läbiviimiseks, rikete likvideerimiseks ja mitte töötavate seadmete väljavahetamiseks on vajalik elektriabelate katkestamine kommutatsiooniseadmetega. Keskpinge võrkudes on kommutatsiooniseadmeteks võimsuslülid, koormuslülid, lahlülid ja sulavkaitsmed [1]. Järgnevalt kirjeldatakse lähemalt eeltoodud lülite otstarvet ning töö põhimõtet.

Võimsuslüliti (VL) abil toimub elektriabel (nt trafo ja liinide) sisse ja välja lülitamine. Lisaks sellele peab VL rakenduma lühise olukorras ning abel katkestama. VL peab olema võimeline lahutama lühisvoolu, mis eeldab abel välja lülitamisel tekkiva elektriabel kustutamist. Elektrisüsteemi kaitsva lülitina on VL lülitamiseadmetest tähtsaim. Lisaks peab VL rakendumine olema piisavalt kiire ning lüliti peab vastu pidama lühisvoolu termilistele ja elektrodünaamilistele toimetele. [1]

Koormuslüliti (KOL) on lülitusaparaat, mis on suuteline elektriabelat avama ja sulgema nii normaaltalitus- kui ka ülekoormusvoolu korral. Samuti saab KOL-i abil luua kaitselahutusvahemikku. [1] Siiski ei ole KOL-i puhul tegemist kaitseseaparaadiga ehk KOL ei rakendu lühise korral ega ole võimeline lahutama lühisvoolu.

Lahlüliti (LL) on samuti mõeldud kaitselahutusvahemiku tagamiseks, kusjuures LL-i abil tekitatud kaitselahutusvahemik on nähtav ning pakub seega lülitamist läbi viivale operaatorile visuaalse kontrolli võimalust. LL-i kasutatakse elektrisüsteemis teostatavate hooldustööde ohutuks läbi viimiseks. LL-i võib lülitada ainult tühiselt väikese koormuse all. See tähendab, et LL ei rakendu automaatselt lühisele ning lüliti ei pruugi olla võimeline abelat lahutama. Siiski on selline lüliti suuteline teatud aja lühisvoolu taluma. Oma ehituselt sarnaneb LL KOL-iga, kuid LL-il puudub kaarekustutuskamber. [1] Mõningatel juhtudel võib LL-i kontaktid avada pingestatud olukorras, kuid sellist lülitustoimingut on oluline vältida kui samast või toitevast alajaamast on võimalik VL-i abil abelat lahutada [9].

Sulavkaitsmeid kasutatakse keskpingevõrgus abel katkestamiseks, kuid samas on sulavkaitsmel ka elektrivõrku kaitsese funktsionaalsus. Tööpõhimõtte kohaselt katkeb vooluabel liigkoormuse või lühise olukorras. Voolu suurenemisel üle lubatud väärtuse piisava aja jooksul hakkab kuumenema kergsulavast metallist sular. Rakendusvoolu juures sular sulab läbi ning abel katkeb. Sulavkaitsmete kasutamine on küllaltki odav ning seetõttu on sulavkaitsese koos lahk- või koormuslülitiga laialdaselt kasutusel. [1]

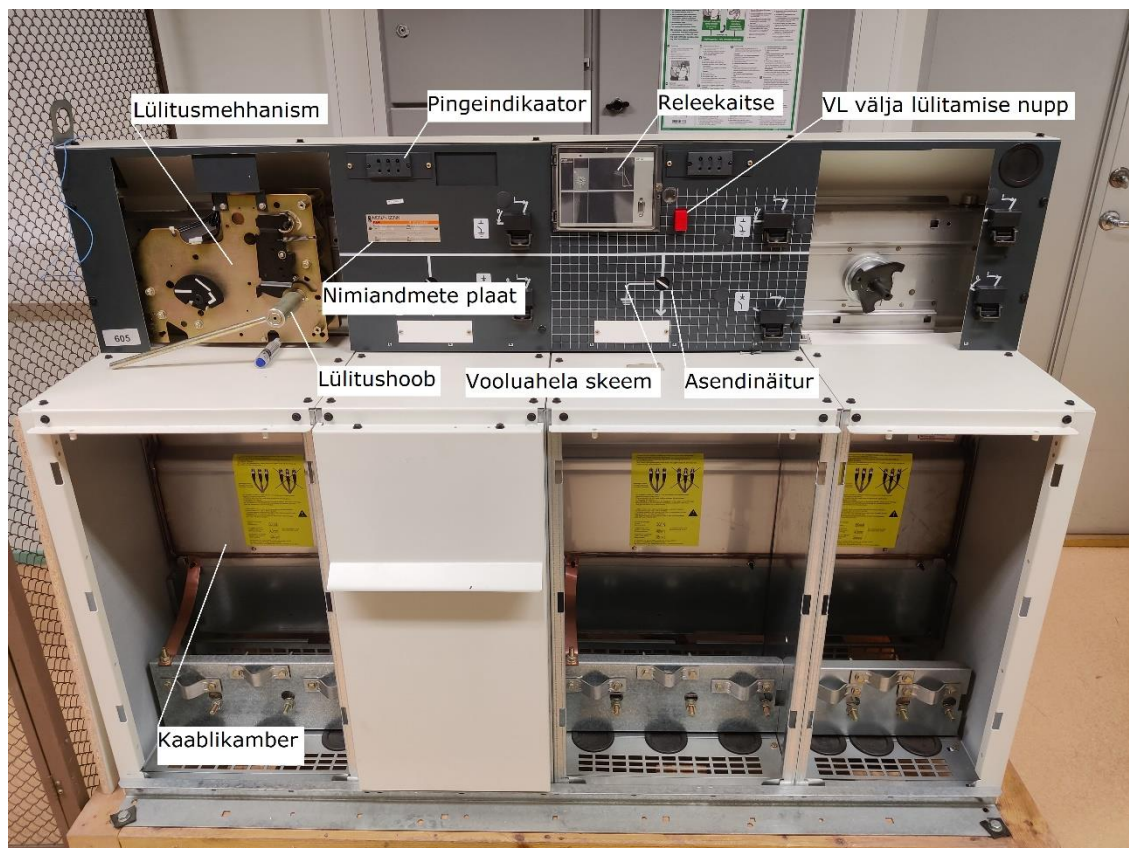
Maanduslüliti ehk ML-i kasutatakse elektriabel kindla osa maandamiseks. ML-i abil saab maandada jääklaengud, mis jäävad abelasse pärast toiteabel avamist [10]. ML-i

lülitamised viiakse alati läbi pärast toiteahela katkestamist. Samuti ei tohi teostada maanduslülitiga maandatud võrguosa pingestamist.

Eelnevalt mainitud lülitid on varustatud mootoriga või käsitsi juhitava ajamiga. Laialdaselt on levinud just käsiajamiga lülitid, kus lülitamiseks vajaminevad toimingud tuleb läbi viia alajaamas. Lülitamiste läbiviimise võimaluseks on ka kaugjuhtimine ehk lülitamisi teostab distantsilt võrgudispetšer. Sellisel juhul asub ajam maapinna lähedal asuvas karbis ning ajam on ühendatud lülitiga juhtvarda abil. Tänapäevastes alajaamades on võimalik kaugjuhtimist teostada võimsus-, lahk- ja maanduslülititega, kuid vanemates alajaamades toimib kaugjuhtimise teel vaid võimsuslülitite lülitamine. [1]

1.4 Keskpinge jaotusseade Merlin Gerin RM6

Antud töö raames käsitletakse lähemalt keskpinge jaotusseadet Merlin Gerin RM6, mis on toodud Tallinna Tehnikaülikooli laborisse praktilise õppe eesmärgil. Antud jaotusseadmega on võimalik ühendada üks või kaks trafot ning teostada lülitamisi nii ringtoitega võrgus kui ka radiaalvõrgus. Tegemist on gaasisolatsiooniga sisejaotlaga, kus jaotusseade ning latid on paigutatud SF₆-ga täidetud kambrisse [11]. Joonisel 1.1 on toodud TalTech-i laboris kasutatav keskpinge jaotusseade.



Joonis 1.1 Keskpinge jaotusseade Merlin Gerin RM6

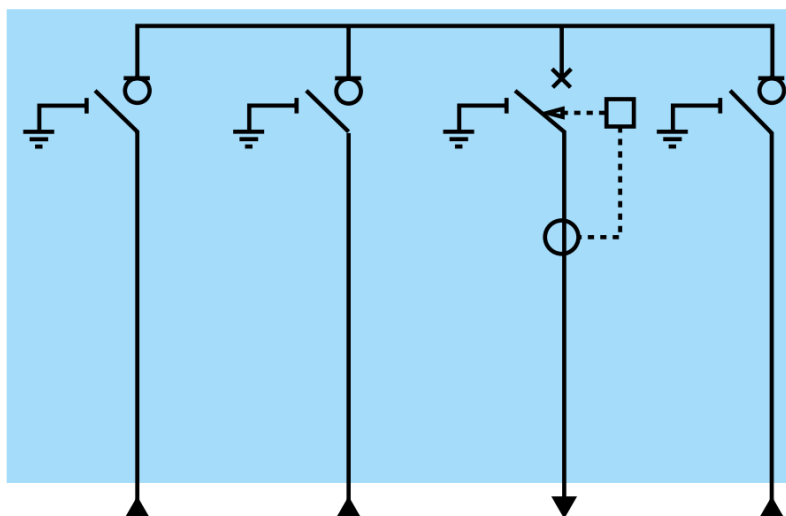
1.4.1 Merlin Gerin RM6 ehitus

Esipaneelil oleva nimiandmete paneelil on toodud jaotusseadme tootja ning mudel. Samuti on märgisel esitatud seadme tehnilised parameetrid. Tabelis 1.1 on toodud vaadeldava seadme parameetrid. Jaotla on mõeldud kasutamiseks 20 kV nimipingel talitlevasse võrku, kusjuures seadme suurim lubatav kestevpinge on 24 kV. See tähendab, et suurim pinge, mida seade kannatab pikema perioodi vältel, on 24 kV.

Tabel 1.1 Jaotusseadme Merlin Gerin RM6 tehnilised parameetrid

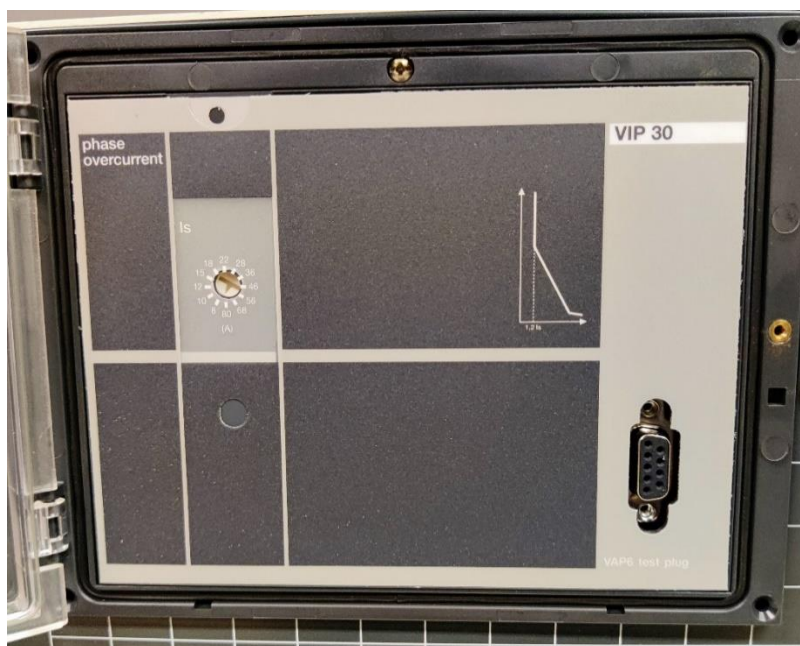
Suurim lubatav kestevpinge	24 kV
Impulsspinge	125 kV
Lühisvoolu taluvus	16 kA 1s
Löökvool	40 kA
Võimsuslüliti koormusvool	200 A
Koormuslüliti koormusvool	400 A
SF ₆ kogus	2 kg
SF ₆ gaasi suhteline rõhk	20 kPa

Käsitletavas jaotusseadmes on neli kommutatsiooniseadet- kolm koormuslüliti ja võimsuslüliti. Joonisel 1.2 on toodud jaotla skeem, kus vasakult esimene, teine ja neljas haru illustreerivad koormuslülitega ahelaid, mis võimaldavad ühendatavate kaablite pingestamist või toiteahelast eraldamist. Kolmas haru iseloomustab releekaitsega varustatud võimsuslüliti, kusjuures lüliti ühendatakse trafoga, et võimaldada trafo kaitsmist. Kõiki ahelaid on võimalik maandada eraldiseisvate maanduslülitite kaudu.



Joonis 1.2 Jaotusseadme Merlin Gerin RM6 elektriskeem [11]

Jaotusseadme Merlin Gerin RM6 puhul toimub trafo kaitsmine 200 A VL-ga. Jaotla esipaneelile on toodud korpusesse integreeritud kaitserelee VIP 30, mis on kaitstud läbipaistva kaanega ning ei vaja toimimiseks lisatoiteallikat. Kaitsereleed kasutatakse rikke tuvastamiseks ning võimsuslüliti käivitamiseks. Kaitserelee jälgib pidevalt voolu suurust ning mõõdetava väärtuse erinevusel normaaltalitlusele vastavast suurusel, tuvastatakse viga. Vea tuvastamisel rakendub kaitaselüliti. Kaitserelee tööks vajalike mõõteandmete kogumiseks peab rele ühendama voolutrafoga, mis mõõtemuundurina vähendab mõõdetud voolu väärtust relekaitse jaoks. Kaitserelee VIP 30 on mõeldud pakkuma kaitset faasidevahelise lühise korral. Kaitsereleed seadistakse pöördlülitiga, mille abil määratakse voolu maksimaalne seadeväärtus amprites normaaltalitlusel. Kaitserelee rakendub seadmete ja ühenduste kaitseks 1,2 kordse voolu maksimaalse seadeväärtuse korral [11]. Seadme kaitseaste on IP54, mis näitab rele sobivust tolmu ning veega kokkupuutuvasse keskkonda [11] [12]. Joonisel 1.3 on toodud esipaneelil asuvat kaitsereleed.



Joonis 1.3 Merlin Gerin RM6 kaitserelee

Oluliseks osaks jaotlast on kogumislattid. Kogumislattide eesmärgiks on toiteallikast tuleva elektrienergia jagamine väljuvate fiidrite vahel. Lattid on valmistatud hästi juhtivast materjalist nagu vask, messing või alumiinium. Võrreldes kaablite kasutamisega on lattide eeliseks ilmastikukindlus ning kompaktsus [13]. Jaotusseadme Merlin Gerin RM6 puhul on lattid paigutatud SF₆- ga täidetud kambrisse.

Keskpingevõrgus kasutatavateks kaabliteks on ühe- või kolmesoonelised kaablid. Kaabli ühendamiseks jaotusseadmega on vajalik kaabelliini lõppu paigaldada otsamuhv. [1] Otsamuhvi eesmärgiks on luua elektriline ühendus kaabli ja jaotusseadme lati vahel

ning seejuures kaitsta kaablit ja ühendust saaste ning niiskuse eest. Oluline on pöörata tähelepanu korrektsele otsamuhvi paigaldamisele, sest muhv on enim kaabliini rikkeid põhjustav võrgu element. [14] Vaadeldava jaotusseadmega sobib kaabli ühendamiseks nurkliides. Nurkliides ühendatakse läbiviigu külge, kusjuures läbiviigu ülesandeks on juhtida elektrienergiat jaotusseadme kambri ja SF₆-ga täidetud siseosa vahel. Nii tagatakse pingestatunud kaabli ja korpuse vaheline isolatsioon. [11]

1.4.2 Merlin Gerin RM6 operaatori ohutust tagavad lahendused

Keskpinge jaotusseadme ehitus tagab ohutu keskkonna seadet lülitavale operaatorile. Seadme disainimisel on arvestatud turvalisuse tagamisega seadme rikked ning välistatakse inimliku eksimise võimalus. Järgnevalt tutvustatakse põhilisi turvalisust tagavaid lahendusi.

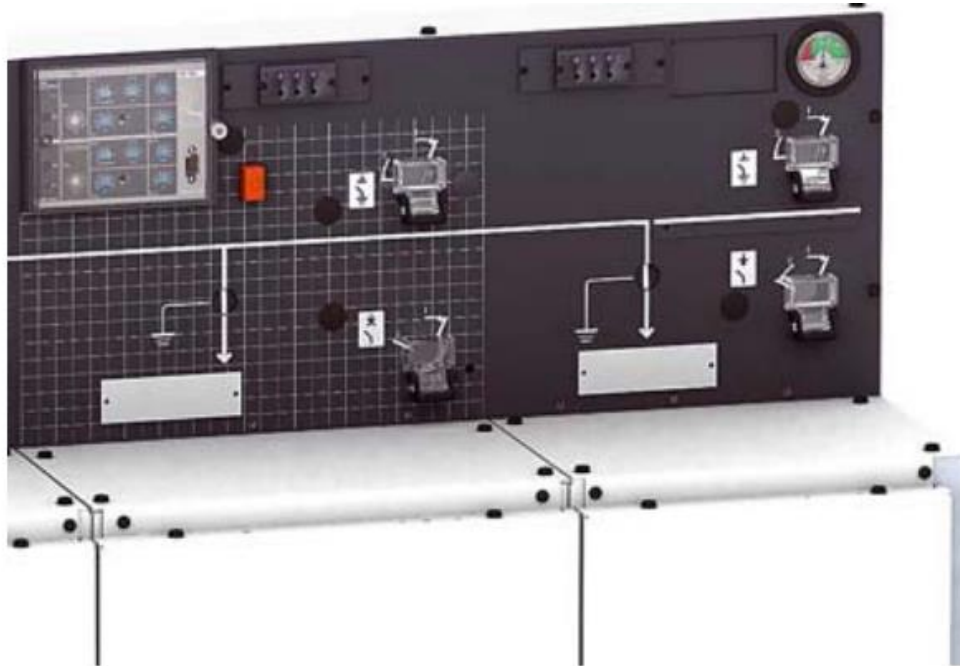
VL-i ja KOL-i vertikaalselt liikuvad kontaktid võimaldavad lülitamist kolme erineva positsiooni vahel- suletud, avatud ja maandatud. Selline lahendus välistab võimaluse VL-i või KOL-i üheaegset lülitamist ML-iga. [11] See on oluline, sest maandatud süsteemi korral tekitab VL-i või KOL-i kontaktide sulgemine jaotusseadmesise lühise. Tagajärjeks on seadme kahjustumine ning suur risk lülitamist läbi viiva operaatori tervisele. Joonisel 1.4 on toodud kolmepositsiooniline lüliti, kusjuures vasakult paremale liikudes on lülitid vastavalt suletud, avatud ja maandatud olekus.



Joonis 1.4 Kolmepositsiooniline lüliti [11]

Esipaneelil on kujutatud jaotusseadme vooluahela skeem, mis on samuti kolmepositsiooniline. Selline lahendus annab operaatorile võimaluse visuaalselt kontrollida lüliti olekut. Lisaks on esipaneelil pinge indikaatorlambid, mis võimaldavad kontrollida kaablite pingestatust. [11] Pinge indikaatorlamp on varustatud kolme valgusdiodiga, kusjuures diodi põlemine viitab pinge olemasolule kaablis. Lisaks võimaldab pinge indikaatorlamp kontrollida ühendatud kaablite faasijärjestust.

Multimeetri ühendamiseks on pinge indikaatorlambil mõõtmiskohad. Joonisel 1.5 on kujutatud jaotusseadme esipaneel.



Joonis 1.5 Merlin Gerin RM6 esipaneel [11]

Ohutuks lülitamiseks on oluline jälgida lülitamiste järjekorda. Seadmete ja inimeste kaitsmiseks on jaotusseadme konstrueerimisel välistatud inimliku eksimise võimalus. Kõik lülitamised viiakse läbi spetsiaalse lülitushoovaga. Lülitusmehhanismi ja hoova disain ei võimalda pärast lülitamist koheselt teostada vastupidises suunas lülitamist. See on oluline, et välistada ML-i kohest avamist peale sulgemist, kui operaator on tahtmatult maandanud pingestatud kaabli. Vastupidises suunas lülitamiseks tuleb hoob esipaneelil asuvast avast välja võtta ning juhthoova uuesti sisestamisel on lülitamine taas võimalik [15]. Selline toiming tekitab kahe lülitamise vahele viite, mis on pikem kui aeg, mis kulub kaitseseadmetel rikke kõrvaldamiseks [15].

Lülitamiseks sisestatakse lülitushoob vastavasse avasse ning mehhaanilise süsteemi abil lülitatakse VL või KOL sisse või välja. Samamoodi viiakse läbi lülitamised ML-iga, kusjuures võllile juurepääsu tagav ava on kaetud kattega. Katet on võimalik avada vaid olukorras, kus VL-i või KOL-i kontaktid on avatud [11]. Jaotusseadmega töötamise veel turvalisemaks muutmiseks saab jaotusseade kambrite uksi avada ainult juhul, kui süsteem on maandatud [16].

Keskpinge jaotusseadme rike on küllaltki ebatõenäoline, kuid ohutuse tagamiseks on seade disainitud vastu pidama ühe sekundi jooksul sisemisele elektriikaarele arvutusliku lühisvoolu juures. Sisemise elektriikaare tõttu tekkivat ülerõhku reguleeritakse

kaitseventiili avamisega [11]. Kaitseventiil asub metallist gaasimahuti all, kusjuures gaas lastakse jaotusseadme tagumisse või alumisse osasse [11]. Joonisel 1.6 on toodud gaasimahuti kaitseventiiliga.



Joonis 1.6 Gaasimahuti kaitseventiiliga [11]

1.4.3 Merlin Gerin RM6 paigaldus

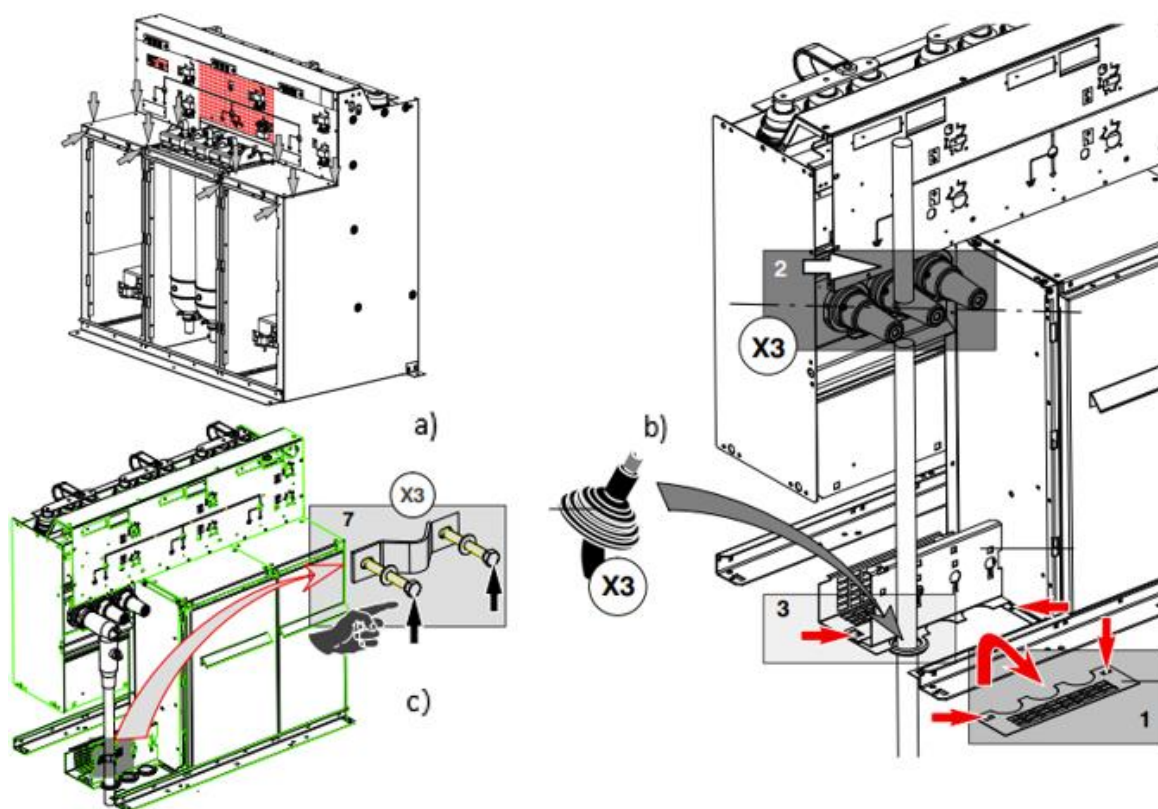
Keskpinge jaotusseadme korrektseks paigaldamiseks tuleb järgida käsitletava seadmega kaasas olevat paigaldusjuhendit. Jaotusseadme paigaldamine algab jaotla tõstmisest alajaama. Jaotusseade tuleb kaubaaluselt maha tõsta ning paigutada lõplikku asukohta. Seadme lihtsamaks liigutamiseks võib jaotusseadet libistada mööda silindrikujulisi rulle. Jaotusseade tuleb kinnitada pöranda külge vähemalt kolmest seadme alumisest nurgast [17].

Jaotusseadmesse kaablite ühendamisele peab eelnema RM6 korpuse ühendamine alajaama maanduskontuuriga. Kaablite ühendamiseks jaotusseadmesse on vajalik seadme lülitamine maandatud olekusse. Kaablite paigaldamist illustreerib joonis 1.7. Kaabel ühendatakse jaotusseadme läbiviikude külge nurkliidese abil. Läbiviikudele ligipääsemiseks tuleb eemaldada kambrite pealmised katted (joonis 1.7a). Ühesooneliste kaablite ühendamisele eelneb jaotusseadme eesmise alumise paneeli eemaldamine (joonis 1.7b punkt 1). Enne otsamuhvi kaablile paigaldamist tuleb kaabel lõigata sobivasse pikkusesse (joonis 1.7b punkt 2). Lisaks on oluline jälgida kaabli pikkuse arvestamisel, et nurkliides ei jääks jaotusseadmega ühendamisel liialt pingule. Järgmiseks sammuks on kaabli ümber tihendi paigaldamine, kusjuures tihend peab kinnituma jaotusseadme tagumise alumise paneeli külge (joonis 1.7b punkt 3). Kaabli otsamuhvi paigaldamine toimub konkreetse tootja juhiste järgi. Enne nurkliidese ühendamist läbiviiguga on oluline puhastada puhta lapiga nii läbiviik kui ka otsamuhvi sisemus. Järgnevaks tööetapiks on spetsiaalse määrdega läbiviigu ning otsamuhvi

sisemise osa katmine ning seejärel võib nurkliidese läbiviigu külge kinnitada. Nurkliides ja läbiviik peavad ühendamisel olema samal joonel, mitte nurga all. Kaabel tuleb fikseerida jaotusseadme alumises osa külge kasutades kaablikinnitust (joonis 1.7c). Kaablikinnituste poldid tuleb kinni keerata kasutades momentvõtit, kusjuures rakendatav jõumoment peab olema 18 Nm. Lisaks on kaablite paigaldamise tööetapiks eesmise alumise paneeli jaotusseadmesse kinnitamine nelja kruviga. Viimase sammuna tuleb tagasi panna kaabli kambri pealmised katted ning paigaldada jaotusseadme kambrite ette ukсед. Nüüd on jaotusseade kasutamiseks valmis. [17]

Kolmesooneliste kaablite ühendamine on sarnane ühesooneliste kaablite ühendamisega. Siiski on oluline mainida, et kolmesoonelise kaabli korral paigaldatakse tihend sellisele kaabli lõigule, kus välismantel katab kõiki sooni. Seetõttu paigaldatakse kaablikinnitused välismantliga kaetud kaabli osale jaotusseadme alumise plaadi alla. Kõrgemal pool alumist plaati saab välismantli eemaldada ning edaspidine töökäik kulgeb sarnaselt ühesoonelise kaabli paigaldamisega. [17]

Jaotla Merlin Gerin RM6 saabub tehastest valmis kujul ehk erinevalt mõnest teisest jaotusseadmest RM6 moodulite ühendamist ei vaja. Lisaks on vaadeldava seadme puhul kogumislattid paigutatud SF₆-ga täidetud ning jäädavalt suletud kambrisse, mistõttu ei pea paigaldamise käigus tegelema lattide ühendamise ega gaasiruumi täitmisega. Seega võib lugeda RM6 paigaldamist võrdlemisi lihtsaks.



Joonis 1.7 Kaabli paigaldamine jaotusseadmesse [17]

2 LÜLITAMISED KESKPINGE JAOTUSSEADMEGA

Lülitamiste ohutuks teostamiseks on oluline kinni pidada reeglitest, mis võimaldavad välistada eluohtlike olukordade tekkimist ning lülitamiste ebaõnnestumist. Käesolevas peatükis antakse juhised lülitamiste läbiviimiseks tuginedes Elektrilevi võrgus kehtivatele nõuetele. Lisaks käsitletakse tööohutusmeetmeid, mis tagavad keskpinge jaotusseadmega töötava operaatori ohutuse.

2.1 Lülitamiste kava koostamine

Lülitamiste planeerimine algab eeltööga. Esmalt tuleb tutvuda võrgu skeemiga, et teha kindlaks millises alajaamas lülitamine tuleb teostada ning milliste lülitite lülitamine on vajalik. Kogutud informatsiooni põhjal koostatakse lülitamiste kava. Lülitamiste kava on juhend, mis koostatakse arvestades konkreetse lülitamise iseloomu. Juhendis on toodud samm-sammult kõik tööetapid eduka lülitamise teostamiseks. Lülitamiste läbiviimisel järgitakse eranditult kõiki lülitamiste kavas toodud punkte. Igas punktis kirjeldatakse ainult ühete kindlat toimingut, kusjuures kõik tööetapid kirjutatakse erinevale reale ja märgitakse järjekorranumbriga. Järgnevalt tuuakse välja lülitamiste kavasse märgitavad toiminguid. Toimingute täpsem sisu seletatakse lahti järgmistes alapeatükkides. [9]

Esimeseks toiminguks on kommutatsiooniaparaadi lülitamine. Lülitusseadme välja lülitamiseks eraldatakse lülitusaparaadi kontaktid. Järgmise sammuna lülitatakse sisse maanduslülitit või paigaldatakse kantav maandus. Juhul, kui teostatavaks toiminguks on lülitit sisse lülitamine, tuleb esmalt lülitada välja ML või eemaldada kantav maandus. Kantava maanduse asukoht peab lülitamiste kaval olema toodud. Keeruliste tööde läbiviimisel tuleb lisada märgi „Tähistada töökoht“, mis viitab töökoha määratlemisele, tähistamisele ning pingestatunud osadele juurdepääsu tõkestamisele. Töökoha tähistamise korral tuleb lülitamiste kava viimasesse punkti lisada märgi „Eemaldada töökoha tähis“. Olenevalt alajaamast võivad teostatavateks toiminguteks olla veel seadmete faseerimine ja pöörvälja määramine, lülitusseadmete ajami lukustamine, trafo sisse lülitamisele eelnev lühistaja väljalülitatud asendi kontroll jms. Lisaks märgitakse lülitamiste kavasse informatsioon töö sooritamise kohta ja töö lõpetamise teate kohta. [9]

2.2 Tähelepanekud lülitamiste õnnestumiseks

Ohutu lülitamise eelduseks on vastavad teadmised ja oskused ning seega ei tohiks lülitamisi teostada inimene, kellel puuduvad lülitamisõigused. Väljaõppe käigus

omandavad operaatorid teadmised, mis on vajalikud eduka lülitamise teostamiseks. Järgnevalt tuuakse välja tähtsaimad tähelepanekud lülitamiste õnnestumiseks.

Lülitamisi juhendab lülitamiste juhtija, kes annab lülitajale edasi lülitamiskorraldusi. Juhtija poolne juhendamine toimub tuginedes elektrivõrgu operatiivskeemidele, mis näitavad võrku paigaldatud seadmete hetkeseisundit. Juhiste jagamisel on oluline kasutada skeemil märgitud seadmete nimetusi ja tähistusi. Lülitamiskorraldus tuleb lülitamiste juhtija poolt edastada lühidalt, selgelt ja ühemõtteliselt, et välistada lülitaja poolt juhiste valesti mõistmise võimalus. Korralduse edastamise järel peab lülitamiste juhtija paluma lülitajal korrata antud juhiseid, et mõista operaatori arusaama lülitamiste läbiviimise tööetappidest. Lülitaja võib teostada lülitamisi vaid juhul, kui talle edastatud korraldused on täielikud mõistetavad ja arusaadavad. Lülitamiskorraldusi edastatakse ühe kaupa, kusjuures vastav korraldus võib sisaldada mitut tööetappi ühe kindla operatsiooni teostamiseks. Lülitamiste juhti tuleb informeerida pärast iga lülitamiskorralduse läbiviimist ning järgmist korraldust võib teostada alles pärast vastavate juhiste saamist. [9]

Lülitamiskorralduse andmine eeldab, et lülitamiste juhtija on välistanud järgnevate olukordade esinemise võimaluse [9]:

1. Oht inimeste tervisele ja seadmete töökindlusele
2. Tarbijate elektrikatkestus varasema informeerimiseta
3. Lubatud väärtustest suuremad/väiksemad pingekõikumised
4. Rikkeliste või maandatud seadmete pingestamine
5. Pingestatunud seadmete maandamine
6. Erinevas faasis või ebasünkroonselt talitlevate võrguosade kokku ühendamise
7. Seadmete ja elektriliinide ülekoormused

Toodud loetelu järgimine on oluline, sest lülitamine ei tohi põhjustada ohtu töötavale inimesele, jaotlale ning teistele võrguseadmetele. Näiteks maandatud seadme pingestamine või pingestatunud seadme maandamine põhjustab jäiga maalühise ja kolmefaasilise lühise, mille tagajärjel tekkiv elektrikaar ohustab inimest ja kahjustab jäädavalt seadet. Samuti tuleb enne ümberlülitamist veenduda, et kõik elektriseadmed ja liinid on võimelised taluma ümbersuunatavat koormust. Ülekoormuse korral võib järsult kasvada temperatuur ning kahjustada isolatsioon, mis põhjustab elektrisüsteemi elementide rikke. Pinge kõikumised põhjustavad seadmete ebanormaalselt talitlemist või talitlemise seiskumist. Ebasünkroonselt talitlevate võrguosade kokku ühendamise põhjustab võrgu ebastabiilset talitlust ning elektrikvaliteedi langemist. Ülekoormuse, pinge liigse kõikumise ja ebasünkroonse talitluse välistamise eest vastutab juhtimiskeskus, kus lülitamiste õnnestumises veendutakse esmalt simuleerimise abil.

Samuti tuleb veenduda kaablite faseeringus, sest erinevate faaside kokku ühendamise tagajärjel hakkavad pöörlevad seadmed vastupidises suunas pöörlema. Lisaks on oluline teada, et varasema informeerimiseta võib toiteühenduse tarbijatele katkestada vaid rikke korral remonttööde teostamiseks. Ka sellisel juhul tuleb lülitamine kooskõlastada juhtimiskeskuse dispetšeriga. Tarbija teavitamine elektrikatkestusest on oluline, et klient saaks arvestada elutähtsate teenuste või seadmete talitlemise seiskumise võimalusega.

2.3 Tööohutusmeetmed

Tähtsaimaks nõudeks lülitamiste teostamisel on operaatori ohutuse tagamine. Jaotusseadme disainimisel on eriliselt pööratud tähelepanu inimese ohutusele ning seega on seadme riknemise ja õnnetuse juhtumise tõenäosus madal. Siiski on oluline välistada tööõnnetuse risk ning seetõttu on lülitamisi läbiviiv operaator kohustatud kasutama isikukaitsevahendeid. Joonisel 2.1 on toodud lülitamiste läbiviimisel kasutatavad isikukaitsevahendid.

Elektritöid teostav operaator vajab kindlat kaitset elektrilöögi, elektripõletuse ning elektrikaare termilise toime eest. Seetõttu peab lülitaja kandma kaitseriietust, mis vastab standardile EVS-EN ISO 11612:2015. Standardiga määratakse kaitserõivastusele kindlad nõuded, millele riietus vastu peab pidama. Tähistus A iseloomustab materjalide tulepüsivust ja mittesüttivust. Tähistus B määrab riideeseme vastupidavuse kokkupuutel tulega. Näiteks tähistuse B1 korral kasvab temperatuur riiete sees 24 °C võrra 4-10 s jooksul. Soojuskiirguse mõju iseloomustab tähis C. Tähis C1 näitab, et temperatuur riideeseme teisel poolel tõuseb 24 °C võrra soojuskiirguse toimel 7-20 s jooksul. Kaitserõivastus peab katma lülitaja ülakeha, kaela ning käsi kuni randmeteni. Samuti peab riietus pakkuma kaitset alakehale ning jalgadele kuni pahkludeni. Jakist ning pükstest koosneva komplekti suuruse valimisel peab lähtuma põhimõttest, et käsi üles tõstes või kummardades on kogu operaatori keha kaetud ning püksid ja jakk püsivad üksteise peal ülekattega. Lisaks peavad olema lülitaja randmed ning pahklud igat tööetappi läbi viies kaetud. [18] Joonisel 2.1a on toodud nõuetele vastav kaitseriietuse.

Käsiajamiga juhitud kommutatsiooniparaatide nagu VL-i, KOL-i või LL-i lülitamisel peab operaator kandma isoleerkindaid. Samuti tuleb isoleerkindaid kanda kantavate maanduste asetamisel. [9] Isoleerkindad on valmistatud elastomeeridest või plastmaterjalidest ning pakuvad elektritöid teostavale isikule kaitset elektriliste ohtude eest. Kinnastele on märgitud tähised, mis võimaldavad kindaks teha, millistel tööoperatsioonidel ning pingeastmetel kinnaste kasutamine on lubatud. Kinda klass

iseloomustab võrgu nimipinget, kus töid läbi viiakse. 20 kV nimipingega võrgus kasutatakse kindaid, mille klass on 2. Kinnastele märgitud tähis IEC 60417-5216 näitab kinnaste sobivust pingevalustel töödel kasutamiseks. Lisaks on kinnastel märgitud tootja, valmistamise kuupäev ning lisaomadusi (happekindel, õlikindel, osoonikindel jne) kirjeldav tähis. Isoleerkindaid võib kasutada vaid juhul, kui kinda sisemisel ja välimisel pinnal ei esine kahjustusi. [19] Isoleerkinnaste kandmisel on oluline jälgida, et kindad oleksid varrukate peal ülekattega, et vältida soojuse või leegi pääsemist kaitseriiete vahele [18]. Joonisel 2.1b on toodud isoleerkindad.

Lisaks kaitseriietusele ja isoleerkinnastele peab operaator lülitamise hetkel kandma kiivrit. Kiivri konstruktsioon peab koosnema vähemalt kaitsvast kestast ja turvarihmadest. Kiivri vastupidavust elektrilistele protsessidele iseloomustavad kolm tähist, mis on märgitud kiivrile. Märge 440 V a.c. viitab kiivrile, mis kaitseb elektritöid sooritavat isikut lühiajaliselt kuni 440 V vahelduvvoolu korral. Tähis LD iseloomustab kiivrit, mille katsetamisel on tehtud kindlaks, et kiivri külgedeformatsioon ei ületa 40 mm. Kiivrile, mis on vastupidav sulametalli piiskadele, märgitakse tähis MM. Õnnetuse hetkel löögi saanud kiiver tuleb koheselt välja vahetada ning seda ka juhul, kui silmnähtavaid kahjustusi kiivril ei tuvastata. [20] Joonisel 2.1c on näha kaitsekiivrit, mis vastab eelpool toodud nõuetele.



Joonis 2.1 Isikukaitsevahendid ohutuks lülitamiseks [21] [22] [23]

2.4 Lülitamiste läbiviimine

Eristatakse kahte erinevat tüüpi lülitustoiminguid. Esimeseks variandiks on lüliti sisse- või väljalülitamine talitlusseisundi muutmiseks, seadmete käivitamiseks või

seiskamiseks. Teiseks võimaluseks on lülitamise teostamine hooldus- või remonttööde läbiviimiseks. [24]

2.4.1 Lülitamised kommutatsiooniparaatidega

Lülitamiste edukaks teostamiseks tuleb kinni pidada lülitamiste järjekorrast. Kõige olulisem on jälgida VL-i, KOL-i ja LL-i lülitamist maanduslülitite asendi suhtes. See tähendab, et kui lülitustoiminguks on lüliti välja lülitamine, võib maanduslülitite sisse lülitada alles peale koormusvoolu katkestava lüliti kontaktide lahutamist. Seevastu lüliti sisse lülitamisele eelneb ML-i välja lülitamine. Selline lülitustoimingute järjekord on oluline, sest pingestatunud ahela korral ML-i sisselülitamine tekitab jäiga maalühise ning kolmefaasilise lühise.

Lülitamistoimingute teostamiseks kasutatakse lülitushooba, kusjuures jaotusseadme Merlin Gerin RM6 puhul kasutatakse nii ahela lahutamiseks kui ML-i lülitamiseks sama hooba. Lülitamiste teostamiseks tuleb lülitushoob sisestada jaotusseadme esipaneelil asuvasse kattega kaetud avasse ning füüsilist jõudu rakendades toimub lüliti asendi muutmine. Operaatori poolt teostatav lülitamisliigutus lüliti asendi muutmiseks peab olema kiire.

VL-i lülitamine toimub eelnevalt kirjeldatud juhiste järgi. Peale lülituse läbiviimist tuleb veenduda jaotusseadme esipaneelil asuva mehaanilise asendinäituri abil lülitamise õnnestumises. Soovituste kohaselt võiks lülitaja lülitustoimingutel VL-i sisse lülitamisel jälgida ühenduse ampermeetrit. Ampermeetri näidu abil saab tuvastada lühise olemasolu, millele viitab järsk voolutugevuse kasvamine ning pinge langemine. Sisselülitamisoperatsiooni läbiviimisel peab operaator lühise tuvastamise korral lülitama VL-i välja lülitatud olekusse. Selline lülitus teostatakse koheselt ootamata releekaitse rakendumist. KOL-i lülitamine toimub analoogselt VL-i lülitamisega. [9]

Nähtava kaitselahutusvahemiku tekitamiseks kasutatakse LL-i. LL-i kontaktide avamisele peab alati eelnema VL-i või KOL-i väljalülitatud oleku kontroll asendinäituri või pingeindikaatori abil. Samuti peavad VL-i kontaktid olema avatud enne LL-i sisselülitamist. LL-i sisse lülitamine toimub kiire lülitusliigutusega, kusjuures alustatud lülitustoiminut ei tohi katkestada. Seevastu väljalülitamiseoperatsioon viiakse läbi aeglase lülitusliigutusega. Lüliti elektroodide vahelise kaarleegi tekkimisel katkestatakse lülitustoiming ning lüliti viiakse tagasi sisselülitatud asendisse. Erandina saab välja tuua lülitusprotsessid, mis viiakse läbi normaaltalitusvoolu, jõutrafoode magneetimisvoolu, kogumislattide ning õhu- ja kaabellinide lahutusvoolu lahutamiseks LL-i abiga. Sellise lülitamise õnnestumiseks tuleb lülitamine läbi viia kiire liigutusega, et tekkinud elektrikaar võimalikult kiiresti kustutada. Siiski tuleks vältida LL-i kontaktide avamist

pingestatud olukorras, kui samast või toitevst alajaamast on võimalik VL-i abil ahelat lahutada. [9]

Pärast õnnestunud lülitustoimingu sooritamist on kohustuslik lukustada VL-i, KOL-i, LL-i ja ML-i ajam mehaanilise lukuga [25]. Selline ohutusmeede takistab eksliku lülitamise, et kaitsta võrgus töötavaid inimesi ning elektrivõrgu seadmeid. Lisaks mehaanilisele lukule on ohutuse tagamiseks kohustuslik paigaldada lülitusseadme ajamile hoiatussilt tekstiga „Mitte lülitada. Inimesed töötavad“ [9]. Hoiatussilt annab märku, et lülitamine seab ohtu näiteks õhu- või kaabelliinil hooldus- või remonttööd läbiviiva operaatori. Joonisel 2.2 on toodud hoiatussilt „Mitte lülitada. Inimesed töötavad“.



**MITTE LÜLITADA
INIMESED TÖÖTAVAD**

Joonis 2.2 Hoiatussilt "Mitte lülitada. Inimesed töötavad" [26]

2.4.2 Lülitamistoimingud trafo sisse- ja väljalülitamiseks

Jaotusseadme abil saab läbi viia lülitustoiminguid trafo sisse- ja väljalülitamiseks. Alajaamas, kus on üks kahemähiseline jõutrafo alustatakse trafo väljalülitamist madalpingepoolelt. Esimeseks lülitustoiminguks on madalpinge pealüliti abil trafo tühijooksu režiimile lülitamine. Järgnevas sammus on koormamata trafo väljalülitamine ülempinge poolelt, misjärel on trafo väljalülitatud. Trafo pingestamist alustatakse kõrgepingepoolelt ning seejärel liigutakse lülitamistega edasi alampinge poolele. [9]

Alajaamas, kus pingemuunduriks on kaks kahemähiselist trafot toimub seadmete lülitamine mõnevõrra teisiti. Järgnevalt seletatud lülitustoimingute järjekord iseloomustab trafo T1 väljalülitamist eeldusel, et trafo T2 on suuteline katma alajaama koormust. Järgnevalt esitatakse trafo T1 väljalülitamiseks läbiviidavad lülitamised [9]:

1. Trafo T1 poolt pingestatud väljuvate kaablite 0,4 kV vinnakülilite/kaitseülilite välja lülitamine

2. Trafo T1 0,4 kV pealüliti välja lülitamine
3. 0,4 kV sektsioonide vahelise lüliti sisse lülitamine
4. Trafo T1 poolt pingestatud väljuvate kaablite 0,4 kV vinnaklülitite/kaitselülitite sisse lülitamine
5. Trafo T2 koormuse ja 0,4 kV kogumislattide pinge kontrollimine
6. Trafo T1 lahküliti välja lülitamine

Punktis 1 teostatud lülitustoimingu tõttu jäävad tarbijad kuni punktis 4 toimuva lülitamiseni toiteta. Elektrikatkestuseta lülitamist oleks võimalik teostada, kui lüliustoiminguid alustatakse sektsioonide vahelise lüliti lülitamisest. Seejärel toimub trafo T1 madalpinge poolel asuva pealüliti abil trafo lülitamine tühijooksu režiimi. Viimaseks lülitamiseks on trafo T1 lahküliti välja lülitamine trafo keskpinge poolelt eraldamiseks.

Trafo sisse lülitamiseks teostatavad lülitustoimingud viiakse läbi vastupidises järjekorras väljalülitamisele [9]:

1. Trafo T1 lahküliti sisse lülitamine
2. Trafo T1 poolt pingestatud väljuvate kaablite 0,4 kV vinnaklülitite/kaitselülitite välja lülitamine
3. 0,4 kV sektsioonide vahelise lüliti välja lülitamine
4. Trafo T1 0,4 kV pealüliti sisse lülitamine
5. Trafo T1 poolt pingestatud väljuvate kaablite 0,4 kV vinnaklülitite/kaitselülitite sisse lülitamine
6. Trafode T1 ja T2 koormuste ja 0,4 kV kogumislattide pinge kontrollimine

2.4.3 Maandamine lülitamistoimingutel

Hooldus- ja remonttööde teostamiseks on oluline pärast lülitite väljalülitamist pingevaba võrguosa ohutuse tagamiseks maandada. Maandamiseks saab kasutada ML-e ja kantavaid maanduseid. Kantava maanduse puhul on tegemist kaasaskantava maanduskomplektiga, kusjuures üks maanduskomplekti osa on ühendatud maandatava elektrivõrgu osa külge ning teine osa paigaldatakse jääklaengute suunamiseks maapinda. Maandatavateks osadeks võivad olla näiteks maakaablid ja õhuliinid.

Juhul, kui maandamiseks on vaja kasutada mõlemat maandamisvarianti, tuleb esmalt lülitada sisse ML ning alles siis paigaldatakse kantavad maandused. Seega enne lüliti sisse lülitamist tuleb eemaldada esmalt kantavad maandused ning seejärel lülitatakse välja maanduslüliti. Lisaks on oluline paigaldada kantav maandus töökoha lähedale, et töid teostav operaator saaks alati kontrollida maanduse olemasolu. [9]

3 SEADMETE VALIMISEL KEHTIVAD PÕHIMÕTTED

Elektrivõrku paigaldatavate seadmete valimisel lähtutakse erinevatest parameetritest. Järgnevalt kirjeldatakse lähemalt jaotusseadme ning jaotlaga ühendatavate kaablite valimisel kehtivaid põhimõtteid.

3.1 Jaotusseadme valimine

Jaotusseadmeid on erinevat liiki ning seega tuleb enne konkreetse jaotla mudeli valimist otsustada, millistele tingimustele seade peab vastama. Sise- või välisjaotla valik määrab, kas jaotla on ilmastikutingimuste ja saaste eest kaitstud või mitte. Isolatsiooni valik määrab seadme hinnaklassi, kompaktsuse ja hooldusvajaduse. Elektrilistest parameetritest lähtutakse jaotusseadme valimisel neljast suurusest- pingest, vool, sagedus ja lühisvool. Eesti elektrivõrgus on sagedus 50 Hz.

3.1.1 Jaotusseadme valimine lähtudes pingest

Elektrivõrgu nimipinge iseloomustab pingest suurust, millel on süsteemi seadmed ette nähtud talitlema. Vaadeldava võrgu nimipinge on 20 kV, kusjuures võrgu nimipinge lubatud kõikumine on $\pm 10\%$. Seadmeid valitakse suurima lubatava kestevpinge järgi, mis näitab pingest suurust, mida seade on võimeline taluma pika perioodi jooksul. Suurima lubatava kestevpinge väärtus on suurem võrgu maksimaalsest lubatud talitluspingest. 20 kV võrgu korral võib pingest olla maksimaalselt 22 kV ning seadmete suurimaks lubatavaks kestevpingeks on 24 kV [27].

Pingest, mis ületab väärtust, mida isolatsioon on ette nähtud taluma, nimetatakse liigpingeks. Sisemisteks liigpingeteks on lülitusliigpinged ja resonants liigpinged. Vastupidavust sisemistele liigpingetele mõõdetakse laboris, kusjuures jaotla, millele on märgitud sisemiste liigpingete taluvuseks 50 Hz 1 min: 50 kV rms viitab seadmele, mis peab 50 Hz sageduse korral ühe minuti jooksul vastu 50 kV pingest efektiivväärtusele.

Lisaks seesmistele liigpingetele peab jaotusseade vastu pidama atmosfäärilistele ja välistele liigpingetele. Atmosfäärilised liigpinged on kõrge amplituudiga välguliigpinged, mis tekivad, kui välgulöök tabab elektriliini. Välised liigpinged tekivad elektriliini juhul, kui välg lööb elektriliini lähedusse ning liigpinged indutseeritakse liini. Liigpingelaineid simuleeritakse laboris ning seeläbi tehakse kindlaks seadme vastupidavus impulsspingetele. Jaotusseade, mille impulsspingele vastupidavuseks on märgitud 1,2/50 μ s: 125 kV viitab jaotlale, mis peab vastu liigpingeimpulsile, mille frondikestus on 1,2 μ s, poolväärtusaeg on 50 μ s ning pingestimpulsi amplituudväärtus on 125 kV.

3.1.2 Jaotusseadme valimine lähtudes voolust

Igal jaotusseadmel on määratud nimivool, mis viitab jaotla vastupidavusele pingestatud olekus. Selleks, et veenduda jaotusseadme sobilikkuses vaadeldavasse võrku tuleb kindaks teha voolu suurus, mis ahelas kulgeb. Tegelikku voolutugevust saab määrata, kui on teada võrguga ühendatud seadmete koormus. Koormusvoolu suurust saab arvutada valemiga 3.1.

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U}, \quad (3.1)$$

kus I — vool,
 S — koormuse näivvõimsus,
 U — võrgu nimipinge.

Juhul kui koormusvoolu arvutatakse trafo primaarpoolel on oluline koormusvoolu arvutamisel (valemiga 3.1) koormuse näivvõimsusele juurde liita trafo võimsuskaod. Kuigi trafo aseseem koosneb aktiiv- ja reaktiivtakistusest ning aktiiv- ja reaktiivjuhtivusest, võib jaotusvõrgus juhtivusi sisaldava haru asendada tühijooksuvõimsustega. Trafo võimsuskadusid saab arvutada valemitega 3.2-3.5 [28].

$$R = \frac{\Delta P_l U_N^2}{S_N^2}, \quad (3.2)$$

kus R — trafo aktiivtakistus,
 ΔP_l — trafo lühiskadu,
 U_N — trafo nimipinge,
 S_N — trafo nimivõimsus.

$$X = \frac{u_{l\%} U_N^2}{100 S_N}, \quad (3.3)$$

kus X — trafo reaktiivtakistus,
 $u_{l\%}$ — lühispinge protsentides nimipingest.

$$\Delta P_T = \Delta P_{Cu} + \Delta P_t = \frac{S_N}{U_N^2} R + \Delta P_t, \quad (3.4)$$

kus ΔP_T — trafo summaarne aktiivvõimsuskadu,
 ΔP_{Cu} — trafo vaseskadu,
 ΔP_t — trafo tühijooksu aktiivvõimsuskadu.

$$\Delta Q_T = \Delta Q_X + \Delta Q_t = \frac{S_N}{U_N^2} X + \frac{I_{t\%} S_N}{100}, \quad (3.5)$$

kus ΔQ_T — trafo summaarne reaktiivvõimsuskadu,
 ΔQ_X — trafo puistekadu,
 ΔQ_t — trafo tühijooksu reaktiivvõimsuskadu,
 $I_{t\%}$ — trafo tühijooksu vool protsentides nimivoolust.

Lisaks normaaltalitluse korral ahelas kulgevale voolule tuleb seadme valimisel arvestada ka lühisvooluga. Minimaalse väärtusega lühisvoolu efektiivväärtuse arvutamine on oluline veendumaks, et süsteemi paigaldatud kaitsereleed ja võimsuslülitid rakenduvad igat liiki lühise korral.

Veendumaks, et valitud seade peab vastu lühisvoolu toimele, arvutatakse maksimaalse lühisvoolu suurus lähtudes lühise tekkimisest punktis, kus lühisvoolu väärtus on suurim. Lühisvoolu väärtus on seda suurem, mida lähemal lühisekoht toiteallikale asub. Seade peab vastu pidama maksimaalse lühisvoolu efektiivväärtusele üks või kolm sekundit olenevalt releekaitse rakendumiseks ja lülitustoimingu teostamiseks kuluvast ajast. Lühisvoolu arvutamiseks kasutatakse valemit 3.6 [28].

$$I_k = \frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot Z}, \quad (3.6)$$

kus I_k — lühisvool,
 c — pingetegur (maksimaalse lühisvoolu arvutamisel väärtusega 1,1),
 Z — süsteemi näivtakistus enne lühisekohta.

Lühisvoolu hindamiseks kasutatava summaarse takistuse arvutamiseks peab arvestama kõikide süsteemi elementidega toiteallikast lühisekohani. Järgnevalt tuuakse välja valemid, mis võimaldada arvutada lühisvoolu suurust mõjutavate elementide aktiiv-, reaktiiv- ja näivtakistused.

Süsteemiharu all mõistetakse vaadeldavat süsteemi toitvat võrku. Jaotusvõrgus esineva lühise korral võib süsteemiharuna käsitleda süsteemi osa lühist sisaldavast fiidrist toitva alajaama lattideni. Süsteemiharu näivtakistust arvutatakse valemiga 3.7. Lihtsustusena arvutatakse süsteemiharu reaktiiv- ja aktiivtakistus vastavalt valemitega 3.8 ja 3.9 [29].

$$Z_Q = c \frac{U_{nQ}^2}{S_{kQ}}, \quad (3.7)$$

kus Z_Q — süsteemiharu näivtakistus,
 U_{nQ} — süsteemiharu nimipinge,
 S_{kQ} — süsteemiharu lühisvõimsus.

$$X_Q = 0,995Z_Q, \quad (3.8)$$

kus X_Q — süsteemiharu reaktiivtakistus.

$$R_Q = 0,1X_Q, \quad (3.9)$$

kus R_Q — süsteemiharu aktiivtakistus.

Kahemähiselise trafo aktiiv- ja reaktiivtakistuste arvutamine teostatakse valemitega 3.10-3.13. Antud valemid võimaldavad takistust taandada lühisekoha pingestmele. [29]

$$u_{kR\%} = \frac{\Delta P_l}{S_{nT}} 100\%, \quad (3.10)$$

kus $u_{kR\%}$ — trafo lühisepinge aktiivkomponent protsentides,
 S_{nT} — trafo nimivõimsus.

$$u_{kX\%} \sim u_{k\%}, \quad (3.11)$$

kus $u_{kX\%}$ — trafo lühisepinge reaktiivkomponent protsentides,
 $u_{k\%}$ — trafo lühisepinge protsentides.

$$R_T = \frac{u_{kR\%} U_{nT}^2}{100 S_{nT}}, \quad (3.12)$$

kus R_T — trafo aktiivtakistus,
 U_{nT} — trafo lühise poolse mähise nimipinge,
 S_{nT} — trafo nimivõimsus.

$$X_T = \frac{u_{kX\%} U_{nT}^2}{100 S_{nT}}, \quad (3.13)$$

kus X_T — trafo reaktiivtakistus.

Trafo takistusi tuleb korrigeerida parandustegurite abil. Parandustegurit arvutatakse valemiga 3.14, kusjuures korrigeeritud takistused saadakse valemiga 3.15. [29]

$$K_T = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,006 u_{kX\%}}, \quad (3.14)$$

kus K_T — trafo parandustegur,
 c_{max} — pingetegur (maksimaalse lühisvoolu arvutamisel väärtus 1,1).

$$R_{TK} = K_T R_T; \quad X_{TK} = K_T X_T; \quad (3.15)$$

kus Z_{TK} — trafo korrigeeritud takistus.

Õhu- ja kaabelliini aktiiv- ja induktiivtakistuste leidmiseks on vaja teada vastavalt aktiiv- või induktiivtakistust kilomeetri kohta. Need andmed on leitavad kaablitootja kataloogist. Aktiiv- ja induktiivtakistust arvutatakse valemite 3.16 ja 3.17. [29]

$$R_L = r \cdot l, \quad (3.16)$$

kus R_L — liini aktiivtakistus,
 r — kaabli aktiivtakistus kilomeetri kohta,
 l — liini pikkus.

$$X_L = x \cdot l, \quad (3.17)$$

kus X_L — liini induktiivtakistus,
 x — kaabli reaktiivtakistus kilomeetri kohta.

Enne süsteemi summaarse takistuse leidmist on oluline kõik arvutatud takistused taandada lühisekoha pingele. Selleks kasutatakse valemit 3.18. [29]

$$Z' = Z \frac{U_{n2}^2}{U_{n1}^2}; \quad R' = R \frac{U_{n2}^2}{U_{n1}^2}; \quad X' = X \frac{U_{n2}^2}{U_{n1}^2}, \quad (3.18)$$

kus Z' — lühisekoha nimipingele taandatud näivtakistus,
 R' — lühisekoha nimipingele taandatud aktiivtakistus,
 X' — lühisekoha nimipingele taandatud reaktiivtakistus,
 U_{n1} — lühisekoha pingestate,
 U_{n2} — lühisekoha pingestmest erinev pingestate.

Lisaks minimaalsele ja maksimaalsele lühisvoolule on oluline kindlaks määrata löökvoolu suurus. Löökvool iseloomustab lühisvoolu suurimat hetkväärtust, mis vastab näiteks lühisele lülitamise hetkele. Löökvoolu arvutamiseks kasutatakse valemit 3.19. Valemis toodud löögiteguri väärtus on vahemikus $1 \leq \kappa \leq 2$, kusjuures aktiivahelas $\kappa=1$ ning induktiivahelas $\kappa=2$. Löögiteguri arvutamiseks kasutatakse valemit 3.20. [29]

$$i_m = \kappa \sqrt{2} I_\kappa, \quad (3.19)$$

kus i_m — löökvool,
 κ — löögitegur.

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3\frac{r}{x}}, \quad (3.20)$$

kus r — ahela aktiivtakistus,
 x — ahela reaktiivtakistus.

3.1.3 Lülitusseadmete valimine

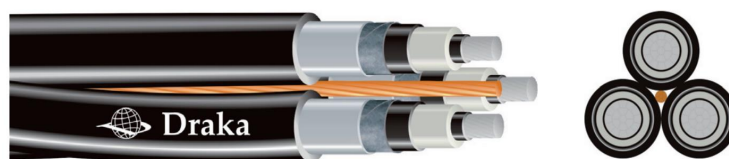
Kõik jaotusseadmesse valitavad lülitid peavad olema mõeldud kasutamiseks vaadeldava võrgu nimipingel. Samuti peab lülitite suurim lubatav kestevpinge vastama kindla pingeastmega võrgus nõutud suurusele, et vältida lüliti kohest riket pinge kasvamisel kõrgemaks maksimaalset lubatud suurusest. VL, KOL ja LL on normaalalatluse korral pingestatud ning seega peavad lülitusaparaadid olema võimelised taluma koormusvoolu. KOL-i ja VL-i puhul peab lisaks arvestama, et lüliti oleks võimeline kustutama kontaktide avamisel tekkivat elektrikaart.

Erinevalt teistest lülitusaparaatidest peab VL kaitseaparaadina olema võimeline lahutama lisaks koormusvoolule ka lühisvoolu. Seejuures peab võimsuslüliti vastu pidama löökvoolule, mis tekib lühisele lülitamise korral.

3.2 Ühendatavate kaablite valimine

Keskpingevõrku paigaldatakse õhu- ja kaabelliine. Jaotusseadme Merlin Gerin RM6 puhul ühendatakse maa alla paigaldatud kaabelliini ots jaotlaga. Seega käsitletakse antud alapeatükis ainult kaabelliine.

Maakaablite eeliseks on kõrge töökindlus, kaitstus välismõjude eest, ohutus ning vähene ruumivajadus. Kaabelliine rajatakse enim tiheda asustusega piirkondades. Keskpingevõrgus on kasutusel ühe- ja kolmesoonelised kaablid. Eestis on paigaldatakse sagedasti just kolmesoonelist keskjuhtmega kaablit AHXAMK-W, mida nimetatakse ka *Wiski*-kaabliks. Joonis 3.1 illustreerib 20 kV jõukaablit AHXAMK-W ning antud kaabli konstruktsiooni. Keskpingevõrgus paigaldatavate kaablite ristlõige jääb vahemikku 3x25-3x240 mm². Siiski eelistatakse paigaldamisel kaableid, mille ristlõige on 3x50, 3x120 või 3x240 mm². [1]



Joonis 3.1 Kaabel AHXAMK-W [30]

Kaabli valimisel on oluline veenduda, et kaabel on mõeldud paigaldamiseks vaadeldava võrgu nimipingel. Lisaks tuleb arvutada pingelang kaablis, et tagada nõuetele vastav sõlmepinge alajaamas. Kaabli ristlõike valimisel lähtutakse lubatud koormusvoolu suurusest, mis on arvatav valemiga 3.1, kusjuures koormusvoolu arvutamisel on oluline arvestada võimsuskadudega liinis. Keskpingevõrgus võib jätta arvestamata liini koroonakaod ja mahtuvuskaod ning seega leitakse võimsuskaod liinis valemitega 3.21-3.22. Arvutuste teostamiseks vajalikud andmed on leitava kaablitootja tootekataloogist, kusjuures tabelis 3.1 on toodud kaabli AHXAMK-W ristlõiked ning tehnilised ja elektrilised andmed. [28]

$$\Delta P_L = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R_L, \quad (3.21)$$

kus ΔP_L — liini summaarne aktiivkadu,
 P —aktiivvõimsus liinis,
 Q — reaktiivvõimsus liinis,
 R_L — liini aktiivtakistus.

$$\Delta Q_L = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} X_L, \quad (3.22)$$

kus ΔQ_L —liini summaarne reaktiivkadu,
 X_L — liini induktiivtakistus.

Tabel 3.1 AHXAMK-W tehnilised ja elektrilised andmed [30]

Tehnilised andmed					
Juhtmete arv x ristlõike pindala	mm ²	3x50Al+35Cu	3x70Al+35Cu	3x95Al+35Cu	3x120Al+35Cu
Juhtme läbimõõt	mm	20,5	22,8	24,5	25,8
Kaetud juhtme läbimõõt (ligikaudu)	mm	28	29	32	33
Kogu kaabli läbimõõt (ligikaudu)	mm	60	65	70	72
Mass (ligikaudu)	kg/100 m	240	265	305	330
Standardpikkus	m	500	500	500	500
Standardtrummel		K24	K24	K24	K26
Elektrilised näitajad					
Faasijuhtme suurim alalisvoolutakistus	Ω/km	0,641	0,443	0,320	0,253
Keskjuhtme suurim alalisvoolutakistus	Ω/km	0,524	0,524	0,524	0,524
Induktiivsus	mH/km	0,39	0,42	0,40	0,39
Reaktiivtakistus	Ω/km	0,12	0,13	0,13	0,12
Mahtuvus	μF/km	0,16	0,18	0,21	0,22
Tühijooksuvool	A/km	0,7	0,7	0,8	0,8

Tehnilised andmed					
Juhtmete arv x ristlõike pindala	mm ²	3x150Al+35Cu	3x185Al+35Cu	3x240Al+35Cu	3x240Al+70Cu
Juhtme läbimõõt	mm	26,6	29,0	30,5	31,3
Kaetud juhtme läbimõõt (ligikaudu)	mm	34	36	39	39
Kogu kaabli läbimõõt (ligikaudu)	mm	75	80	86	88
Mass (ligikaudu)	kg/100 m	375	420	500	530
Standardpikkus	m	500	500	500	500
Standardtrummel		K26	K26	K28	K28
Elektrilised näitajad					
Faasijuhtme suurim alalisvoolutakistus	Ω/km	0,206	0,164	0,125	0,125
Keskjuhtme suurim alalisvoolutakistus	Ω/km	0,524	0,524	0,524	0,268
Induktiivsus	mH/km	0,37	0,36	0,35	0,35
Reaktiivtakistus	Ω/km	0,12	0,11	0,11	0,11
Mahtuvus	μF/km	0,24	0,26	0,29	0,29
Tühijooksuvool	A/km	0,9	1,0	1,1	1,1

4 JAOTUSSEADME SEISUKORRA HINDAMINE

Keskpinge jaotusseade Merlin Gerin RM6 saabub alajaama komplekteeritud kujul ning enne seadme esmast pingestamist koha peal teste ja seisukorra hindamist ei teostata. See-eest tehakse seadmetele tehases tüüp- ja tavakatsed. Tavakatsed teostatakse kõikidele tehasesst väljuvatele seadmetele, et veenduda seadme nõuetele vastavuses. Tüübikatsed teostatakse uutele seadmetele enne kaubanduslikku tootmist. Standardid EVS-EN 62271-1 ja EVS-EN IEC 62271-200 käsitlevad kõrgepinge jaotusseadmeid ning lülitus- ja juhtimisaparatuuri, kusjuures standardites määratletakse teostatavad tava- ja tüüpkatsed. Tehases teostatavad tavakatsed on järgmised [25] [31]:

- Peaahela isolatsioonikatsed seisnevad jaotusseadme pingestamises nimipingest kõrgemal pingel. Katsepingeks on lühiajaline võrgusagedusega normtaluvuspinge ning katse tulemusena veendutakse peaahela isolatsiooni vastupidavuses;
- Abi- ja juhtimisahelate katsel teostatakse ahelate materjalide omaduste, kooste kvaliteedi, blokeeringute, lukkude jms visuaalne kontroll, isolatsioonikatsed, funktsionaalsuskatsed ning elektrilöögivastase kaitse kontroll.
- Peaahela takistuse mõõtmine;
- Hermeetilisuse katse teostatakse kontrollimaks, et absoluutne lekkekiirus ei ületa määratletud väärtust. Lekke avastamiseks võib kasutada lõhnatajurit. Lekke avastamisel loetakse katse ebaõnnestunuks;
- Visuaalne kontroll;
- Mehaanilised katsed teostatakse, et veenduda lülitusseadmete, mehaaniliste blokeeringute jms töökorras;
- Osalahenduste mõõtmine.

Tüübikatse raames läbi viidavaid teste on oluliselt rohkem kui tavakatsete puhul. Järgnevalt tuuakse välja valik tehases teostatavatest tüüpkatsetest [25]:

- Isolatsioonikatsed;
- Vahelduvpingekatsed, mis viiakse läbi lühiajalise võrgusagedusega taluvuspingel ühe minuti jooksul;
- Välguimpulsskatsed, mis teostatakse mõlema polaarsusega pingetega, kusjuures seade peab vastu pidama impulsspingele $1,2/50 \mu s$;
- Takistuse mõõtmine, mis käsitleb abikontaktide takistuse mõõtmist, kontaktide ja ühenduste takistuse mõõtmist;

- Kestevvoolukatsed nimikestevvooluga, kusjuures toitevool peab olema praktiliselt siinuseline ning katseobjekti temperatuur ei tohi tõusta lubatust kõrgemaks;
- Termilise taluvusvoolu ja dünaamilise taluvusvoolu katsed, kus katsevoolu vahelduvkomponent peab olema võrdne termilise normtaluvusvoolu vahelduvkomponendiga ning löökvoolu väärtus ei tohi olla väiksem dünaamilisest normtaluvusvoolust. Pärast katse teostamist peab seade olema töökorras.

Lisaks tehases läbi viidavatele testidele teostatakse ülevaatuseid ja hooldustöid ka juba alajaama paigaldatud seadmetele. Esimeseks sammuks on visuaalne kontroll talitlevale seadmele, mille käigus on oluline täheldada ebanormaalsset müra, särinat ja kõrget temperatuuri. Jaotusseadme Merlin Gerin RM6 visuaalsel vaatlusel on oluline kontrollida SF₆ gaasi rõhku. Lülitamisi tohib teostada vaid juhul, kui gaasi rõhk mahutis on lubatud piirides. SF₆ gaasi lekkel kõrvaldatakse seade tööst. Pingeindikaatorite puhul tuleb veenduda, et pingestatud kaabli korral näitavad pingeolemasolu kõik kolm valgusdiodi. Samuti tuleb testida indikaatorlampide mõõtmisavasid, mis võimaldavad kontrollida faasi järjestust ning kaabli pingestatust. Lisaks tuleb olla kindel, et puudub ligipääs pingestatud osadele- näiteks peab kaablikambri uks olema korralikult kinni, et takistada juurdepääsu pinges kaablile. Kontaktühenduste kontroll hõlmab kontaktühenduste ja otsamuhvide visuaalset hindamist, kontaktühenduste temperatuuri mõõtmist, poltide, seibide ja mutrite kindla pingutusmomendiga kinni keeramist ning otsamuhvi tolmust puhastamist. [32]

Esmase või perioodilise hoolduse vältel teostatakse samuti visuaalne ülevaatus, mis sisaldab eelpool toodud toiminguid. Lisaks puhastatakse hoolduse korral jaotusseadme välispinnad, läbiviigud ja muud detailid tolmust. Üheks tähtsaks protsessiks hoolduse läbiviimisel on kõikide jaotusseadme operatiivlülitite lülitamine. Seeläbi kontrollitakse lülitusmehhanismide toimimist. Lülitusliigutuse teostamisel on oluline jälgida, et olekunäidik vastab lüliti tegelikule asendile. Lisaks on oluline kontrollida blokeerimisseadmete mehaanilist seisukorda, et võimaldada eksliku lülitamise takistamist. [32] Releekaitse rakendumise kontrollimiseks kasutatakse testseadet VAP 6, mis võimaldab seisukorra hindamiseks teostatava katse viia läbi normaaltalitusel ilma võimsuslülitit välja lülitamata [33]. Selline lahendus võimaldab selgitada välja releekaitse nõuetekohase rakendumise ilma tarbijatele elektrikatkestust põhjustamata. Juhul kui mõne eeltoodud kontrolli või katse läbi viimisel tuvastati viga, määratakse probleemi kriitilisusest sõltuvalt aeg, mille jooksul tuleb viga kõrvalda. Näiteks kui lüliti ajamit ei ole võimalik korrektselt lülitada tuleb probleemiga tegeleda kohe. Seevastu ebakorrekse kontaktühenduse võib parandada aasta jooksul. [34]

4.1 Käsitletava jaotusseadme seisukorra testimine

Keskpinge jaotusseadme Merlin Gerin RM6 puhul on kogumislaidid ja lülitid paigutatud SF₆ gaasiga täidetud mahutisse. Lõputöö raames käsitletaval jaotljal on SF₆ gaas välja lastud, et tutvuda jaotusseadme komponentidega, mis alajaamas talitleva seadme puhul on kaetud. Ilma isolatsioonikeskkonnata jaotusseade ei suuda kustutada tekkivat elektrikaart ning seega tuleb olla ettevaatlik seadme käsitlemisel. Lisaks on jaotusseadmega lülitamiste teostamiseks vajalik kogemus ja ohtude mõistmine. Näiteks Elektrilevi võrgus lülitamiste läbi viimiseks tuleb esmalt läbida koolitus ja sooritada eksam. Seejärel toimub lülitamiste praktika, mis seisneb operatiivlülitamiste jälgimises. Lisaks tuleb teostada mitmeid lülitamiste dubleerimisi, kus lülitamist kontrollib õigustega isik. Samuti peab lülitamisi teostav isik kandma kaitseriietust. Eelnevat arvesse võttes selgub, et käsitletaval jaotusseadmepel saab testida vaid valitud funktsioone, kusjuures katsete läbiviimine peab toimuma mõnevõrra erinevalt klassikalisest testimisest.

4.1.1 Lülitite proovilülitamine

Esimeseks sammuks jaotusseadme seisukorra hindamisel on lülitite proovilülitamine veendumaks, et lülitismehhanism on töökorras. Lülitamised tuleb läbi viia kõigi nelja kommutatsiooniseadmepga, kusjuures tuleb veenduda, et lüliti on võimalik lülitada suletud ja avatud asendisse. Samuti tuleb teostada lülitamised maanduslülitite kontaktide avamiseks ja sulgemiseks. Üheaegselt lülitustoimingu teostamisega tuleb jälgida jaotusseadme esipaneelil asuvat asendinäiturit, mis võimaldab kontrollida lülitamise õnnestumist ning pakub võimaluse visuaalselt veenduda lüliti asendis. Käsitletaval jaotusseadmepel on eemaldatud tagumine paneel, mis läbi avaneb võimalus vaadelda lüliti asendi vahetumist. Katse läbi viimisel selgus, et kõik lülitid ja asendinäiturid on töökorras.

4.1.2 Seadme testimine suurimal lubataval kestevpingel

Keskpinge jaotusseade peab võimaldama talitlust suurimal lubataval kestevpingel ning pidama vastu sisemistele ja välistele liigpingetele. Jaotusseadme disainimisel on arvestatud, et isolatsioonikeskkonnaks on SF₆ gaas ning seetõttu on lülitite ja lattide vahed väiksemad võrreldes õhkiisolatsiooniga seadmetega. Sellest tulenevalt on selge, et ilma gaasisolatsioonita ei ole seade võimeline taluma liigpingeid. Seega testitakse antud katses ainult käsitletava jaotusseadme vastupidavust suurimal lubataval kestevpingel. Selleks teostatakse katse Tallinna Tehnikaülikooli laboris. Katseskeem saab toite toitekilbist. Juhtimispuuldist toimub autotrafo väljundpinge reguleerimine vahemikus 0-230 V, kusjuures autotrafo sekundaarmähis ühendatakse 100 kV

kõrgepingetrafo primaarmähisega. Seega toimub trafo väljundpinge reguleerimine autotrafo abil. Voolu piiramiseks ühendatakse kõrgepingetrafoga vesitakisti, millega on omakorda ühendatud kogumislatt, et võimaldada katseseadmete pingestamist. Katseskeem on ühendatud maanduskontuuriga. Kogumislatt ühendatakse kaabliga jaotusseadme pingestamiseks, kusjuures tavaliselt ühendatakse jaotusseadmega kaabel nurkliidese abil, kuid katse iseloomust tulenevalt toimub kaabli ühendamine käepäraste vahenditega. Pingestamiseks kasutatakse spetsiaalset kõrgepingekaablit, millele on otsa ühendatud krokodillühendus. Seejärel ühendatakse kaabel krokodilli abil läbiviiku keeratud poldi külge (joonis 4.1a) Turvalisuse huvides ühendatakse kõrval kambris asuvate läbiviikude külge samuti poldid, et võimaldada pingestamata faaside maandamist (joonis 4.1b). Samuti on võimalik maandada pingestatavat läbiviiku ning ka jaotusseadme korpus on ühendatud maanduskontuuriga. Kirjeldatud viisil jaotusseadme pingestamine tagab ohutu kauguse katset teostavale isikule.



a)



b)

Joonis 4.1 Jaotusseadme pingestamine: a) faasi L3 pingestamine b) pingestamata faaside maandamine

Suurimal lubataval kestevpingel jaotusseadme testimiseks teostatakse kolm katset. Iga katse ajal pingestatakse erinev faas ning pingestamata faasid maandatakse. Käsitleva jaotusseadme suurim lubatav kestevpinge on 24 kV ning seega on ühele faasile rakendatav faasipinge 13,8 kV. Jaotusseadme pingestamiseks tuleb sisse lülitada toitekilpi toide, madalpinge osa toide ning seejärel kõrgepinge osa toide juhtpuldist. Pinge reguleerimine toimub juhtpuldist, kusjuures pinget tõstetakse aeglaselt

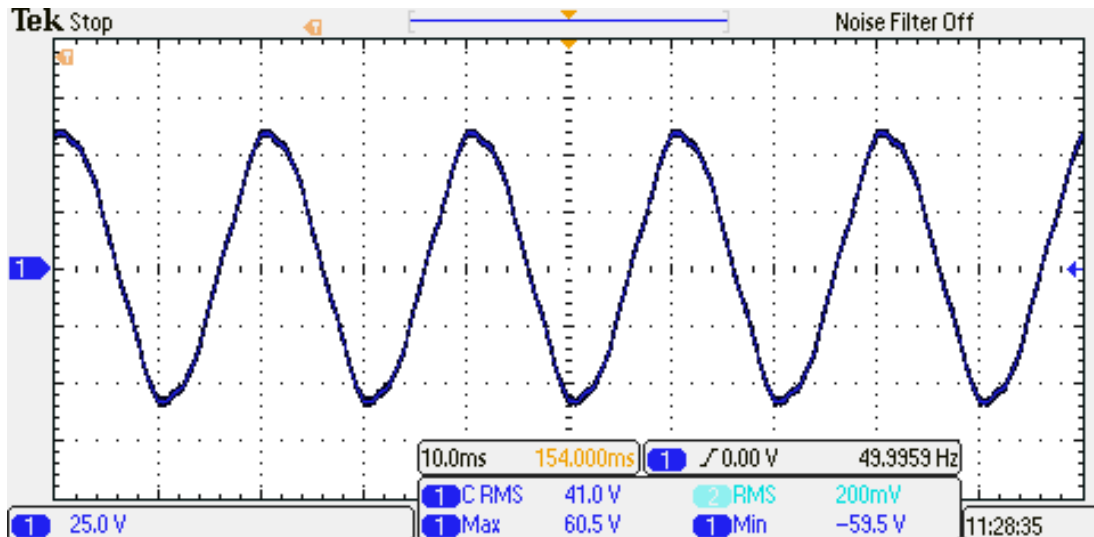
rakendatava pingeni. Katse teostamisel selgus, et jaotusseade on võimeline taluma suurimat lubatavat kestevpinget, mis viitab läbiviikude ja lattide korrasolekule.

4.1.3 Pingeindikaatorite testimine

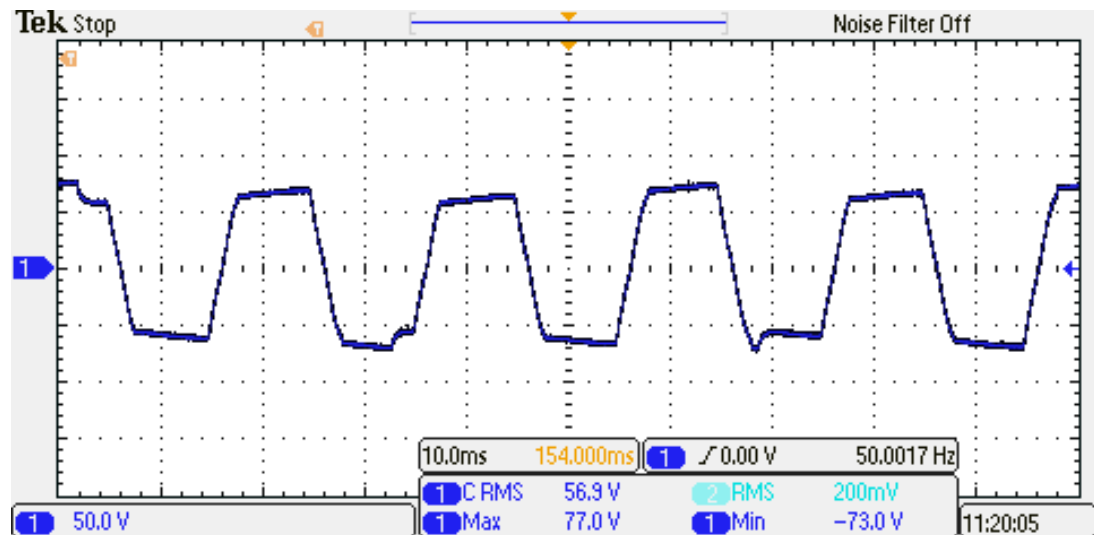
Üheaegselt jaotusseadme pingestamisega tuleb kontrollida pingeindikaatorite töökorda veendumaks, et alajaamas töid teostaval operaatoril oleks võimalik visuaalselt kontrollida kaabli pingestatust. Iga faasi pingestamisel peab näitama pinge olemasolu vastava faasi pingeindikaatori valgusdiodid. Faaside pingestamisel selgus, et valgusdiodid hakkab aeglaselt vilkuma alates 5 kV pingest, kusjuures pinge kasvades kiireneb valgusdiodi vilkumine. Valgusdiodid jääb konstantselt põlema, kui rakendatavaks pingeks on vähemalt 10 kV. Katse tulemusena selgus, et kõik pingeindikaatorid on töökorras. Samuti kontrolliti pingeindikaatorite mõõtepesasid, mis on mõeldud pinge olemasolu kontrollimiseks kaablis. Pingeindikaatori kaudu ei ole võimalik kontrollida kaablis olevat tegelikku pingeastet, kuid võimalik on tuvastada vähendatud pingeastme suurus. Laboratoorse töö osaks on ühendada pingeindikaatori mõõtepesa ostsilloskoobiga kontrollimaks, kas seade tuvastab pinge olemasolu. Kaabli pingestamisel tõstetakse pinget aeglaselt ning fikseeritakse seitsmel erineval pingeastmel kaabli tegelik pinge, mõõtepesast mõõdetava pinge maksimaalne ja minimaalne väärtus ning efektiivväärtus. Tabelis 4.1 on toodud mõõtetulemused, kust selgub, et 6 kV ja kõrgema pinge korral mõõtepesast fikseeritud pinge maksimum ja miinimum väärtused märkimisväärselt ei suurene. Siiski kasvab pinget tõstes pinge efektiivväärtus. Joonisel 4.2 ja 4.3 on toodud ostsilloskoobi väljavõtted, kust selgub, et 4,87 kV pinge korral on pinge siinuseline, kuid suurema pinge korral on siinuse tipud maha lõigatud. See tähendab seda, et pingeastmeni, mil valgusdiodid ei vilgu, on pinge siinuseline ning pinge korral, mida on võimalik visuaalse vaatluse teel pingeindikaatoritest tuvastada, on siinuse kuju muutunud. Seega on pingeindikaatori mõõtepesast mõõdetava pinge väärtus piiratud.

Tabel 4.1 Pingeindikaatori seisukorra hindamiseks teostatud mõõtmiste tulemused

Rakendatav pinge U (kV)	Mõõdetud pinge miinimumväärtus U_{min} (V)	Mõõdetud pinge maksimumväärtus U_{max} (V)	Mõõdetud pinge efektiivväärtus U_{ef} (V)
1,9	-22,3	23,3	14,8
4,9	-59,5	60,5	41,0
6,7	-72,5	72,5	50,8
8,1	-72,5	72,5	52,9
10,2	-73,5	75,5	57,5
12,0	-73,0	77,0	56,9
13,8	-73,5	76,5	60,3



Joonis 4.2 Pingeindikaatorilt mõõdetud pinge rakendataval pingel 4,87 kV

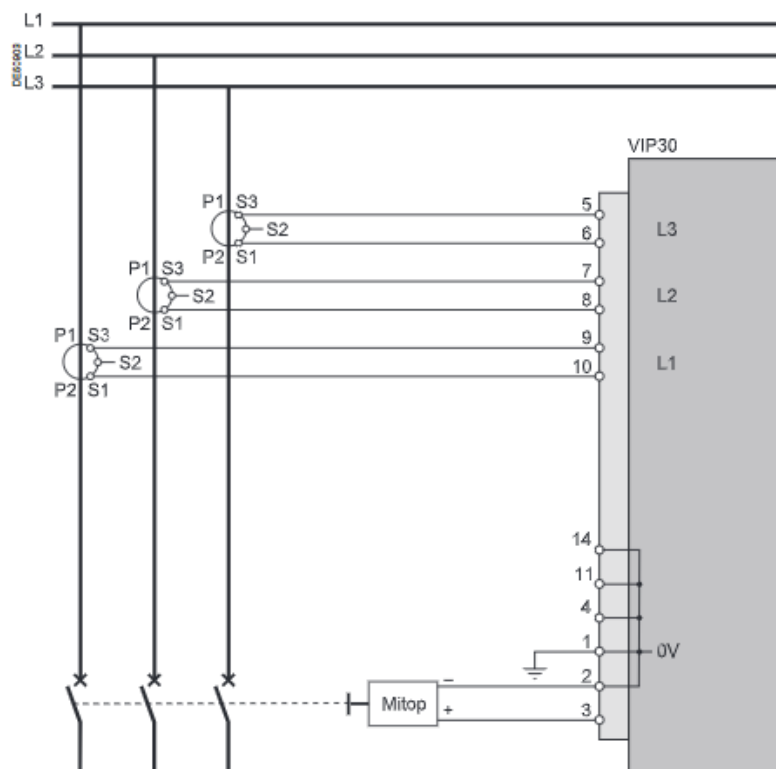


Joonis 4.3 Pingeindikaatorilt mõõdetud pinge rakendataval pingel 11,98 kV (vastab faasidevahelisele pingele 20 kV)

4.1.4 Releekaitse rakendamise kontroll

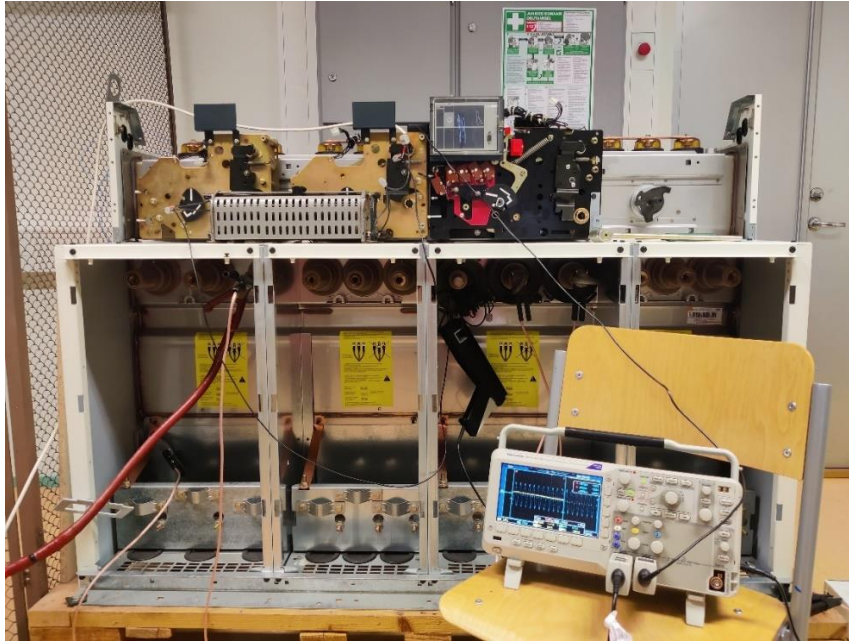
Neljandaks osaks jaotla seisukorra hindamisel on releekaitse rakendamise kontroll. Releekaitse eesmärgiks on tuvastada rike ning rakendada võimsuslüliti. Selleks jälgib kaitserelee pidevalt voolu suurust ning mõõdetava väärtuse märgataval suurenemisel üle seadistatud väärtuse tuvastatakse viga. Kaitserelega on ühendatud voolutrafo, mis vähendab voolu väärtust releekaitse jaoks. Jaotusseadmel Merlin Gerin RM6 on kaitserelee VIP 30. Kaitsereleed seadistakse pöördlülitiga, mille abil määratakse voolu maksimaalne seadeväärtus amprites normaaltalitusel. Kaitserelee rakendub seadmete ja ühenduste kaitseks minimaalselt 1,2 kordse voolu seadeväärtuse korral. Releekaitse saab seadeväärtuse valida kahes seadistusvahemikus: 8-80 A ja 20-200 A. Seadistusvahemik sõltub voolutrafo juhtmestiku ühendamisest releekaitsega. Joonisel

4.4 on toodud voolutrafo väljavõtete ja releekaitse ühendamise skeem, kust selgub, et voolutrafol on kolm väljavõtet S1-S3. Väljavõtete S1 ja S2 ühendamisel releekaitsega on seadistusvahemikuks 8-80 A, kusjuures voolutrafo suhe on 200/1 [33]. Väljavõtete S1 ja S3 ühendamisel releekaitsega on seadistusvahemikuks 20-200 A ning voolutrafo suhe on 500/1 [33].



Joonis 4.4 Releekaitse ühenduskeem [33]

Releekaitse rakendumist ei kontrollita ohutuse huvides klassikalisel viisil. Jaotusseadme isolatsioonikeskkonna eemaldamise tõttu puudub võimalus kontaktide lahutamisel tekkivat elektrikaart kustutada ning seetõttu tuleb teostada katse viisil, et releekaitse signaal lüliti avamiseks ei jõuaks lülitini. Teostatavas katses on releekaitse seadistusvahemik 8-80 A. Voolu ja pinge genereerimiseks kasutatakse reguleeritavat vahelduvvoolu allikat, mis on ühendatud kahe rööpühenduses reostaadiga rakendatava voolu suuruse piiramiseks. Läbi paralleelsete reostaatide viiakse pingestatud juhe voolutrafole, kusjuures juhett keritakse ümber voolutrafo mõõdetava voolu suurendamiseks 20 keerdu. Keerdude külge paigaldatakse vooluproovik, mis ühendatakse ostsiloskoobiga. Seadeväärtusest suurema voolu mõõtmisel reageerib releekaitse seade. Töökorras ja elektrivõrgus talitletavatel seadmetel ühendatakse releekaitse väljundid Mitop'ile ehk mähisele, mis käivitab võimsuslüliti väljalülitamiseks lülitismehhanismi. Antud katses ühendatakse Mitop'i asemel releekaitse klemmidele ostsiloskoobiga ühendatud diferentsiaalproovik, mille abil kuvatakse ostsiloskoobi ekraanile pinge graafik releekaitse rakendamise hetkel. Joonisel 4.5 on näha katse teostamiseks koostatud katseskeem.



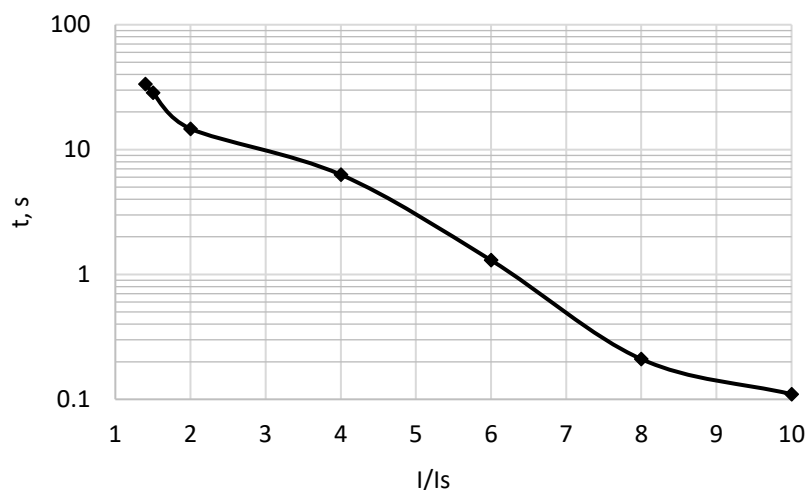
Joonis 4.5 Katseskeem releekaitse rakendumise kontrollimiseks

Releekaitse rakendumise kontrollimiseks teostatakse kaheksa katset, et veenduda seadme töökorras erinevatel seadeväärtustel. Kuigi releekaitse peab rakenduma 1,2 kordse seadeväärtuse korral, rakendatakse antud katses 1,5 kordset voolu suurust. Teatavasti rakendub releekaitse viitega ning 1,2 kordse seadeväärtuse korral ei rakendu releekaitse mõne minuti jooksul. Tabelis 4.2 on esitatud katse tulemused, kust selgub, et releekaitse rakendub iga seadeväärtuse korral ligikaudu 30 sekundi jooksul. Katsete teostamisel veenduti, et releekaitse lülitab võimsuslülitit nõuete kohaselt, kuid enamus katseid sooritati avatud kontaktidega võimsuslülitiga, sest eesmärgiks oli fikseerida lülituskäsu toimimine.

Tabel 4.2 Releekaitse rakendumine 1,5 kordse seadeväärtuse korral

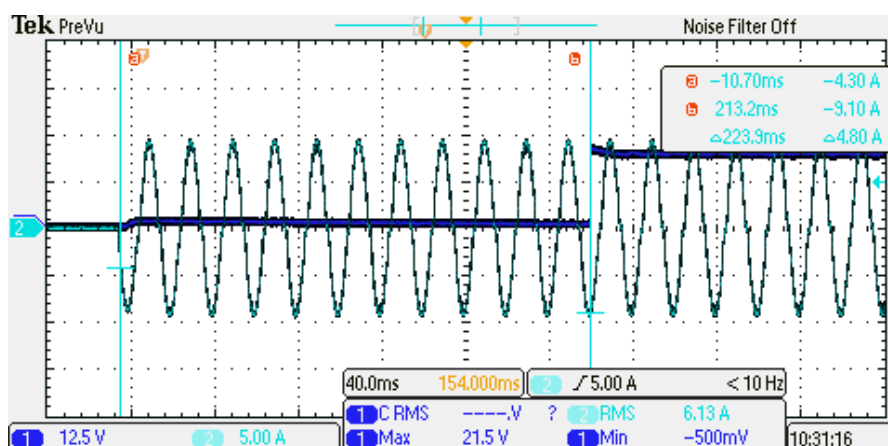
Seadeväärtus I_s (A)	Rakendatav vool I (A)	Releekaitse rakendumisaeg t (s)
8	12,0	28,5
15	22,5	25,2
22	33,0	32,1
36	54,0	33,3
46	69,0	31,4
56	84,0	31,4
68	102,0	29,9
80	120,0	30,2

Releekaitse rakendumise viite uurimiseks teostatakse katse, kus seadeväärtuseks määratakse 8 A ning seejärel rakendatakse mitmekordset seadeväärtuse voolu suurust, et teha kindlaks viite sõltuvus liigvoolu kordsusest. Selleks teostatakse seitse katset, kusjuures kogutud mõõtetandmete põhjal luuakse releekaitse rakendumise karakteristikut iseloomustav kõver, mis on toodud joonisel 4.6. Viiteaeg fikseeritakse stopperi või ostsilloskoobi abil. Teostatud katsest selgub, et väiksema liigvoolu korduse korral rakendub lüliti pikema viite järel, kuid juba kuuekordse seadeväärtuse ületamisel reageerib kaitserelee vähem kui sekunditega.



Joonis 4.6 Releekaitse rakendumise karakteristik

Joonisel 4.7 on toodud ostsilloskoobi väljavõtte releekaitse rakendumise hetkel. Vaadeldav joonis iseloomustab katset, kus rakendatav vool on kaheksa korda suurem seadeväärtusest. Joonis illustreerib releekaitse rakendumiseks antava signaali edastamist ning viite lõpus lüliti rakendumist. Väljavõttelt on võimalik tuvastada rakendatava voolu suurus ja releekaitse reageerimisaeg, kusjuures vooluproovik mõõdab ainult osa kogu voolutrafast läbivast voolust.



Joonis 4.7 Ostsilloskoobi väljavõtte releekaitse rakendumisest, kui rakendatav vool on võrdne kaheksakordse seadeväärtusega. Kanal 1 on relee lülituskäsu väljundi pinge ja kanal 2 on vool.

5 JAOTUSSEADME INTEGRERIMINE ÕPPETÖÖSSE

Käesoleva uurimistöö käigus integreeritakse õppetöösse keskpinge jaotusseade Merlin Gerin RM6. Käsitletav jaotla on Tallinna Tehnikaülikoolile annetatud teadusuuringute ja õppetöö edendamiseks. Jaotusseadme ehituse, tööpõhimõtte ja lülitustoimingute sooritamisel kehtivate nõuete mõistmiseks koostatakse laboratoorne töö. Laboratoorse töö läbi viimine toimub tuginedes laboratoorse töö juhendile, kusjuures juhend on toodud Lisas 1. Kontrollimaks üliõpilaste teadmiste omandamist on antud laboratoorse töö läbimiseks nõutav laboratoorse töö aruande koostamine. Näidisaruanne on toodud Lisas 2.

5.1 Koostatava laboratoorse töö ülesehitus ja vajalikkus

Koostatav praktikum koosneb kahest osast: praktilistest ülesannetest, mis tuleb sooritada laboris, ning kodutööst, mille põhjal koostatakse aruanne. Praktiline töö viiakse läbi ülikooli laboris. Jaotusseadmed on esindatud paljudes alajaamades ning seega on seadme tundmine äärmiselt oluline. Alustuseks saavad üliõpilased võimaluse tutvuda keskpinge jaotusseadmega ning vaadelda seadme erinevaid komponente. Seadmel on eemaldatud tagapaneel, osa esipaneelist ja lülitusmehhanismist ning kaablikambri ukсед. Seeläbi on võimalik uurida seadme komponente, mida alajaamas talitleva seadme puhul ei ole võimalik näha. Näiteks saab lülitamiste imiteerimisel jälgida lülitite asendi muutumist, et saada aimdus kolmeastmelise lüliti tööpõhimõttest. Lisaks on oluline uurida jaotusseadme ehituslikke lahendusi, mis tagavad turvalisuse seadme käsitlemisel.

Järgnevas sammuks praktikumi läbimisel on seadme töökorra hindamine. Seeläbi õpivad tudengid seade käsitlema, mõistavad jaotusseadme tööpõhimõtet, komponentide vajadust ning korrektset toimimist. Jaotusseadme seisukorra hindamiseks teostatavad kontrolltegevused ning katsete sooritamisel omandatavad teadmised ja oskused on järgmised:

- Lülitite seisukorra kontrollimisel saab harjutada lülitusliigutuse teostamist ning tekib arusaam lahendustest, mis välistavad inimliku eksimise võimaluse jaotusseadme käsitlemisel. Sellisteks lahendusteks on näiteks lülitushoova disain, mis ei võimalda teostada kohest lülitamist vastupidises suunas, ning völlile juurepääsu tagava ava kate, mis ei võimalda lülitushooba sisestada maanduslüliti lülitamiseks suletud kontaktidega koormus- või võimsuslüliti korral. Lisaks tuleb lülitite seisukorra kontrollimisel veenduda peale iga lülitamise

teostamist, et jaotusseadme esipaneelil asuva asendinäituri näit vastab lüliti tegelikule asendile.

- Jaotusseadme testimine talitluspingel õpetab tudengile jaotusseadme pingestamise protsessi, juhatakse tähelepanu maandamisele ning ohutusele seadme pingestamisel.
- Pingeindikaatorite töökorra hindamisel omandatakse teadmised pingeindikaatorite olulisuse ja funktsionaalsuse kohta.
- Releekaitse rakendumise kontrollimisel saab veenduda võimsuslülitil, releekaitse ja voolutrafo nõuetekohases talitluses. Seeläbi saab selgeks kõigi kolme komponendi tööpõhimõtte ning rakendamise vajadus.

Tudengite poolt koostatav laboratoorse töö aruanne valmib iseseisva tööna. Üheks osaks aruandest on lülituskavade koostamine eesmärgiga teostada remonttöid alajaamades. Lülituskavade koostamine toimub lähtudes piirkonnaskeemist, kus on esindatud kõik vaadeldavas piirkonnas asuvad alajaamad, ning alajaama skeemist, kus on näha keskpingejaotla, trafo ning madalpingejaotla. Skeemide läbi töötamisel tutvutakse erinevate alajaama skeemidega, areneb elektriskeemi lugemisoskus ning tingmärkide tundmine. Lülituskava koostamiseks on vaja mõista võrgu talitlemist, lülitite otstarvet ja tööpõhimõtet ning saab selgeks erinevate lülite kombineerimise võimalus. Lisaks omandatakse teadmised lülitite ja teiste võrgu elementide lühendite kasutamise kohta ning kujuneb ettekujutus jaotusvõrgus hooldus- või remonttööde teostamiseks vajalikest ümberlülitamistest või elektrikatkestustest.

Teiseks osaks laboratoorse töö aruandest on jaotusseadme valimine tuginedes etteantud algandmetele. Ülesande lahendamise eeldab elektrisüsteemi toimimise mõistmist ning teadmiseid jaotlate ja lülitite talitlust mõjutavate pingete ja voolude kohta. Arvutuste tulemusena tuleb valida lähteandmetele vastav jaotusseade ning jaotlaga ühendatav kaabel, mis arendab informatsiooni ja tootekataloogide otsimise oskust ning pakub võimaluse tutvuda erinevate jaotusseadmete ja kaablimarkidega. Antud arvutuste teostamine on vajalik oskus, mis tuleb kasuks kõikidel elektriala töökohtadel. Lisaks sisaldab aruanne erinevatele küsimustele vastamist, mis eeldab käsitletavate teemade süvitsi mõistmist.

Koostatav laboratoorne töö muudab õppetöö praktilisemaks ning võimaldab kinnistada loengus õpitud teooriat. Laboratoorne töö erineb klassikaliselt ülikoolis läbi viidavatest praktikumidest ning on seeläbi uudne kogemus tudengitele. Laboratoorne töö koosneb kolmest osast, mis läbi käsitletakse mitut erinevat teemat ning seega on töö õpiväljundid

mitmekesised. Eelnevalt alapeatükis kirjeldatud omandatavate teadmiste põhjal võib kinnitada, et laboratoorne töö loob täielikuma ettekujutuse jaotusvõrgu olemusest ja tööpõhimõttest. Lisaks pakub laboratoorne töö tudengitele reaalseid oskuseid, mida ametialaselt kasutada. Omandatavatest teadmistest on kasu näiteks dispetšeril ja võrguplaneerijal. Mõnes ettevõttes nõutakse lülitamise koolituse läbimist lisaks operatiivtöötajatele ka projektijuhtidelt, et töid organiseeriv isik oleks pädev meeskonnale korraldusi jagama.

5.2 Koostatava laboratoorse töö sobitumine õppekavasse

Koostatud laboratoorne töö ei ole loodud kindlasse õppeainesse ning seetõttu on oluline analüüsida töö sobivust õppekavasse. Järgnevalt analüüsitakse Elektroenergeetika ja mehhatroonika õppekava õppeaineid, kusjuures analüüsitava õppekavaversiooni kood on EAAB16/23 [35]. Antud õppekaval on kaks peeriala- elektroenergeetika ja mehhatroonika. Elektroenergeetika peeriala eesmärgiks on anda edasi süvendatud teadmised elektrijaotus- ja kõrgepingetehnikast. Seega sobib koostatav laboratoorne töö, mille aluseks on jaotusvõrgus kasutatav kõrgepingeseade, elektroenergeetika õppekavasse. Mehhatroonika suund põhineb mehhatrooniliste süsteemide, robotika ning tootmistehnika valdkonnal ning seega koostatav töö antud peeriala õpiväljundeid ei rahulda. Seetõttu analüüsitakse lähemalt vaid elektroenergeetika peerialal läbi viidavaid õppeaineid.

Tehnika põhialuste mooduli õppeaines kõrgepingetehnika on õpitavateks teemadeks kõrgepingekatsetused- ja mõõtmised, liigpinged ning isolatsiooni liigid [36]. Seega seletatakse õppeaines lahti lülitusliigpingete tekkimine ning põhjendatakse seadmete vastupidavuse vajadust liigpingetele. Siiski ei käsitleta õppeaines kõrgepingeseadmeid lähemalt. Tüüpõpingukava kohaselt toimub kõrgepingetehnika kolmandal semestril ning sobib seega pigem praktikumi sissejuhatavaks aineks.

Elektroenergeetika põhialuste mooduli õppeaine elektrisüsteemid annab esmase ettekujutuse elektrivõrgust. Õppetöö käigus tehakse selgeks erinevused madal-, kesk- ja kõrgepinge vahel, käsitletakse elektrivõrkude ehitust, toiteallikaid ja elektritarbijaid ning viiakse läbi elektrivõrgu parameetrite arvutused [37]. Antud õppeainet võib pidada heaks eeldusaineiks, kuid praktikumi läbiviimine antud aines oleks omandatud teadmiste põhjal liiga vara.

Ülekande- ja jaotussüsteemide moodul koosneb kolmes kohustuslikust ainek- lühised, alajaamad ja elektrivõrgud. Õppeaines elektrivõrgud saavad tudengid võrgu

modelleerimise kogemuse, ettekujutuse võrgu projekteerimisest erinevatel pingeastmetel ning võimaluse teostada võrgu püsiseisundi analüüs [38]. Antud aines ei käsitleta süvitsi elektrivõrgus kasutatavaid seadmeid, nende tööpõhimõtteid ning seadmete parameetrite valimist ning seega ei kattu aine õpiväljundid laboratoorse töö sisuga. Õppeaine lühised käsitleb elektrivõrgus esinevate lühiste liike, lühiste arvutamist nii ülekandevõrkudes kui ka arvutamise eripärasid kesk- ja madalpingevõrkudes [39]. Antud õppeaine sisule tuginedes on võimalik valida jaotusseadme parameetreid ning seega on aine läbimine laboratoorse töö sooritamiseks vajalik. Siiski ei käsitleta aines võrku paigaldatud seadmeid ega nende valimist ning seega ei ole omandatud teadmiste põhjal laboratoorset töö läbimine mõistlik. Õppeaines Alajaamad analüüsitakse süvitsi alajaama seadmeid, skeeme ja töökindlust, seletatakse lahti kommutatsiooniparaatide valimisel kehtivad põhimõtted ning vaadeldakse täpsemalt erinevaid jaotlate konstruktsioone [40]. Aine toimub tüüpõpingukava kohaselt kuuendal semestril ning seega on aine läbimise hetkeks tudengid omandanud vajalikud teadmised õppeainetest kõrgepingetehnika, elektrisüsteemid ning lühised. Eeltoodud analüüsi põhjal sobib laboratoorse töö integreerimine õppeainesse Alajaamad.

5.2.1 Laboratoorse töö integreerimine õppeainesse Alajaamad

Järgnevalt analüüsitakse õppeaine Alajaamad ainekaardi põhjal, kas laboratoorse töö sooritamise käigus omandatavad teadmised on kooskõlas õppeaine eesmärkide ja õpiväljunditega. Õppeaine eesmärgid ainekava kohaselt on järgmised [40]:

- Anda terviklik ülevaade elektrialajaamade osast elektrivõrkudes, neis kasutatavatest seadmetest, elektriskeemidest ja töökindlusest.
- Anda ülevaade alajaamade põhiseadmete (trafode, kondensaatorite ja reaktorite) neutraali talitlusest.
- Anda teadmisi alajaamade konstruktsioonidest.

Õppeaine õpiväljunditena on toodud, et üliõpilane [40]:

- kirjeldab alajaamade osa elektrivõrgus, alajaamaseadmeid ja elektriskeeme;
- kirjeldab alajaamade põhiseadmete (trafod, kondensaatorid, reaktorid) neutraali talitlust;
- arvutab trafode koormatust muutuval koormusgraafikul ja isolatsiooni kulumist;
- arvutab juhtivatele osadele mõjuvat soojuslikku ja elektrodünaamilist toimet;
- kirjeldab alajaama seadmete maandamise põhimõtteid;
- kirjeldab alajaama konstruktsiooni põhimõtteid.

Eeltoodud loetelust selgub, et vaadeldavas õppeaines käsitletakse põhjalikult alajaamas kasutatavaid seadmeid. Koostatav praktikum võimaldab selgitada reaalse seadme näitel SF₆ jaotusseadme konstruktsiooni ning eelseid ja puuduseid. Samuti mõjutab isolatsioonikeskkond oluliselt alajaama konstruktsiooni. Jaotusseade koosneb kahest erinevast lülitist ning pakub seeläbi võimaluse tuletada veelkord meelde lülitite kasutamise eesmärgi ning tööpõhimõtte. Samuti käsitletakse õppeaines kommutatsiooniseadmete valimisel kehtivaid põhimõtteid ning seega on jaotusseadme valimine võimalus teadmiste praktiseerimiseks ja kinnistamiseks. Piirkonnaskeemi põhjal lülituskavade koostamine annab ülevaate elektrivõrgu konfiguratsioonist ja alajaama skeemidest ning võimaluse korrata üle lülitite tingmärgid. Lülituskava koostamiseks on vaja mõista elektrisüsteemi ülesehitust, et võimaldada ohutut operatiivlülitamiste teostamist. Samuti tuleb elektritööde läbiviimisel veenduda, et töökoht ja seadmed oleksid maandatud ning see eeldab tudengi erialast teadlikkust maanduslahenduse valimisel. Kuigi laboratoorne töö ei täida kõiki õppeaine eesmärke ja õpiväljundeid võib siiski pidada koostatavat laboratorset tööd õppeainesse sobivaks ning heaks võimaluseks käsitletavate teemade praktilisel teel omandamiseks.

Õppeaine Alajaamad toimub kaheksal akadeemilisel tunnil nädalas, kusjuures tunnid viiakse läbi kahel päeval nädalas. Tunniplaani kohaselt ei ole ette nähtud praktikumide läbi viimist ning seega tuleks laboratoorne töö teostada loengute või harjutustundide toimumise ajal. Praktikumi läbi viiva juhendaja poolt on oluline selgitada põhjalikult lahti jaotusseadme komponendid ja tööpõhimõtte, et tudengid mõistaksid teostatavate katsete vajadust. Samuti tuleb juhtida üliõpilaste tähelepanu ohutule praktikumi läbimisele. Olenevalt katsest tuleb teostada komponendi seisukorra hindamine kas kõikide kommutatsiooniseadmete või faasidega eraldi, mis muudab praktikumi sooritamise ajamahukaks. Lisaks kulub aega katsekeemi koostamisele, kusjuures mõne katse sooritamiseks on vaja eemaldada jaotusseadme korpuse paneelid. Eelnevast tulenevalt otsustati, et laboratoorse töö praktilise osa sooritamine toimub ligikaudu viieliikmelistes rühmades ning kestab ajaliselt kaks akadeemilist tundi. Seega saab ühe nädala jooksul viia läbi neli laboratorset tööd, mis on piisav, et tagada kõigile deklareerinud tudengitele praktilise osa sooritamise võimalus. Praktilise osa läbimine ja aruande koostamine võib olla eksami eelduseks või lisapunktide teenimise võimalus.

KOKKUVÕTE

Vaadeldavas lõputöös tutvuti keskpinge jaotusseadme Merlin Gerin RM6 ehituse ja inimese turvalisust tagavate lahendustega, uuriti jaotla tööpõhimõtet ning õpiti seadet käsitsema. Lisaks anti hinnang jaotusseadme seisukorrale, kirjeldati lülitustoimingute teostamisel kehtivaid põhimõtteid, lülitamiste kava koostamist ja jaotusseadme ning jaotlaga ühendatava kaabli valimist. Töö eesmärgiks oli koostada laboratoorse töö juhend ja näidisaruanne, mis pakuks teoreetilise ja praktilise aluse jaotusseadme käsitlemiseks. Lõputöö teoreetilise tausta ning teostatud katsete põhjal koostati laboratoorse töö juhend, mis võimaldab üliõpilastel omandada täiendavaid teadmisi elektrivõrgu talitluse mõistmiseks.

Koostatud laboratoorne töö täiendab õppetöö praktilist osa elektroenergeetika peerialal. Koostatav praktikum võimaldab selgitada reaalse seadme näitel SF₆ jaotusseadme konstruktsiooni ning eeliseid ja puuduseid. Katsed, mis teostatakse jaotusseadme seisukorra hindamiseks, aitavad mõista jaotusseadme tööpõhimõtet ja korrektset toimimist. Lülitamiste kava koostamine nõuab operatiivlülitite otstarbe mõistmist ning arendab elektriskeemi lugemisoskust. Jaotusseadme ja jaotlaga ühendatava kaabli valimiseks vajalike arvutuste teostamine on oskus, mis tuleb kasuks kõikidel elektriala töökohtadel. Seega on laboratoorse töö õpiväljundid mitmekesised ning omandatavad teadmised on vajalikud erialasel tööol.

Lõputöös analüüsiti koostatava laboratoorse töö sobitumist õppekavasse ning selgus, et laboratoorne töö sobitub kõige paremini õppeainesse Alajaamad, kus käsitletakse põhjalikult alajaamas kasutatavaid seadmeid. Õppeaines käsitletakse kommutatsiooniseadmete valimisel kehtivaid põhimõtteid ning seega on jaotusseadme valimine võimalus teadmiste praktiseerimiseks ja kinnistamiseks. Piirkonnaskeemi ja alajaama skeemi põhjal lülituskavade koostamine annab ülevaate elektrivõrgu konfiguratsioonist ja alajaama skeemidest ning võimaluse korrata üle lülitite tingmärgid.

Tulevikus võiks lisada praktilise töö osaks nurkliidese ühendamise jaotusseadmega, et tudengitel oleks võimalik tutvuda korrektse jaotusseadme pingestamise viisiga. Nurkliidese ühendamine jaotusseadmega toimuks juhendi alusel, et võimaldada üliõpilaste praktiline kogemus, läbi mille saab selgeks otsamuhvi konstruktsioon. Lõpparuande koostamisel tuleks kirjeldada nurkliidese ühendamisel sooritatud tööetappe ning põhjendada iga etapi vajadust. Seeläbi mõistaksid tudengid iga sooritatud tööprotsessi otstarvet. Teatavasti on muhv enim rikkeid põhjustav element elektrivõrgus ning seega on oluline mõista paigaldusprotsessi täpsust.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt, J. Kilter, Jaotusvõrgud, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2007.
- [2] DOHO, „What is Switchgear? Definition, Types, Working Principle & More,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://dohoelectric.com/what-is-switchgear/>. [Kasutatud 19. 01. 2023].
- [3] DOHO, „What are the Advantages and Disadvantages of Indoor Switchgear?,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://dohoelectric.com/what-are-the-advantages-and-disadvantages-of-indoor-switchgear/>. [Kasutatud 19. 01. 2023].
- [4] Electrical4U, „Introduction of Indoor Switchgear – Advantages and Limitations of Indoor Switchgear,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.electrical4u.com/indoor-switchgear/?utm_content=cmp-true. [Kasutatud 08. 05. 2023].
- [5] Eaton, „What is switchgear?,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.eaton.com/us/en-us/products/medium-voltage-power-distribution-control-systems/switchgear/fundamentals-of-medium-voltage-switchgear.html>. [Kasutatud 19. 01. 2023].
- [6] Electrical4U, „What is an Arc ? | Arc in Circuit Breaker,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.electrical4u.com/what-is-arc-arc-in-circuit-breaker/>. [Kasutatud 19. 01. 2023].
- [7] R. Teemets, „Loengukonspekt 4. ELEKTRIKAAR,” Tallinn.
- [8] Amervolt, „Arc extinguishing method of fuse cutout,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.amervolt.com/news/arc-extinguishing-method-of-fuse-cutout>. [Kasutatud 19. 01. 2023].
- [9] H. Puusepp, K. Hordo, „0,22-110 kV elektripaigaldiste lülitamise juhend,” Enefit Connect OÜ, 2022.
- [10] Liyond, „What is Earthing Switch: A Complete Guide,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.electspare.com/complete-guide-of-earthing-switch-101/>. [Kasutatud 19. 01. 2023].
- [11] Merlin Gerin, „RM6 Merlin Gerin 24 kV Catalog 2003”.
- [12] Rainford Solutions, „IP Ratings & Standards Explained,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://rainfordsolutions.com/products/ingress-protection-ip-rated-enclosures/ip-enclosure-ratings-standards-explained/>. [Kasutatud 22. 01. 2023].
- [13] PRV Engineering, „How Do Busbars Work And What Are They Used For?,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://blog.prv-engineering.co.uk/what-are-busbars-used-for/>. [Kasutatud 22. 01. 2023].
- [14] S. Nopri, „Temperature Changes in Different Layers of Cable Joints and Insulation,” TalTech, Tallinn, 2015.
- [15] „Keeping electrical switchgear safe,” Health and Safety Executive, 2015.
- [16] Schneider Electric, „How to Visualize, Operate & Safely Perform Cable Testing on RM6,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.youtube.com/watch?v=zdtvGQROdNM>. [Kasutatud 22. 01. 2023].
- [17] Merlin Gerin, „RM6 civil engineering and installation manual,” 2007.
- [18] „EVS-EN ISO 11612:2015 Kaitseriietus. Kuumuse ja leekide eest kaitset pakkuv riieetus. Minimaalsed toimivusnõuded,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-11612-2015>. [Kasutatud 05. 03. 2023].
- [19] „EVS-EN 60903:2004 Pingealune töö. Isoleermaterjalist kindad,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.evs.ee/et/evs-en-60903-2004>. [Kasutatud 05. 03. 2023].

- [20] „EVS-EN 397:2012+A1:2013 Industrial safety helmets," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.evs.ee/et/evs-en-397-2012-a1-2013-consolidated>. [Kasutatud 05. 03. 2023].
- [21] BLÅKLÄDER AB, „Multinormi rinnatükiga talvekombinesoon," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.blaklader.ee/et/product/18171534-multinormi-rinnatukiga-talvekombinesoon#3389>. [Kasutatud 05. 03. 2023].
- [22] W.EG. Eesti OÜ, „9 Dielektrilised kindad 17000 V suurus 9," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.weg.ee/dielektrilised-kindad-17000-v-suurus-9-1220918>. [Kasutatud 05. 03. 2023].
- [23] Tamrex Ohutuse OÜ, „KASK Plasma lõuarihmaga Hi-Vis kiiver," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://tamrex.eu/ee/et/529-2531-kask-plasma-louarihmaga-hi-vis-kiiver.html#/32-color-09>. [Kasutatud 05. 03. 2023].
- [24] „Elektripaigaldiste käidu ohutusjuhend," Elektrilevi, Tallinn, 2015.
- [25] „EVS-EN 62271-1:2017+A1:2022 Kõrgepingeline lülitus- ja juhtimisaparatuur. Osa 1: Vahelduvvoolu lülitus- ja juhtimisaparatuuri üldliigitus," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.evs.ee/et/evs-en-62271-1-2017-a1-2022-consolidated>. [Kasutatud 10. 05. 2023].
- [26] W.EG. Eesti OÜ, „HOIATUSMÄRK "MITTE LÜLITADA" 150x210MM," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.weg.ee/hoiatusmark-mitte-lulitada-150x210mm-108908>. [Kasutatud 07. 03. 2023].
- [27] Schneider Electric, „Medium Voltage Technical Guide".
- [28] E. Tiigimägi, Elektrivõrgud, Tallinn: TalTech Kirjastus, 1997.
- [29] Ü. Treufeldt, Lühised elektrisüsteemides, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2002.
- [30] AS Esvika Elekter, "AHXAMK-W 3x240+35Cu 20kV jõukaabel," [Online]. Saadaval: <https://pood.esvika.ee/kaablid-ja-juhtmed/ahxamkw-3x24035cu-20kv-joukaabel>. [Accessed 29. 03. 2023].
- [31] „EVS-EN IEC 62271-200:2021 High-voltage switchgear and controlgear - Part 200: AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iec-62271-200-2021>. [Kasutatud 10. 05. 2023].
- [32] A. Tarkmees, „KP/MP alajaamade, jaotuspunktide ja nende seadmete visuaalne ülevaatus ja hooldamine," Elektrilevi OÜ, 2021.
- [33] Schneider Electric, „VIP30, VIP35 User's manual," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://manualzz.com/doc/6995552/vip30--vip35>. [Kasutatud 12. 05. 2023].
- [34] T. Huik, „MMS vaatlusandmed ja parandustegevused," Enefit Connect OÜ, 2022.
- [35] TalTech, „Elektroenergeetika ja mehhatroonika õppekava," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ois2.ttu.ee/uusois/kava/EAAB16/23>. [Kasutatud 28. 04. 2023].
- [36] TalTech, „Kõrgepingetehnika ainekaart," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ois2.ttu.ee/uusois/aine/AEK0260>. [Kasutatud 28. 04. 2023].
- [37] TalTech, „Elektrisüsteemid ainekaart," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ois2.ttu.ee/uusois/aine/AEK0220>. [Kasutatud 28. 04. 2023].
- [38] TalTech, „Elektrivõrgud ainekaart," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ois2.ttu.ee/uusois/aine/AEK0280>. [Kasutatud 29. 04. 2023].
- [39] TalTech, „Lühised ainekaart," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ois2.ttu.ee/uusois/aine/AEK0240>. [Kasutatud 29. 04. 2023].
- [40] TalTech, „Alajaamad ainekaart," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ois2.ttu.ee/uusois/aine/AEK0250>. [Kasutatud 28. 04. 2023].

LISAD

Lisa 1. Laboratoorse töö juhend

Lisa 2. Laboratoorse töö näidisaruanne

Koostatavad laboratoorse töö juhend ja näidisaruanne on lõputööst eraldiseisvad osad ning seetõttu ei ole lisades toodud jooniste ja tabelite numbrid seotud lõputöö põhiosa vormistusega.

LISA 1

**TAL
TECH**

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

KESKPIINGE JAOTUSSEADE MERLIN GERIN RM6

**LABORATOORSE TÖÖ JUHEND
ÕPPEAINES AEK0250 ALAJAAMAD**

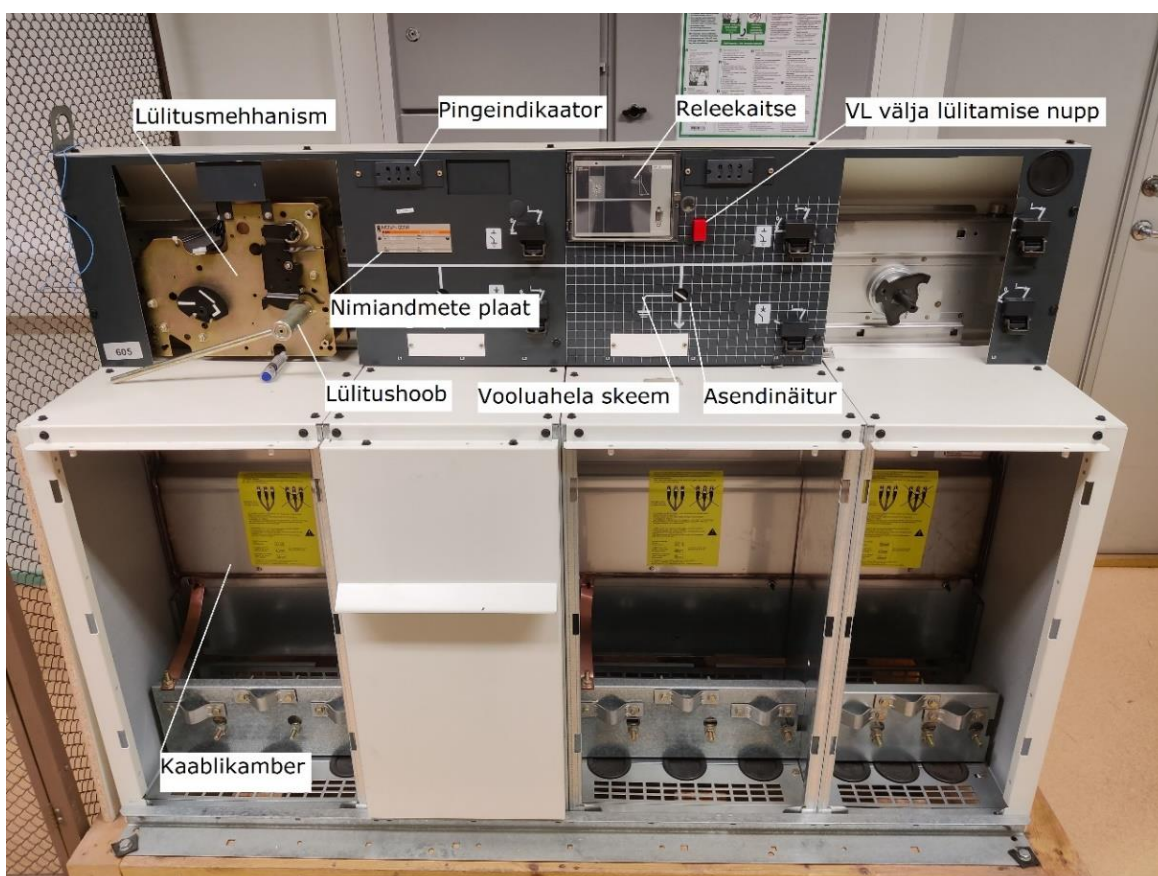
Tallinn 2023

Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on tutvuda keskpinge jaotusseadmega Merlin Gerin RM6, mõista seadme ehitust ning teha selgeks lülitamiste läbi viimisel kehtivad põhimõtted. Samuti käsitletakse jaotusseadme valimist lähtudes etteantud parameetritest.

Töö selgitus

Alajaam koosneb tavaliselt ülempingejaotlast, trafost ja alampingejaotlast. Jaotlaks nimetatakse jaotusseadet koos juhtimis-, mõõte- ja kaitseseadmetega. Antud laboratoorse töö raames käsitletakse keskpinge jaotusseadet Merlin Gerin RM6. Tegemist on metallist korpusesse paigutatud lülitusseadmete komplektiga, mida kasutatakse elektrisüsteemi ahelate juhtimiseks, kaitsmiseks ja katkestamiseks. Jaotusseadmega on võimalik ühendada üks või kaks trafot ning teostada lülitamisi nii ringtoitega võrgus kui ka radiaalvõrgus. Tegemist on gaasisolatsiooniga sisejaotlaga, kus jaotusseade ning latid on paigutatud SF₆-ga täidetud kambrisse. Käsitletav seade on toodud joonisel 1.



Joonis 1. Keskpinge jaotusseade Merlin Gerin RM6

Jaotusseadme ehitus

Jaotusseadmes on neli kommutatsiooniseadet- kolm koormuslüliti (KOL) ja võimsuslüliti (VL). Antud seadme puhul toimub trafo kaitsmine 200 A VL-ga. Jaotla esipaneelile on toodud korpusesse integreeritud kaitserelee VIP 30, mis on kaitstud läbipaistva kaanega ning ei vaja toimimiseks lisatoiteallikat. Kaitsereleed kasutatakse rikke tuvastamiseks ning VL-I käivitamiseks. Kaitserelee jälgib pidevalt voolu suurust ning mõõdetava väärtuse erinevusel normaaltalilusele vastavast suuruselt, tuvastatakse viga. Vea tuvastamisel rakendub VL. Kaitserelee tööks vajalike mõõteandmete kogumiseks peab rele ühendama voolutrafoga, mis mõõtemuundurina vähendab mõõdetud voolu väärtust releekaitse jaoks. Kaitserelee VIP 30 on mõeldud pakkuma kaitset faasidevahelise lühise korral. Kaitsereleed seadistakse pöördlülitiga, mille abil määratakse voolu maksimaalne seadeväärtus amprites normaaltalitusel. Kaitserelee rakendub seadmete ja ühenduste kaitseks 1,2 kordse voolu maksimaalse seadeväärtuse korral.

Oluliseks osaks jaotlast on kogumislattid. Kogumislattide eesmärgiks on toiteallikast tuleva elektrienergia jagamine väljuvate fiidrite vahel. Latid on valmistatud hästi juhtivast materjalist nagu vask, messing või alumiinium. Võrreldes kaablite kasutamisega on lattide eeliseks kompaktsus. Jaotusseadme Merlin Gerin RM6 puhul on latid paigutatud SF₆-ga täidetud kambrisse.

VL ja KOL vertikaalselt liikuvad kontaktid võimaldavad lülitamist kolme erineva positsiooni vahel- suletud, avatud ja maandatud. Selline lahendus välistab võimaluse VL-i või KOL-i üheaegset lülitamist maanduslülitiga (ML). See on oluline, sest maandatud süsteemi korral tekitab VL-i või KOL-i kontaktide sulgemine jaotusseadmesisese lühise. Tagajärjeks on seadme kahjustumine ning suur risk lülitamist läbi viiva operatori tervisele.

Esipaneelil on kujutatud jaotusseadme vooluahela skeem, mis on samuti kolmepositsiooniline. Selline lahendus annab operaatorile võimaluse visuaalselt kontrollida lüliti olekut. Lisaks on esipaneelil pinge indikaatorlambid, mis võimaldavad kontrollida kaablite pingestatust. Pinge indikaatorlamp on varustatud kolme valgusdiodiga, kusjuures diodi põlemine viitab pingele olemasolule kaablis. Lisaks võimaldab pinge indikaatorlamp kontrollida ühendatud kaablite faasjärjestust. Multimeetri ühendamiseks on pingele indikaatorlambil mõõtmiskohad.

Ohutuks lülitamiseks on oluline jälgida lülitamiste järjekorda. Seadmete ja inimeste kaitsmiseks on jaotusseadme konstrueerimisel välistatud inimliku eksimise võimalus. Kõik lülitamised viiakse läbi spetsiaalse lülitushoovaga. Operatiivlülitamiste

teostamiseks sisestatakse lülitushoob vastavasse avasse ning mehhaanilise süsteemi abil lülitatakse VL või KOL sisse või välja. Samamoodi viiakse läbi lülitamised ML-ga, kusjuures võllile juurepääsu tagav ava on kaetud kattega. Katet on võimalik avada vaid olukorras, kus VL-i või KOL-i kontaktid on avatud. Lülitusmehhanismi ja hoova disain ei võimalda pärast lülitamist koheselt teostada vastupidises suunas lülitamist. See on oluline, et välistada ML-i kohest avamist peale sulgemist, kui operaator on tahtmatult maandanud pingestatud kaabli. Vastupidises suunas lülitamiseks tuleb hoob esipaneelil asuvast avast välja võtta ning juhthoova uuesti sisestamisel on lülitamine taas võimalik. Selline toiming tekitab kahe lülitamise vahele viite, mis on pikem kui aeg, mis kulub kaitseseadmetel lühise kõrvaldamiseks.

Lülitamiste kava koostamine

Lülitamiste planeerimine algab eeltööga. Esmalt tuleb tutvuda võrgu skeemiga, et teha kindlaks millises alajaamas lülitamine tuleb teostada ning milliste lülitite lülitamine on vajalik. Kogutud informatsiooni põhjal koostatakse lülitamiste kava. Lülitamiste kava on juhend, mis koostatakse arvestades konkreetse lülitamise iseloomu. Juhendis on toodud samm-sammult kõik tööetapid eduka lülitamise teostamiseks. Lülitamiste läbiviimisel järgitakse eranditult kõiki lülitamiste kavas toodud punkte. Igas punktis kirjeldatakse ainult ühete kindlat toimingut, kusjuures kõik tööetapid kirjutatakse erinevale reale ja märgitakse järjekorranumbriga. Lülitamiste kava koostamisel on oluline jälgida, et välistatud oleks järgnevate olukordade esinemise võimalused:

1. Oht inimeste tervisele ja seadmete töökindlusele
2. Lubatud väärtustest suuremad/väiksemad pingekõikumised
3. Rikkeliste või maandatud seadmete pingestamine
4. Pingestatud seadmete maandamine
5. Erinevas faasis või ebasünkroonselt talitlevate võrguosade kokku ühendamise
6. Seadmete ja elektriliinide ülekoormused

Toodud loetelu järgimine on oluline, sest lülitamine ei tohi põhjustada ohtu töötavale inimesele, jaotlale ning teistele võrguseadmetele. Näiteks maandatud seadme pingestamine või pingestatud seadme maandamine põhjustab jäiga maalühise ja kolmefaasilise lühise, mille tagajärjel tekkiv elektrihaar ohustab inimest ja kahjustab jäädavalt seadet. Samuti tuleb enne ümberlülitamist veenduda, et kõik elektriseadmed- ja liinid on võimelised taluma ümbersuunatavat koormust. Ülekoormuse korral võib järsult kasvada temperatuur ning kahjustuda isolatsioon, mis põhjustab elektrisüsteemi elementide rikke. Pinge kõikumised põhjustavad seadmete ebanormaalselt talitlemist või talitlemise seiskumist. Ebasünkroonselt talitlevate võrguosade kokku ühendamise põhjustab võrgu ebastabiilset talitlust ning elektrikvaliteedi langemist. Samuti tuleb

veenduda kaablite faseeringus, sest erinevate faaside kokku ühendamise tagajärjel hakkavad pöörlevad seadmed vastupidises suunas pöörlema.

Operatiivlülitamiste teostamine

Tähtsaimaks nõudeks lülitamiste teostamisel on operaatori ohutuse tagamine. Seetõttu peab lülitamisi läbi viiv operaator kandma nõuetele vastavat kaitseriietust, kiivrit ning isoleerkindaid. Lülitamiste edukaks teostamiseks tuleb kinni pidada lülitamiste järjekorrast. Kõige olulisem on jälgida VL-i, KOL-i ja lahklüliti (LL) lülitamist ML-i asendi suhtes. See tähendab, et kui lülitustoiminguks on lüliti välja lülitamine, võib ML-i sisse lülitada alles peale koormusvoolu katkestava lüliti kontaktide lahutamist. Seevastu lüliti sisse lülitamisele eelneb ML-i välja lülitamine. Selline lülitustoimingute järjekord on oluline, sest pingestatud ahela korral ML-i sisselülitamine tekitab jäiga maalühise ning kolmefaasilise lühise.

Lülitamistoimingute teostamiseks kasutatakse lülitushooba, kusjuures jaotusseadme Merlin Gerin RM6 puhul kasutatakse nii ahela lahutamiseks kui ML-i lülitamiseks sama hooba. Lülitamiste teostamiseks tuleb lülitushoob sisestada jaotusseadme esipaneelil asuvasse kattega kaetud avasse ning füüsilist jõudu rakendades toimub lüliti asendi muutmine. VL-i lülitamine toimub eelnevalt kirjeldatud juhiste järgi. Peale lülituse läbiviimist tuleb veenduda jaotusseadme esipaneelil asuva mehaanilise asendinäituri abil lülitamise õnnestumises. KOL-i lülitamine toimub analoogselt VL-i lülitamiselega. Nähtava kaitselahutusvahemiku tekitamiseks kasutatakse LL-i. LL-i kontaktide avamisele peab eelnema VL-i või KOL-i väljalülitatud oleku kontroll asendinäituri või pingeindikaatori abil. Samuti peavad lülite kontaktid olema avatud enne LL sisselülitamist. LL sisse lülitamine toimub kiire lülitusliigutusega, kusjuures alustatud lülitustoiminut ei tohi katkestada. Seevastu väljalülitamiseoperatsioon viiakse läbi aeglase lülitusliigutusega. Lüliti elektroodide vahelise kaarleegi tekkimisel katkestatakse lülitustoiming ning lüliti viiakse tagasi sisselülitatud asendisse. Erandina saab välja tuua lülitusprotsessid, mis viiakse läbi normaaltalitlusvoolu, jõutrafode magnetimisvoolu, kogumislattide ning õhu- ja kaabelliinide lahutusvoolu lahutamiseks LL-i abiga. Sellise lülitamise õnnestumiseks tuleb lülitamine läbi viia kiire liigutusega, et tekkinud elektrikaar võimalikult kiiresti kustutada. Siiski tuleks vältida LL kontaktide avamist pingestatud olukorras, kui samast või toitevast alajaamast on võimalik VL-i abil ahelat lahutada.

Pärast õnnestunud lülitustoimingu sooritamist on kohustuslik lukustada lülite ajamid mehaanilise lukuga. Selline ohutusmeede takistab eksliku lülitamise, et kaitsta võrgus töötavaid inimesi ning elektrivõrgu seadmeid. Lisaks mehaanilisele lukule on ohutuse tagamiseks kohustuslik paigaldada lülitusseadme ajamile hoiatussilt tekstiga „Mitte

lülitada. Inimesed töötavad". Hoiatussilt annab märku, et lülitamine seab ohtu näiteks õhu- või kaabelliinil hooldus- või remonttööd läbiviiva operaatori.

Hooldus- ja remonttööde teostamiseks on oluline pärast lülitite väljalülitamist pingevaba võrguosa ohutuse tagamiseks maandada. Maandamiseks saab kasutada ML-e ja kantavaid maanduseid. Kantava maanduse puhul on tegemist kaasaskantava maanduskomplektiga, kusjuures üks maanduskompleti osa on ühendatud maandatava elektrivõrgu osa külge ning teine osa paigaldatakse jääklaengute suunamiseks maapinda. Maandatavateks osadeks võivad olla näiteks maakaablid ja õhuliinid. Juhul, kui maandamiseks on vaja kasutada mõlemat maandamisvarianti, tuleb esmalt lülitada sisse ML ning alles siis paigaldatakse kantavad maandused. Seega enne lüliti sisse lülitamist tuleb eemaldata esmalt kantavad maandused ning seejärel lülitatakse välja ML. Lisaks on oluline paigaldada kantav maandus töökoha lähedale, et töid teostav operaator saaks alati kontrollida maanduse olemasolu.

Jaotusseadme valimine

Jaotusseadmeid on erinevat liiki ning seega tuleb enne konkreetse jaotla mudeli valimist otsustada, millistele tingimustele seade peab vastama. Sise- või välisjaotla valik määrab, kas jaotla on ilmastikutingimuste ja saaste eest kaitstud või mitte. Isolatsiooni valik määrab seadme hinnaklassi, kompaktsuse ja hooldusvajaduse. Elektrilistest parameetritest lähtutakse jaotusseadme valimisel neljast suurusest- pinge, vool, sagedus ja lühisvool. Eesti elektrivõrgus on sagedus 50 Hz.

Elektrivõrgu nimipinge iseloomustab pinge suurust, millel on süsteemi seadmed ette nähtud talitlema. Seadmeid valitakse suurima lubatava kestevpinge järgi, mis näitab pinge suurust, mida seade on võimeline taluma pika perioodi jooksul. Suurima lubatava kestevpinge väärtus on suurem võrgu maksimaalsest lubatud talitluspingest. 20 kV võrgu korral võib pinge olla maksimaalselt 22 kV ning seadmete suurimaks lubatavaks kestevpingeks on 24 kV.

Pinget, mis ületab väärtust, mida isolatsioon on ette nähtud taluma, nimetatakse liigpingeks. Sisemisteks liigpingeteks on lülitusliigpinged ja resonantsliigpinged. Vastupidavust sisemistele liigpingetele mõõdetakse laboris, kusjuures jaotla, millele on märgitud sisemiste liigpingete taluvuseks 50 Hz 1 min: 50 kV rms viitab seadmele, mis peab 50 Hz sageduse korral ühe minuti jooksul vastu 50 kV pinget efektiivväärtusele.

Lisaks seesmistele liigpingetele peab jaotusseade vastu pidama atmosfäärilistele ja välistele liigpingetele. Atmosfäärilised liigpinged on kõrge amplituudiga välguliigpinged, mis tekivad, kui välgulöök tabab elektriliini. Välistes liigpinged tekivad elektriliini juhul,

kui välk lööb elektriliini lähedusse ning liigpinged indutseeritakse liini. Liigpingelaineid simuleeritakse laboris ning seeläbi tehakse kindlaks seadme vastupidavus impulsspingetele. Jaotusseade, mille impulsspingele vastupidavuseks on märgitud 1,2/50 μ s: 125 kV viitab jaotlale, mis peab vastu liigpingeimpulsile, mille frondikestus on 1,2 μ s, poolväärtusaeg on 50 μ s ning pingeimpulsi amplituudväärtus on 125 kV.

Igal jaotusseadmel on määratud nimivool, mis viitab jaotla vastupidavusele pingestatud olekus. Selleks, et veenduda jaotusseadme sobilikkuses vaadeldavasse võrku tuleb kindlaks teha voolu suurus, mis ahelas kulgeb. Tegelikku voolutugevust saab määrata, kui on teada võrguga ühendatud seadmete koormus. Koormusvoolu suurust saab arvutada valemiga 1.1.

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U}, \quad (1.1)$$

kus I — vool,
 S — koormuse näivvõimsus,
 U — võrgu nimipinge.

Juhul kui koormusvoolu arvutatakse trafo primaarpoolel on oluline koormusvoolu arvutamisel (valemiga 1.1) koormuse näivvõimsusele juurde liita trafo võimsuskaod. Kuigi trafo aseseem koosneb aktiiv- ja reaktiivtakistusest ning aktiiv- ja reaktiivjuhtivusest, võib jaotusvõrgus juhtivusi sisaldava haru asendada tühijooksuvõimsustega. Trafo võimsuskadusid saab arvutada valemitega 1.2-1.5.

$$R = \frac{\Delta P_l U_N^2}{S_N^2}, \quad (1.2)$$

kus R — trafo aktiivtakistus,
 ΔP_l — trafo lühiskadu,
 U_N — trafo nimipinge,
 S_N — trafo nimivõimsus.

$$X = \frac{u_{l\%} U_N^2}{100 S_N}, \quad (1.3)$$

kus X — trafo reaktiivtakistus,
 $u_{l\%}$ — lühispinge protsentides nimipingest.

$$\Delta P_T = \Delta P_{Cu} + \Delta P_t = \frac{S_N}{U_N^2} R + \Delta P_t, \quad (1.4)$$

kus ΔP_T — trafo summaarne aktiivvõimsuskadu,

ΔP_{Cu} — trafo vaseskadu,

ΔP_t — trafo tühijooksu aktiivvõimsuskadu.

$$\Delta Q_T = \Delta Q_X + \Delta Q_t = \frac{S_N}{U_N^2} X + \frac{I_{t\%} S_N}{100}, \quad (1.5)$$

kus ΔQ_T — trafo summaarne reaktiivvõimsuskadu,

ΔQ_X — trafo puistekadu,

ΔQ_t — trafo tühijooksu reaktiivvõimsuskadu,

$I_{t\%}$ — trafo tühijooksuvool protsentides nimivoolust.

Veendumaks, et valitud seade peab vastu lühisvoolu toimele, arvutatakse maksimaalse lühisvoolu suurus lähtudes lühise tekkimisest punktis, kus lühisvoolu väärtus on suurim. Seade peab vastu pidama maksimaalse lühisvoolu efektiivväärtusele üks või kolm sekundit olenevalt relekaitse rakendumiseks ja lülitustoimingu teostamiseks kuluvast ajast. Lühisvoolu arvutamiseks kasutatakse valemit 1.6.

$$I_k = \frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot Z}, \quad (1.6)$$

kus I_k — lühisvool,

c — pingetegur (maksimaalse lühisvoolu arvutamisel väärtusega 1,1),

Z — süsteemi näivtakistus enne lühisekohta.

Lühisvoolu hindamiseks kasutatava summaarse takistuse arvutamiseks peab arvestama kõikide süsteemi elementidega toiteallikast lühisekohani. Järgnevalt tuuakse välja valemid, mis võimaldada arvutada lühisvoolu suurust mõjutavate elementide aktiiv-, reaktiiv- ja näivtakistused.

Süsteemiharu all mõistetakse vaadeldavat süsteemi toitvat võrku. Jaotusvõrgus esineva lühise korral võib süsteemiharuna käsitleda süsteemi osa lühist sisaldavast fiidrist toitva alajaama lattideni. Süsteemiharu näivtakistust arvutatakse valemiga 1.7. Lihtsustusena arvutatakse süsteemiharu reaktiiv- ja aktiivtakistus vastavalt valemitega 1.8 ja 1.9.

$$Z_Q = c \frac{U_{nQ}^2}{S_{kQ}}, \quad (1.7)$$

kus Z_Q — süsteemiharu näivtakistus,

U_{nQ} — süsteemiharu nimipinge,

S_{kQ} — süsteemiharu lühisvõimsus.

$$X_Q = 0,995 Z_Q, \quad (1.8)$$

kus X_Q — süsteemiharu reaktiivtakistus.

$$R_Q = 0,1X_Q, \quad (1.9)$$

kus R_Q — süsteemiharu aktiivtakistus.

Kahemähiselise trafo aktiiv- ja reaktiivtakistuste arvutamine teostatakse valemitega 1.10-1.13. Antud valemid võimaldavad takistust taandada lühisekoha pingestmele. [29]

$$u_{kR\%} = \frac{\Delta P_l}{S_{nT}} 100\%, \quad (1.10)$$

kus $u_{kR\%}$ — trafo lühisepinge aktiivkomponent protsentides,
 S_{nT} — trafo nimivõimsus.

$$u_{kX\%} \sim u_{k\%}, \quad (1.11)$$

kus $u_{kX\%}$ — trafo lühisepinge reaktiivkomponent protsentides,
 $u_{k\%}$ — trafo lühisepinge protsentides.

$$R_T = \frac{u_{kR\%} U_{nT}^2}{100 S_{nT}}, \quad (1.12)$$

kus R_T — trafo aktiivtakistus,
 U_{nT} — trafo lühise poolse mähise nimipinge,
 S_{nT} — trafo nimivõimsus.

$$X_T = \frac{u_{kX\%} U_{nT}^2}{100 S_{nT}}, \quad (1.13)$$

kus X_T — trafo reaktiivtakistus.

Trafo takistusi tuleb korrigeerida parandustegurite abil. Parandustegurit arvutatakse valemiga 1.14, kusjuures korrigeeritud takistused saadakse valemiga 1.15. [29]

$$K_T = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,006 u_{kX\%}}, \quad (1.14)$$

kus K_T — trafo parandustegur,

c_{max} — pingetegur (maksimaalse lühisvoolu arvutamisel väärtus 1,1).

$$R_{TK} = K_T R_T; \quad X_{TK} = K_T X_T; \quad (1.15)$$

kus Z_{TK} — trafo korrigeeritud takistus.

Õhu- ja kaabelliini aktiiv- ja induktiivtakistuste leidmiseks on vaja teada vastavalt aktiiv- või induktiivtakistust kilomeetri kohta. Need andmed on leitavad kaablitootja kataloogist. Aktiiv- ja induktiivtakistust arvutatakse valemite 1.16 ja 1.17.

$$R_L = r \cdot l, \quad (1.16)$$

kus R_L — liini aktiivtakistus,
 r — kaabli aktiivtakistus kilomeetri kohta,
 l — liini pikkus.

$$X_L = x \cdot l, \quad (1.17)$$

kus X_L — liini induktiivtakistus,
 x — kaabli reaktiivtakistus kilomeetri kohta.

Enne süsteemi summaarse takistuse leidmist on oluline kõik arvutatud takistused taandada lühisekoha pingele. Selleks kasutatakse valemit 1.18.

$$Z' = Z \frac{U_{n2}^2}{U_{n1}^2}; \quad R' = R \frac{U_{n2}^2}{U_{n1}^2}; \quad X' = X \frac{U_{n2}^2}{U_{n1}^2}, \quad (1.18)$$

kus Z' — lühisekoha nimipingele taandatud näivtakistus,
 R' — lühisekoha nimipingele taandatud aktiivtakistus,
 X' — lühisekoha nimipingele taandatud reaktiivtakistus,
 U_{n1} — lühisekoha pingestate,
 U_{n2} — lühisekoha pingestmest erinev pingestate.

Lisaks minimaalsele ja maksimaalsele lühisvoolule on oluline kindlaks määrata löökvoolu suurus. Löökvool iseloomustab lühisvoolu suurimat hetkväärtust, mis vastab näiteks lühisele lülitamise hetkele. Löökvoolu arvutamiseks kasutatakse valemit 1.19. Valemis toodud löögiteguri väärtus on vahemikus $1 \leq \kappa \leq 2$, kusjuures aktiivahelas $\kappa=1$ ning induktiivahelas $\kappa=2$. Löögiteguri arvutamiseks kasutatakse valemit 1.20.

$$i_m = \kappa \sqrt{2} I_\kappa, \quad (1.19)$$

kus i_m — löökvool,
 κ — löögitegur.

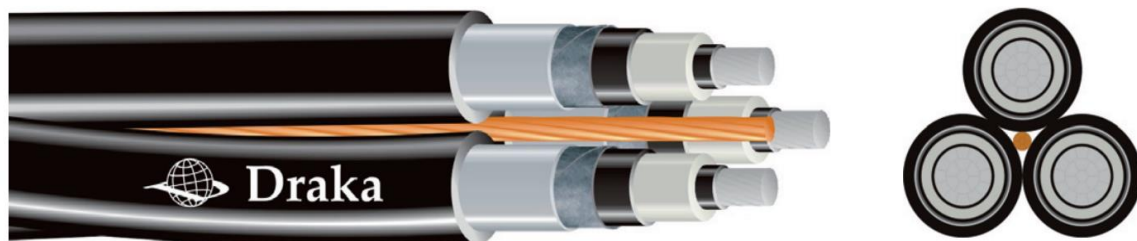
$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3\frac{r}{x}}, \quad (1.20)$$

kus r — ahela aktiivtakistus,
 x — ahela reaktiivtakistus.

Jaotusseadmega ühendatava kaabli valimine

Keskpingevõrku paigaldatakse õhu- ja kaabelliine. Jaotusseadme Merlin Gerin RM6 puhul ühendatakse maa alla paigaldatud kaabelliini ots jaotlaga. Seega käsitletakse antud alapeatükis ainult kaabelliine.

Maakaablite eeliseks on kõrge töökindlus, kaitstus välismõjude eest, ohutus ning vähene ruumivajadus. Kaabelliine rajatakse enim tiheda asustusega piirkondades. Keskpingevõrgus on kasutusel ühe- ja kolmesoonelised kaablid. Eestis on paigaldatakse sagedasti just kolmesoonelist keskjuhtmega kaablit AHXAMK-W, mida nimetatakse ka *Wiski*-kaabliks. Joonis 2 illustreerib 20 kV jõukaablit AHXAMK-W ning antud kaabli konstruktsiooni. Keskpingevõrgus paigaldatavate kaablite ristlõige jääb vahemikku 3x25-3x240 mm². Siiski eelistatakse paigaldamisel kaableid, mille ristlõige on 3x50, 3x120 või 3x240 mm².



Joonis 2. Kaabel AHXAMK-W

Kaabli valimisel on oluline veenduda, et kaabel on mõeldud paigaldamiseks vaadeldava võrgu nimipingel. Lisaks tuleb arvutada pingelang kaablis, et tagada nõuetele vastav sõlmepinge alajaamas. Kaabli ristlõike valimisel lähtutakse lubatud koormusvoolu suurusest, mis on arvutatav valemiga 1.1, kusjuures koormusvoolu arvutamisel on oluline arvestada võimsuskadudega liinis. Keskpingevõrgus võib jätta arvestamata liini koroonakaod ja mahtuvuskaod ning seega leitakse võimsuskaod liinis valemitega 1.21-1.22. Arvutuste teostamiseks vajalikud andmed on leitava kaabli tootja tootekataloogist.

$$\Delta P_L = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R_L, \quad (1.21)$$

kus ΔP_L — liini summaarne aktiivkadu,
 P — aktiivvõimsus liinis,
 Q — reaktiivvõimsus liinis,

R_L — liini aktiivtakistus.

$$\Delta Q_L = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} X_L, \quad (1.22)$$

kus ΔQ_L — liini summaarne reaktiivkadu,

X_L — liini induktiivtakistus.

Käsitletava jaotusseadme seisukorra testimine

Lülite proovilülitamine

Esimeseks sammuks jaotusseadme seisukorra hindamisel on lülite proovilülitamine veendumaks, et lülitismehhanism on töokorras. Lülitamised tuleb läbi viia kõigi nelja kommutatsiooniseadmega, kusjuures tuleb veenduda, et lülitit on võimalik lülitada suletud ja avatud asendisse. Samuti tuleb teostada lülitamised maanduslülitite kontaktide avamiseks ja sulgemiseks. Üheaegselt lülitustoimingu teostamisega tuleb jälgida jaotusseadme esipaneelil asuvat asendinäiturit, mis võimaldab kontrollida lülitamise õnnestumist ning pakub võimaluse visuaalselt veenduda lüliti asendis. Käsitletaval jaotusseadmepaneelil on eemaldatud tagumine paneel, mis läbi avaneb võimalus vaadelda lüliti asendi vahetumist.

Seadme testimine suurimal lubataval kestevpingel

Keskpinge jaotusseade peab võimaldama talitlust suurimal lubataval kestevpingel ning pidama vastu sisemistele ja välistele liigpingetele. Jaotusseadme disainimisel on arvestatud, et isolatsioonikeskkonnaks on SF₆ gaas ning seetõttu on lülite ja lattide vahed väiksemad võrreldes õhkiisolatsiooniga seadmetega. Sellest tulenevalt on selge, et ilma gaasisolatsioonita ei ole seade võimeline taluma liigpingeid. Seega testitakse antud katses ainult käsitletava jaotusseadme vastupidavust suurimal lubataval kestevpingel. Teostatava katse katseskeem saab toite toitekilbist. Juhtimispuuldist toimub autotrafo väljundpinge reguleerimine vahemikus 0-230 V, kusjuures autotrafo sekundaarmähis ühendatakse 100 kV kõrgepingetrafo primaarmähisega. Seega toimub trafo väljundpinge reguleerimine autotrafo abil. Voolu piiramiseks ühendatakse kõrgepingetrafo vesitakisti, millega on omakorda ühendatud kogumislatt, et võimaldada katseseadmete pingestamist. Katseskeem on ühendatud maanduskontuuriga. Kogumislatt ühendatakse kaabliga jaotusseadme pingestamiseks, kusjuures tavaliselt ühendatakse jaotusseadmega kaabel nurkliidese abil, kuid katse iseloomust tulenevalt toimub kaabli ühendamine käepäraste vahenditega. Pingestamiseks kasutatakse spetsiaalset kõrgepingekaablit, millele on otsa ühendatud krokodillühendus. Seejärel ühendatakse kaabel krokodilli abil läbiviiku keeratud poldi

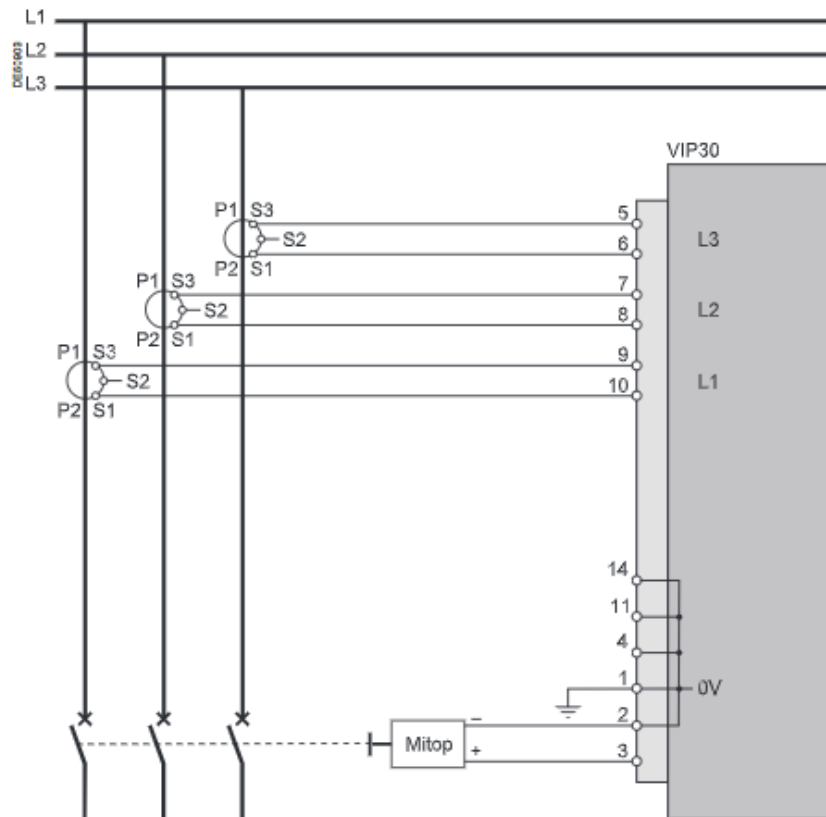
külge. Turvalisuse huvides ühendatakse kõrval kambris asuvate läbiviikude külge samuti poldid, et võimaldada pingestamata faaside maandamist. Samuti on võimalik maandada pingestatavat läbiviiku ning ka jaotusseadme korpus on ühendatud maanduskontuuriga. Kirjeldatud viisil jaotusseadme pingestamine tagab ohutu kauguse katset teostavale isikule.

Pingeindikaatorite testimine

Üheaegselt jaotusseadme pingestamisega tuleb kontrollida pingeadikaatorite töökorda veendumaks, et alajaamas töid teostaval operaatoril oleks võimalik visuaalselt kontrollida kaabli pingestatust. Iga faasi pingestamisel peab näitama pinge olemasolu vastava faasi pingeadikaatori valgusdiodid. Samuti tuleb kontrollida pingeadikaatorite mõõtepesasid, mis on mõeldud pinge olemasolu kontrollimiseks kaablis. Pingeindikaatori kaudu ei ole võimalik kontrollida kaablis olevat tegelikku pingestatust, kuid võimalik on tuvastada vähendatud pingestatuse suurus. Laboratoorse töö osaks on ühendada pingeadikaatori mõõtepesa ostsilloskoobiga kontrollimaks, kas seade tuvastab pinge olemasolu.

Releekaitse seisukorra hindamine

Neljandaks osaks jaotla seisukorra hindamisel on releekaitse rakendumise kontroll. Releekaitse eesmärgiks on tuvastada rike ning rakendada võimsuslüliti. Selleks jälgib kaitserelle pidevalt voolu suurus ning mõõdetava väärtuse märgataval suurenemisel üle seadistatud väärtuse tuvastatakse viga. Kaitserelleega on ühendatud voolutrafo, mis vähendab voolu väärtust releekaitse jaoks. Jaotusseadmel Merlin Gerin RM6 on kaitserelle VIP 30. Kaitserelleed seadistatakse pöördlülitiga, mille abil määratakse voolu maksimaalne seadeväärtus ampriites normaaltalitusel. Kaitserelle rakendub seadmete ja ühenduste kaitseks minimaalselt 1,2 kordse voolu seadeväärtuse korral. Releekaitse saab seadeväärtuse valida kahes seadistusvahemikus: 8-80 A ja 20-200 A. Seadistusvahemik sõltub voolutrafo juhtmestiku ühendamise skeemiga. Joonisel 3 on toodud voolutrafo väljavõtete ja releekaitse ühendamise skeem, kust selgub, et voolutrafol on kolm väljavõtet S1-S3. Väljavõtete S1 ja S2 ühendamisel releekaitsega on seadistusvahemikuks 8-80 A, kusjuures voolutrafo suhe on 200/1. Väljavõtete S1 ja S3 ühendamisel releekaitsega on seadistusvahemikuks 20-200 A ning voolutrafo suhe on 500/1.



Joonis 3. Releekaitse ühendusskeem

Releekaitse rakendust ei kontrollita ohutuse huvides klassikalisel viisil. Jaotusseadme isolatsioonikeskkonna eemaldamise tõttu puudub võimalus kontaktide lahutamisel tekkivat elektrikaart kustutada ning seetõttu tuleb teostada katse viisil, et releekaitse signaal lülitit avamiseks ei jõuaks lülitini. Teostatavas katses on releekaitse seadistusvahemik 8-80 A. Voolu ja pinge genereerimiseks kasutatakse reguleeritavat vahelduvvoolu allikat, mis on ühendatud kahe rööpühenduses reostaadiga rakendatava voolu suuruse piiramiseks. Läbi paralleelsete reostaatide viiakse pingestatud juhe voolutrafole, kusjuures juhet keritakse ümber voolutrafo mõõdetava voolu suurendamiseks 20 keerdu. Keerdude külge paigaldatakse vooluproovik, mis ühendatakse ostsiloskoobiga. Seadeväärtusest suurema voolu mõõtmisel reageerib releekaitse seade. Töökorras ja elektrivõrgus talitletatavatel seadmetel ühendatakse releekaitse väljundid Mitop'ile ehk mähisele, mis käivitab võimsuslülitit väljalülitamiseks lülitismehhanismi. Antud katses ühendatakse Mitop'i asemel releekaitse klemmidele ostsiloskoobiga ühendatud diferentsiaalproovik, mille abil kuvatakse ostsiloskoobi ekraanile pinge graafik releekaitse rakendamise hetkel.

Töö vahendid

1. Keskpinge jaotusseade Merlin Gerin RM6 lülitushoovaga
2. Krokodillühendustega kõrgepingekaabel ja maandused
3. Ostsilloskoop
4. Reguleeritav vahelduvvoolu allikas
5. Reostaat
6. Vooluproovik
7. Diferentsiaalproovik
8. Tabalukk
9. Hoiatussilt "Mitte lülitada. Inimesed töötavad"

Töö käik

1. Tutvuda käesoleva laboratoorse töö selgitusega.
2. Tutvuda jaotusseadme Merlin Gerin RM6 ehitusega.
3. Fikseerida jaotusseadme tehnilised parameetrid.
4. Mõelda välja lülitamiste stsenaarium, mida on võimalik läbi viia käsitletava jaotusseadmega. Teostada lülitamised ning blokeerida tagasilülitamise võimalused.
5. Anda hinnang jaotusseadme seisukorrale lähtudes järgmistest punktidest:
 - Viia läbi proovilülitamised lülitusmehhanismi hindamiseks. Oluline on kontrollida, et kõiki lüliteid on võimalik lülitada avatud ja suletud asendisse. Üheaegselt lülitustoimingu teostamisega tuleb jälgida jaotusseadme esipaneelil asuvat asendinäiturit, et veenduda asendinäituri töökorras ja lülitamiste õnnestumises.
 - Teostada kolm katset kontrollimaks jaotusseadme vastupidavust suurimale lubatavale kestevpingele. Iga katse ajal pingestada erinev faas ning pingestamata faasid maandada. Katsepinget rakendada 1 min jooksul.
 - Kontrollida pingendiakaatorite valgusdiodide ja mõõtepesade töökorda üheaegselt jaotusseadme pingestamisega. Teostada seitse katset, mille käigus fikseeritakse rakendatava pinge suurus, mõõtepesadest mõõdetud minimaalne ja maksimaalne pinge väärtus ning efektiivväärtus. Salvestada kaks ostsilloskoobi väljavõtet- üks katse alguses ning teine katse lõpus.
 - Releekaitse rakendamiseks teostada katse kaheksal erineval seadeväärtusel. Rakendada seadeväärtusest 1,5 korda suuremat voolu ning fikseerida releekaitse rakendumise aeg. Teise katsena uurida viidet releekaitse rakendumisel. Määrata seadeväärtuseks 8 A ning teostada seitse katset, kus rakendatava voolu suurus on 1,4; 1,5; 2; 4; 6; 8 ja 10 korda suuremad seadeväärtusest. Fikseerida releekaitse rakendumise viide ning jäädvustada ostsilloskoobi väljavõtte vabalt valitud testil.

Laboratoorse töö aruanne

Koostada laboratoorse töö aruanne, mis sisaldab selgitusi järgmistele punktidele ning vastuseid järgnevatele küsimustele:

1. Lülitamised keskpinge jaotusseadmega:

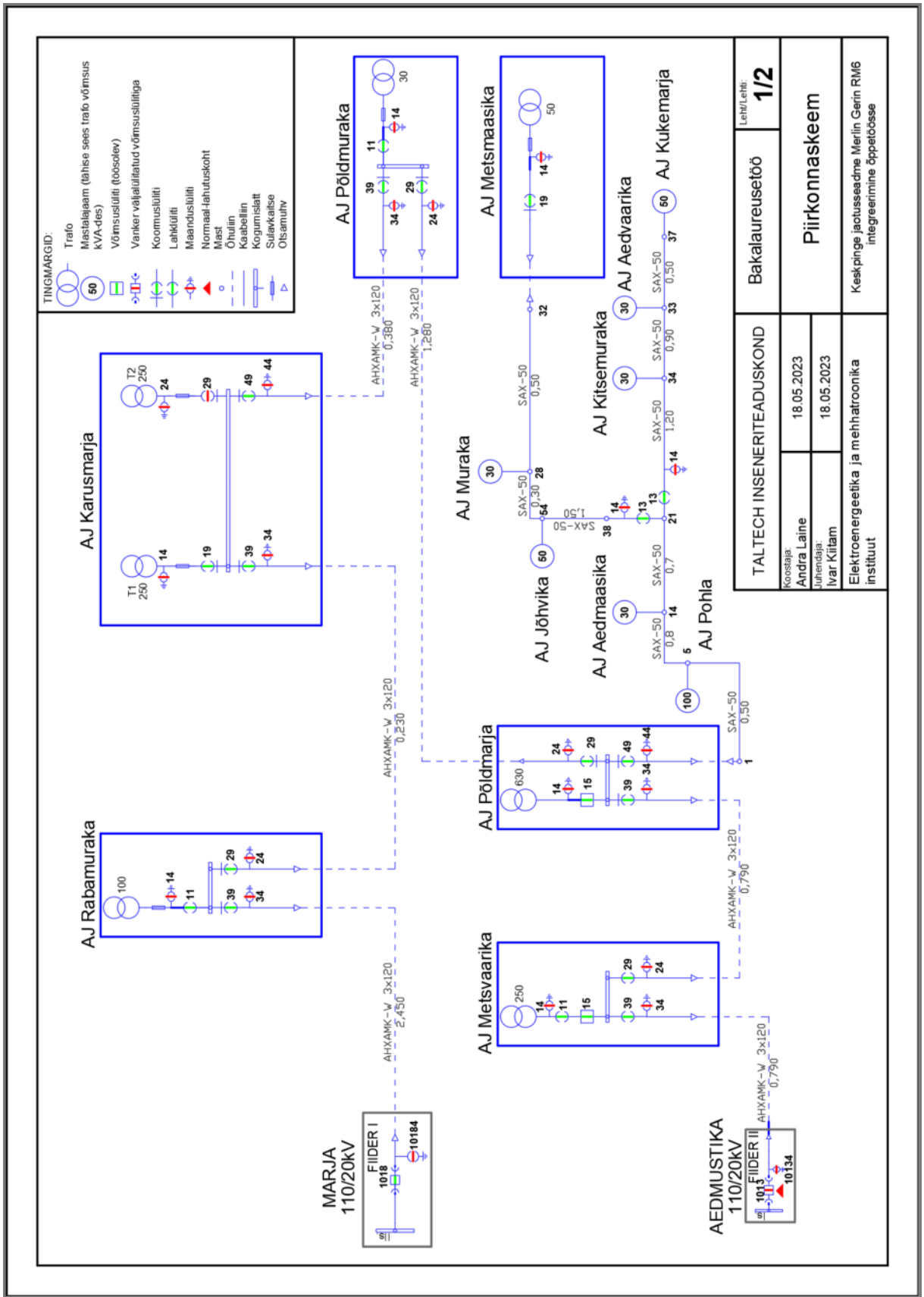
- Millised on käsitletud jaotusseadme kasutamise eelised ja puudused?
- Milliseid erinevat tüüpi jaotusseadmeid on veel kasutusel ning kuidas need erinevad disaini, hinna ja funktsionaalsuse poolest?
- Millistest ohutusnõuetest peab kinni pidama operatiivlülitamiste läbi viimisel?
- Esitada tabelina käsitletava jaotusseadme tehnilised parameetrid.
- Esitada käsitletava jaotusseadme skeem.
- Milline on laboris katsetatud jaotusseadme seisukord tuginedes teostatud katsetele? Analüüsida kõiki teostatud katseid, mõõtetulemusi ning ostsilloskoobi väljavõtteid. Koostada releekaitse rakendumise karakteristikut iseloomustav kõver, mis illustreerib seadeväärtuse kordsuse mõju releekaitse rakendumise viitele.
- Tabelis 1 on toodud lülitamiste kava põhi. Koostada skeemi alusel lülituskavad järgmistele stsenaariumitele:
 1. Töö teostamise eesmärk: AJ Põldmarja jaotusseadme vahetamine
 2. Töö teostamise eesmärk: AJ Karusmarja trafo T1 vahetamine

Lülituskavad koostada lähtudes joonisest 4 ja joonisest 5. Koostatud lülituskavad esitada tabelina, kusjuures kasutada võib järgnevaid lühendeid: alajaam- AJ, koormuslüli- KOL, võimsuslüli- VL, lahklüli- LL, maanduslüli- ML, mast- M, kantav maandus- KM, mpk- madalpinge kaitselüli, sk- sulavkaitse.

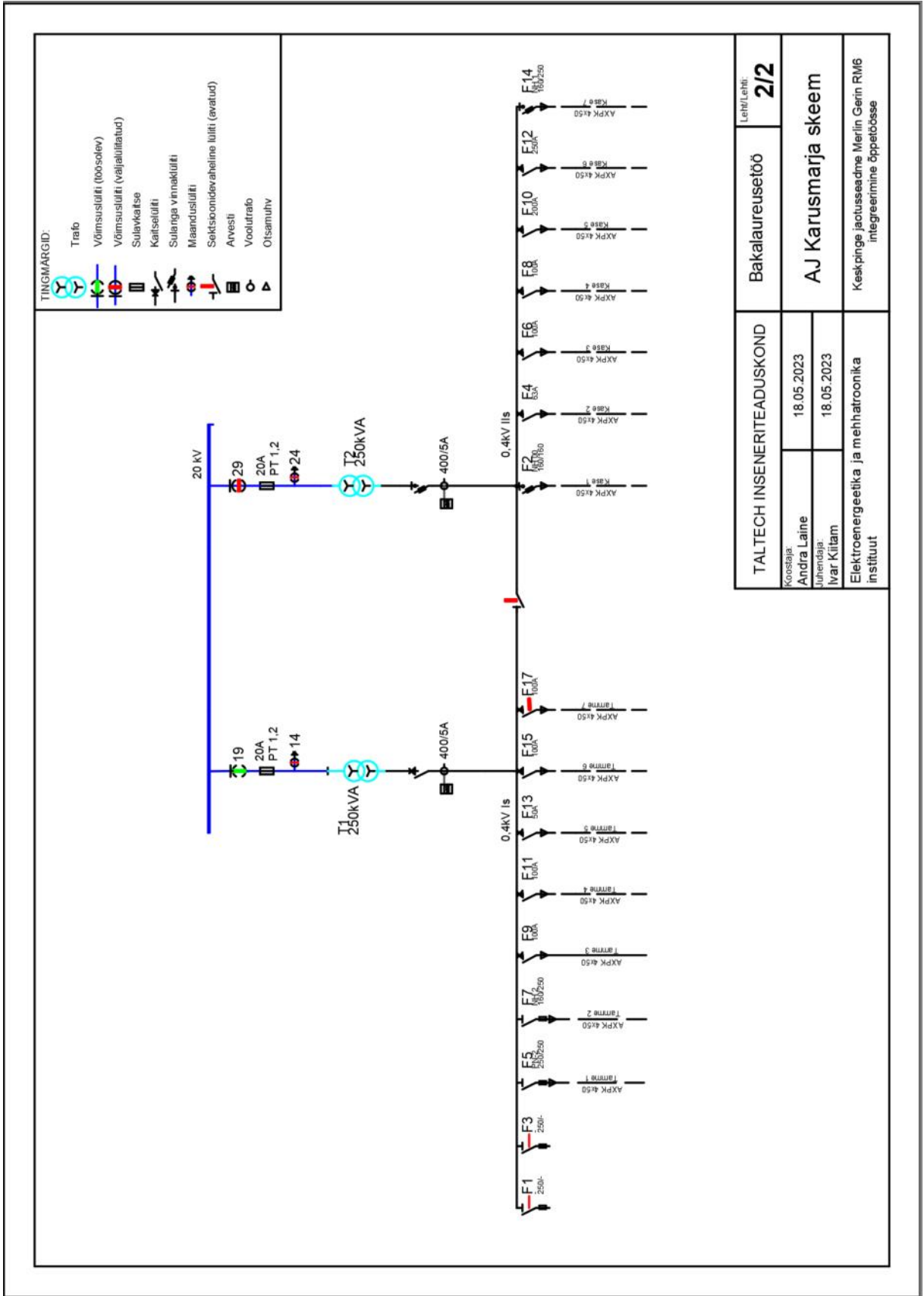
Põhjendada lülitustoimingute teostamise vajadust ning läbi viimise järjekorda.

Tabel 1. Lülitamiste kava

LÜLITAMISTE KAVA				
Eesmärk:				
Toimingu nr.	Alajaam	Seade	Operatiivtunnus	Toiming



Joonis 4. Piirkonnameem



TALTECH INSENERITEADUSKOND		Bakalaureusetöö	Leht/lehti 2/2
Koostaja: Andra Laine	18.05.2023	AJ Karumarja skeem	
Juhendaja: Ivar Kiltam	18.05.2023		
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Keskpinge jaotusseadme Merlin Gerin RM6 integreerimine õppebasse	

Joonis 5. AJ Karumarja skeem

2. Keskpinge jaotusseadme valimine:

Valida välja keskpinge jaotusseadme mudel ning jaotlaga ühendatav keskpinge kaabli mark 20/0,4 kV alajaama lähtudes etteantud parameetritest. Algandmed valida tabelist 2 matrikli viimase numbri põhjal. Trafo andmed on leitavad tabelitest 3 ja 4. Põhjendada, millistest parameetritest lähtudes jaotusseade ja kaabel valitakse ja miks.

Tabel 2. Algandmed

Matrikli viimane number	Süsteemi tugevus (MVA)	Toitva võrgu pinge (kV)	Keskpinge kaabli pikkus (km)	Koormus (kVA)
0	440	110	3,5	300
1	470	115	5,4	620
2	410	108	4,8	790
3	480	117	3,9	970
4	450	113	4,2	740
5	490	116	5,9	310
6	430	109	3,7	760
7	460	120	4,4	590
8	420	118	5,2	290
9	500	114	4,3	980

Tabel 3. 20/0,4 kV trafo andmed

Trafo võimsus (kVA)	Tühijooksukadu (W)	Lühiskadu (W)	Tühijooksuvool protsentides nimivoolust (%)	Lühispinge protsentides nimivoolust (%)
315	600	4500	0,8	4,5
630	890	7200	0,7	5,0
800	1200	8500	0,5	5,5
1000	1450	10200	0,5	5,5

Tabel 4. 110/20 kV trafo andmed

Trafo võimsus (MVA)	Lühiskadu (kW)	Tühijooksuvool protsentides nimivoolust (%)
20	51	10

LISA 2

**TAL
TECH**

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

KESKPIINGE JAOTUSSEADE MERLIN GERIN RM6

LABORATOORSE TÖÖ ARUANNE ÕPPEAINES AEK0250 ALAJAAMAD

Üliõpilane:

Üliõpilaskood:

Juhendaja:

Tallinn 2023

76

SISSEJUHATUS

Vaadeldavas praktikumis oli käsitletavaks katseseadmeks gaasisolatsiooniga sisejaotla Merlin Gerin RM6. Laboratoorse töö sooritamisel tutvuti lähemalt jaotla ehitusega, teostati lülitamiste imiteerimine ja seadme seisukorra hindamine. Selleks sooritati neli katset. Esmalt viidi läbi proovilülitamised kõikide lülititega, et veenduda jaotusseadme lülitusmehhanismi töökorras. Lülitamiste teostamisel pöörati tähelepanu asendinäituri olekule kontrollimaks, et asendinäitur muudab lülitamisel asendit ning vastab tegelikule lüliti asendile. Käsitletaval seadmel on eemaldatud tagumine korpus ning seega oli võimalik kontrollida lüliti asendit ka visuaalsel vaatlusel. Lisaks veenduti jaotusseadme võimes talitleda suurimal lubataval kestevpingel ning hinnati pingeindikaatorite töökorda. Samuti teostati katsed, mille põhjal on võimalik testida releekaitse õigeaegset rakendumist.

1 KESKPINGE JAOTUSSEADMED

Käesolev peatükk sisaldab vastuseid laboratoorse töö juhendis esitatud küsimustele. Alapeatükk 1.1 kirjeldab erinevaid jaotusseadmete tüüpe ning kehtivaid ohutusnõudeid lülitamisel. Alapeatükis 1.2 on esitatud põhilised andmed käsitletava jaotusseadme kohta ning antakse hinnang seadme seisukorrale.

1.1 Jaotusseadmete tüübid ning ohutusnõuded lülitamistel

Laboris käsitleti gaasisolatsiooniga sisejaotlat, kus isolatsioonikeskkonnaks on SF₆ gaas. Sellises jaotusseadmes paiknevad elektrilised kontaktid ja teised pingestatud osad rõhu all oleva SF₆ -ga täidetud suletud mahutis. Selline lahendus ei vaja suletud mahuti tõttu palju hooldust. Lisaks on SF₆ võrreldes õhuga suurema elektrilise tugevusega ning jaotusseade on kompaktsem. SF₆ gaasil on küll head kaarekustutusomadused, kuid tegu on kasvuhoonegaasiga ning seega hakatakse tulevikus eelistama SF₆ vabasid seadmeid kasvuhoonegaaside heitekoguse vähendamiseks ja kliimaneutraalsuse saavutamiseks. Lisaks on SF₆ gaasiga jaotlad kallid. Sisejaotla puhul on eeliseks fakt, et jaotusseade on kaitstud ilmastiku- ja keskkonnaolude eest nagu tuul ja saaste. Võrreldes välisjaotlaga tagab maandatud korpus suurema ohutuse jaotla juures töötavale inimesele. Lisaks on sisejaotla ruumivajadus madalam võrreldes välisjaotlaga. Kaitse ilmastikuolude eest tähendab ka suuremat töökindlust ja madalamaid hoolduskulusid. Siiski on selline lahendus võrreldes välisjaotlaga oluliselt kallim.

Lisaks gaasisolatsiooniga jaotusseadmetele ja sisejaotlatele on kasutusel veel erinevaid tüüpi jaotusseadmeid. Näiteks välisjaotla all mõistetakse jaotusseadet, mis on mõeldud paigaldamiseks välistingimustesse, kus seade puutub kokku raskete ilmastikuolude ja saastega. Tavaliselt on välisjaotlad õhkisolatsiooniga ja kasutusel kõrgemal pingel talitlevates alajaamades. Isolatsioon peab olema kahe juhtiva osa vahel piisav, mis tähendab seda, et kõrgemal pingel on ettenähtud lülitite ja seadete vaheline kaugus nii suur, et seadmeid ei ole otstarbekas paigaldada siseruumi. Lisaks saab jaotusseadmeid klassifitseerida kasutatava isolatsiooni põhjal. Õhkisolatsiooniga jaotusseadme puhul on isolatsiooniks õhk. Sellist tüüpi jaotusseadme eeliseks on odavus ja hooldustööde teostamise lihtsus. Õhkisolatsiooni puuduseks on õhu madal elektriline tugevus, mistõttu peab kasutama suuremaid seadmeid. Õhkisolatsiooniga jaotusseadmeid kasutatakse kõrgema pingega alajaamades. Lisaks eristatakse mootoriga varustatud või käsitsi juhitava ajamiga. Laialdaselt on levinud just käsiajamiga lülitid, kus lülitamiseks vajaminevad toimingud tuleb läbi viia alajaamas. Lülitamiste läbiviimise võimaluseks on

ka kaugjuhtimine ehk lülitamisi teostab distantsilt võrgudispetšer. Sellisel juhul asub ajam maapinna lähedal asuvas kabis ning ajam on ühendatud lülitiga juhtvarda abil.

Lülitustoimingute teostamisel on oluline kinni pidada ohutusnõuetest. Lülitamisi teostav operaator peab kandma nõuetele vastavat kaitseriietust, kiivrit ning isoleerkindaid. Lisaks on oluline on jälgida, et läbi viidav lülitamine oleks ohutu töötavale inimesele, jaotlale ning teistele võrguseadmetele. Näiteks maandatud seadme pingestamine või pingestatud seadme maandamine põhjustab jäiga maalühise ja kolmefaasilise lühise, mille tagajärjel tekivad elektrikaar ohustab inimest ja kahjustab jäädavalt seadet. Pärast õnnestunud lülitustoimingu sooritamist on kohustuslik lukustada VL-i, KOL-i, LL-i ja ML-i ajam mehaanilise lukuga. Selline ohutusmeede takistab eksliku lülitamise, et kaitsta võrgus töötavaid inimesi ning elektrivõrgu seadmeid. Lisaks mehaanilisele lukule on ohutuse tagamiseks kohustuslik paigaldada lülitusseadme ajamile hoiatussilt tekstiga „Mitte lülitada. Inimesed töötavad“ .

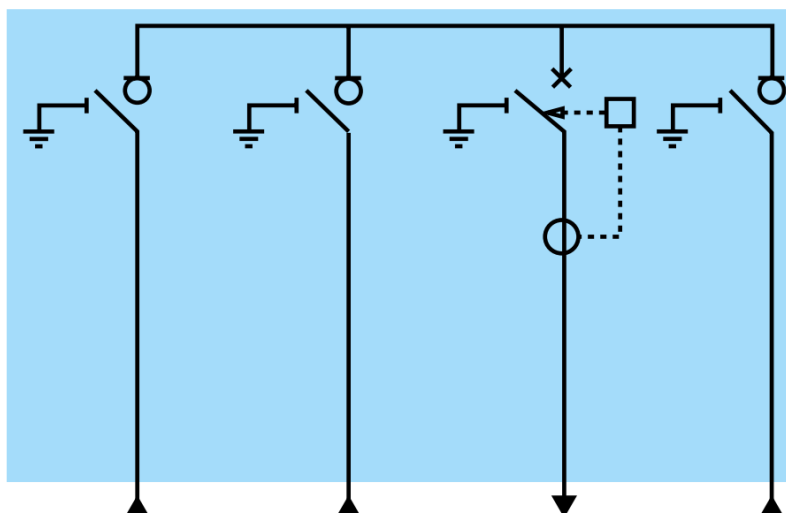
1.2 Keskpinge jaotusseade Merlin Gerin RM6

Keskpinge jaotusseadme Merlin Gerin RM6 tehnilised parameetrid on leitavad jaotla esipaneelil asuvalt nimiaandmete paneelilt. Tabelis 1.1 on esitatud praktikumi sooritamisel kirja pandud jaotla andmed.

Tabel 1.1 Jaotusseadme Merlin Gerin RM6 tehnilised parameetrid

Suurim lubatav kestevpinge	24 kV
Impulsspinge	125 kV
Lühisvoolu taluvus	16 kA 1s
Löökvool	40 kA
Võimsuslülitite koormusvool	200 A
Koormuslülitite koormusvool	400 A
SF ₆ kogus	2 kg
SF ₆ rõhk	20 kPa

Käsitletavas jaotusseadmes on neli kommutatsiooniseadet- kolm koormuslülitit ja võimsuslülitit. Joonisel 1.2 on toodud jaotla skeem, kus vasakult esimene, teine ja neljas haru illustreerivad koormuslülititega ahelaid, mis võimaldavad ühendatavate kaablite pingestamist või toiteahelast eraldamist. Kolmas haru iseloomustab releekaitsega varustatud võimsuslülitit, kusjuures lülitit ühendatakse trafoga, et võimaldada trafo kaitsmist. Kõiki ahelaid on võimalik maandada eraldiseisvate maanduslülitite kaudu.



Joonis 1.2 Jaotusseadme Merlin Gerin RM6 skeem

Laboratoorse töö käigus teostati neli katset jaotusseadme seisukorra hindamiseks. Etteantud punktide põhjal katse läbi viimisel selgus, et jaotusseadme lülitusmehhanismid on töökorras ehk kõiki lüliteid on võimalik lülitada sisse ja välja. Samuti kontrolliti asendinäitureid ning veenduti, et asendinäituri asend muutub lülitustoimingut teostades ning kuvatud asend vastab lüliti tegelikule asendile. Teiseks katseks oli jaotusseadme pingestamine suurimal lubataval kestevpingel. Teostati kolm katset, kusjuures igal katset pingestati erinevat faasi. Faasi pingestamisel veenduti, et pingeindikaatori vastava faasi valgusdiodid põleks kaabli pingestatusse visuaalseks kontrollimiseks. Katse tulemus oli positiivne ehk seade on võimeline talitlema ettenähtud pingel ning kõik pingeindikaatorid on töökorras. Viimaseks katseks oli releekaitse rakendumise kontrollimine.

Kuigi jaotusseadme seisukord on teostatud katsete põhjal hea, ei tohi siiski seadet paigaldada elektrivõrku, sest seadmest on eemaldatud SF₆ gaas ning ilma nõuetekohase isolatsioonikeskkonnata jaotla talitus ei ole ohutu. Lisaks ei suuda antud seade pidada vastu nt liigpingetele.

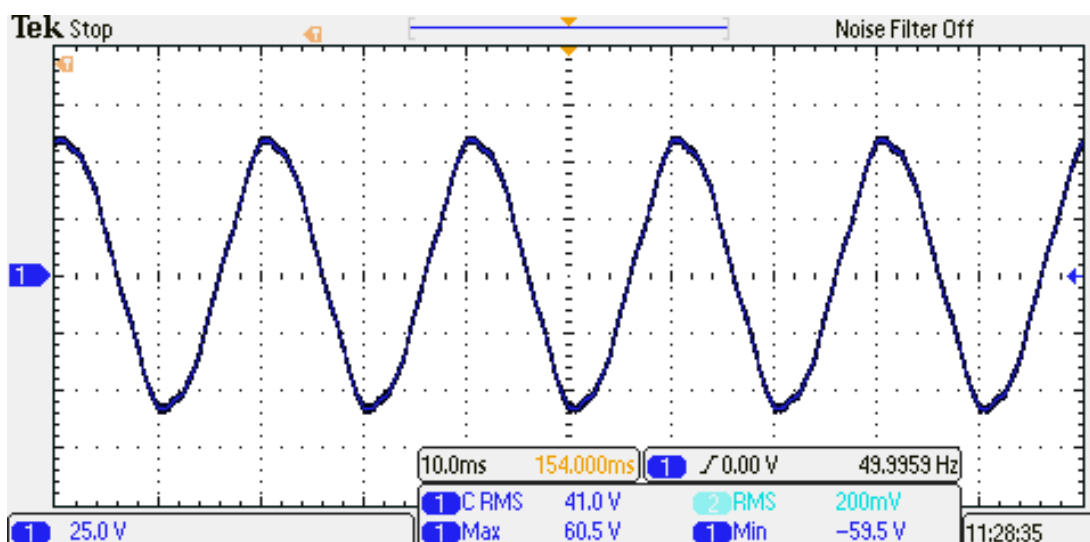
1.2 Käsitletava jaotusseadme seisukord

Käsitletava jaotusseadme üldine seisukord on hea. Lülitite proovilülitamisel selgus, et kõiki lüliteid on võimalik lülitada avatud ja suletud asendisse. Üheaegselt lülitamisliigutuse teostamisega jälgiti esipaneelil asuvat asendinäiturit ning veenduti, et asendinäituri asend näitab lüliti tegelikku olekut. Seadme testimisel lubatud suurimal kestevpingel tõdeti, et jaotusseade talub ettenähtud pinget, mis viitab lattide ja läbiviikude heale seisukorrale. Pingeindikaatori test tõestas, et ka pingeindikaatorid on seadmel töökorras. Faaside pingestamisel selgus, et valgusdiodid hakkab aeglaselt

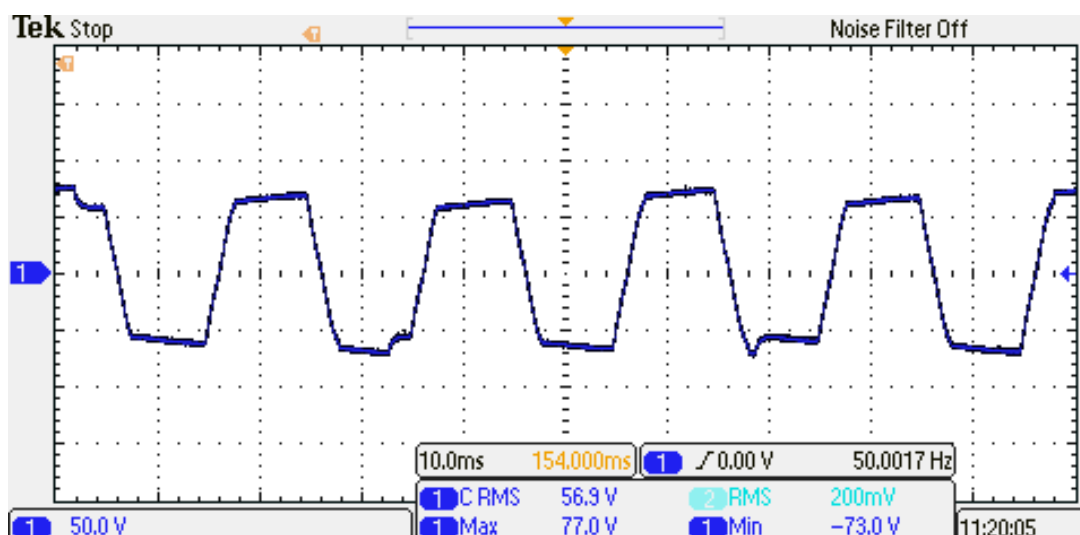
vilkuma alates 5 kV pingest, kusjuures pinge kasvades kiireneb valgusdiodi vilkumine. Valgusdiod jääb konstantselt põlema, kui rakendatavaks pingeks on vähemalt 10 kV. Katse tulemusena selgus, et kõik pingeindikaatorid on töökorras. Samuti kontrolliti pingeindikaatorite mõõtepesasid, kusjuures tabelis 1.2 on toodud mõõtetulemused, kust selgub, et 6 kV ja kõrgema pinge korral mõõtepesast fikseeritud pinge maksimum ja miinimum väärtused märkimisväärselt ei suurene. Siiski kasvab pinget tõstes pinge efektiivväärtus. Joonisel 1.3 ja 1.4 on toodud ostsilloskoobi väljavõtted, kust selgub, et 4,87 kV pinge korral on pinge siinuseline, kuid suurema pinge korral on siinuse tipud maha lõigatud. See tähendab seda, et pingeastmeni, mil valgusdiod ei vilgu, on pinge siinuseline ning pinge korral, mida on võimalik visuaalse vaatluse teel pingeindikaatoritest tuvastada, on siinuse kuju muutunud. Seega on pingeindikaatori mõõtepesadest mõõdetava pinge väärtus piiratud.

Tabel 1.2 Pingeindikaatori seisukorra hindamiseks teostatud mõõtmiste tulemused

Rakendatav pinge U (kV)	Mõõdetud minimaalne pinge U_{min} (V)	Mõõdetud maksimaalne pinge U_{max} (V)	Mõõdetud pinge efektiivväärtus U_{ef} (V)
1,9	-22,3	23,3	14,8
4,9	-59,5	60,5	41,0
6,7	-72,5	72,5	50,8
8,1	-72,5	72,5	52,9
10,2	-73,5	75,5	57,5
12,0	-73,0	77,0	56,9
13,8	-73,5	76,5	60,3



Joonis 1.3 Pingeindikaatorilt mõõdetud pinge rakendataval pingel 4,87 kV



Joonis 1.4 Pingeindikaatorilt mõõdetud pingel rakendataval pingel 11,98 kV (vastab faasidevahelisele pingele 20 kV)

Releekaitse rakendumise kontrollimiseks teostati kaheksa katset, et veenduda seadme töökorras erinevatel seadeväärtustel. Tabelis 1.3 on esitatud katse tulemused, kust selgub, et releekaitse rakendub igal seadeväärtuse korral ligikaudu 30 sekundi jooksul.

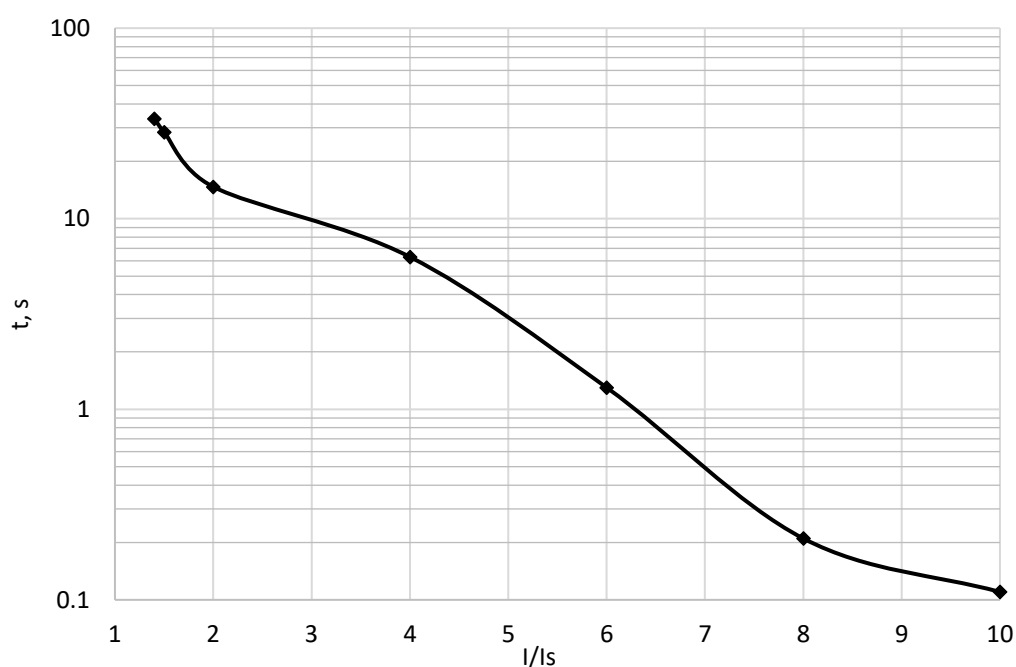
Tabel 1.3 Releekaitse rakendumine 1,5 kordse seadeväärtuse korral

Seadeväärtus I_s (A)	Rakendatav vool I (A)	Releekaitse rakendumisaeg t (s)
8	12,0	28,5
15	22,5	25,2
22	33,0	32,1
36	54,0	33,3
46	69,0	31,4
56	84,0	31,4
68	102,0	29,9
80	120,0	30,2

Releekaitse rakendumise viite uurimiseks teostati katse, kus seadeväärtuseks määrati 8 A ning seejärel rakendati mitmekordset seadeväärtuse voolu suurust, et teha kindlaks viite sõltuvus liigvoolu kordsusest. Selleks teostati seitse katset, kusjuures mõõtetulemused esitatakse tabelis 1.4. Kogutud mõõtetandmete põhjal loodi releekaitse rakendumise karakteristikut iseloomustav kõver, mis on toodud joonisel 1.5. Teostatud katsest selgub, et väiksema liigvoolu korduse korral rakendub lüliti pikema viite järel, kuid juba kuuekordse seadeväärtuse ületamisel reageerib kaitserelle sekunditega.

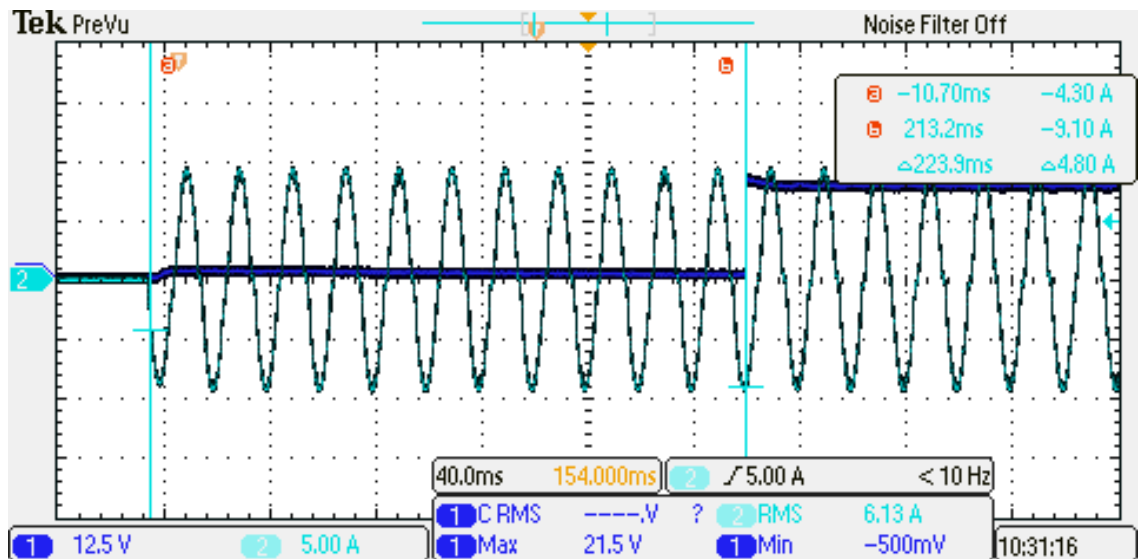
Tabel 1.4 Viite mõõtmine releekaitse rakendumisel, kui seadeväärtus on 8 A

Rakendatav vool I [A]	I/I_s	Viide t [s]	Mõõteviis
11,2	1,4	33,5	Stopper
12,0	1,5	28,5	Stopper
16,0	2	14,7	Stopper
32,0	4	6,3	Stopper
48,0	6	1,3	Ostsilloskoop
64,0	8	0,21	Ostsilloskoop
80,0	10	0,11	Ostsilloskoop



Joonis 1.5 Releekaitse rakendumise karakteristik

Joonisel 1.6 on toodud ostsilloskoobi väljavõtte releekaitse rakendumise hetkel. Vaadeldav joonis iseloomustab katset, kus rakendatav vool on kaheksa korda suurem seadeväärtusest. Joonis illustreerib releekaitse rakendumiseks antava signaali edastamist ning viite lõpus lüliti rakendumist. Väljavõttelt on võimalik tuvastada rakendatava voolu suurus ning releekaitse reageerimisaeg, kusjuures vooluproovik mõõdab ainult osa kogu voolutrafost läbivast voolust.



Joonis 1.6 Ostsilloskoobi väljavõte relekaitse rakendamisest, kui rakendatav vool on võrdne kaheksakordse seadeväärtusega

Kokkuvõtvalt võib öelda, et jaotusseadme seisukord on hea ning kõik seadme testitud komponendid töötavad ettenähtud põhimõtete järgi. Siiski ei tohiks antud seadet kasutada elektrivõrgus, sest seadmest on välja lastud SF_6 gaas. Ilma isolatsioonikeskkonnata seade on ohtlik inimestele, jaotlale ning teistele võrguseadmetele.

2 LÜLITAMISED KESKPINGE JAOTUSSEADMEGA

Järgnevalt esitatakse töö teostamise eesmärgi põhjal koostatud lülitamiste kavad ning selgitatakse põhimõtteid, millest lähtutakse lülitamiste kava koostamisel. Tabelis 2.1 on tood lülitamiste kava, mida järgides on võimalik teostada lülitamised alajaamas Põldmarja jaotusseadme vahetamiseks. Tabelis 2.2 on lülitamiste kava alajaamas Karusmarja trafo T1 vahetamise võimaldamiseks.

Tabel 2.1 Lülitamiste kava AJ Põldmarjas jaotusseadme vahetamiseks

LÜLITAMISTE KAVA				
Eesmärk: AJ Põldmarja jaotusseadme vahetamine				
Toimingu nr.	Alajaam	Seade	Operatiivtunnus	Toiming
1	Aedmustika 110/20	VL	1013:Aedmustika	SISSE
2	AJ Põldmuraka	KOL	29:AJ Põldmuraka	VÄLJA
3	AJ Metsvaarika	LL	29:AJ Metsvaarika	VÄLJA
4	AJ Metsvaarika	ML	24:AJ Metsvaarika	SISSE
5	AJ Põldmuraka	ML	24:AJ Põldmuraka	SISSE
6	Marja: Fiider I f	maandus	KM M1	ÜHENDADA
7				Töö sooritamisluba
8				Töö lõpetamise teade
9	Marja: Fiider I f	maandus	KM M1	KATKESTADA
10	AJ Põldmuraka	ML	24:AJ Põldmuraka	VÄLJA
11	AJ Metsvaarika	ML	24:AJ Metsvaarika	VÄLJA
12	AJ Metsvaarika	LL	29:AJ Metsvaarika	SISSE
13	AJ Põldmuraka	KOL	29:AJ Põldmuraka	SISSE
14	Aedmustika 110/20	VL	1013:Aedmustika	VÄLJA

Selleks, et töö teostamine mõjutaks võimalikult vähe kliente lülitatakse esmalt sisse alajaamas Aedmustika võimsuslülitit, et tagada katkematu toide alajaama Metsvaarika taha ühendatud tarbijatele. Seejärel tehakse pingetuks alajaama Põldmarja sisenevad kaablid alajaamadest Põldmuraka ning Metsvaarika. Alajaam Põldmarja on nüüd pingetu ning seega on ohutu alajaama sisenevad kaablid maandada. Kaablite maandamine toimub alajaamades Metsvaarika ja Põldmuraka. Alajaamas Metsvaarika ei ole

lülitamiste teostamine vajalik, sest antud alajaam saab toite Põldmarja alajaamast. Vahetult enne Põldmarja alajaama paigaldatakse mastis M1 kantav maandus, et tagada turvaline tööala töid teostavale operaatorile. Nüüd on teostatud kõik lülitamised ohutuks tööde läbiviimiseks. Jaotusseadme töösse viimine toimub eelnevalt kirjeldatud lülitustoimingute vastupidises järjekorras teostamisel.

Tabel 2.2 Lülitamiste kava AJ Karusmarja trafo T1 vahetamiseks

LÜLITAMISTE KAVA				
Eesmärk: AJ Karusmarja trafo T1 vahetamine				
Toimingu nr.	Alajaam	Seade	Operatiivtunnus	Toiming
1	AJ Karusmarja	Sulariga vinnaklüliti	F5, F7	VÄLJA
2	AJ Karusmarja	mpk	F9, F11, F13, F15	VÄLJA
3	AJ Karusmarja	mpk	Trafo T1 0,4 kV	VÄLJA
4	AJ Karusmarja	Sektsioonidevaheline lüliti		SISSE
5	AJ Karusmarja	Sulariga vinnaklüliti	F5, F7	SISSE
6	AJ Karusmarja	mpk	F9, F11, F13, F15	SISSE
7	AJ Karusmarja	KOL	19: AJ Karusmarja	VÄLJA
8	AJ Karusmarja	Sularihoidik	sk: AJ Karusmarja T1	VÄLJA
9	AJ Karusmarja	ML	14:AJ Karusmarja	SISSE
10				Töö sooritamisluba
11				Töö lõpetamise teade
12	AJ Karusmarja	ML	14:AJ Karusmarja	VÄLJA
13	AJ Karusmarja	Sularihoidik	sk: AJ Karusmarja T1	SISSE
14	AJ Karusmarja	KOL	19: AJ Karusmarja	SISSE
15	AJ Karusmarja	mpk	F9, F11, F13, F15	VÄLJA
16	AJ Karusmarja	Sulariga vinnaklüliti	F5, F7	VÄLJA
17	AJ Karusmarja	Sektsioonidevaheline lüliti		VÄLJA
18	AJ Karusmarja	mpk	Trafo T1 0,4 kV	SISSE
19	AJ Karusmarja	mpk	F9, F11, F13, F15	SISSE
20	AJ Karusmarja	Sulariga vinnaklüliti	F5, F7	SISSE

Trafo T1 välja vahetamiseks on oluline teha trafo pingetuks. Lülitustoimingute teostamist alustatakse koormuse eraldamisega ahelast. Madalpinge tarbijate elektrivarustus katkestatakse igal fiidril eraldi vastavalt sulariga vinnaklüliti või kaitselüliti abil. Nii tagatakse turvalisus järgmiste lülitite lülitamiseks, sest koormuse välja lülitamine fiidri kaupa on ohutum koormuse jagunemise tõttu. Seejärel võib välja lülitada 0,4 kV kaitselüliti, et tagada lisakaitse trafo ja tarbijate eraldamiseks. Sektsioonidevahelise lüliti sisse lülitamisel on võimalik katta tarbimist ka trafo T2 abil. Nüüd võib lülitada koormuse taas ahelasse, et elektrikatkestus tarbijatele oleks võimalikult lühike. Selleks, et trafo T1 oleks pingetu tuleb katkestada trafot toitev ahel koormuslülitiga. Seejärel on võimalik võtta välja sulavkaitse. Maanduslüliti sisse lülitamine tagab turvalise tööala töid teostavale operaatorile. Trafo T1 sisselülitamine toimub vastupidises järjekorras.

3 JAOTUSSEADME JA ÜHENDATAVA KAABLI VALIMINE

Jaotusseadme ja ühendatava kaabli valimine toimub lähtudes etteantud algandmetest. Variandi 0 algandmed on toodud tabelis 3.1. Koormusest lähtudes valiti alajaama trafo, mille andmed on toodud tabelis 3.2.

Tabel 3.1 Algandmed

Matrikli viimane number	Süsteemi tugevus (MVA)	Keskpinge kaabli pikkus (km)	Koormus (kVA)
0	440	3,5	300

Tabel 3.2 Trafo andmed

Trafo võimsus (kVA)	Tühijooksukadu (W)	Lühiskadu (W)	Tühijooksuvool protsentides nimivoolust (%)	Lühispinge protsentides nimivoolust (%)
315	600	4500	0,8	4,5

Tabel 4. 110/20 kV trafo andmed

Trafo võimsus (MVA)	Lühiskadu (kW)	Tühijooksuvool protsentides nimivoolust (%)
20	51	10

Jaotusseadmete nimiandmetena esitatakse jaotla nimivool. Keskpinge jaotusseade asub alajaamas enne trafot ning seega on oluline arvestada nimivoolu arvutamisel trafo kadudega. Seega teostatakse esmalt arvutused trafo kadude leidmiseks, kusjuures arvutused toimuvad valemitega 3.1- 3.4. Jaotla nimivoolu leidmiseks kasutatakse valemit 3.5.

$$R = \frac{\Delta P_l U_N^2}{S_N^2} = \frac{4500 \cdot 20^2}{315^2} = 18,14 \Omega \quad (3.1)$$

kus R — trafo aktiivtakistus,
 ΔP_l — trafo lühiskadu,
 U_N — trafo nimipinge,
 S_N — trafo nimivõimsus.

$$X = \frac{u_{l\%} U_N^2}{100 S_N} = \frac{4,5 \cdot 20^2}{100 \cdot 315} = 57,14 \Omega \quad (3.2)$$

kus X — trafo reaktiivtakistus,
 $u_{l\%}$ — lühispinge protsentides nimipingest.

$$\Delta P_T = \Delta P_{Cu} + \Delta P_t = \frac{S_N}{U_N^2} R + \Delta P_t = \frac{315}{20^2} \cdot 18,14 + 600 = 0,6 \text{ kW} \quad (3.3)$$

kus ΔP_T — trafo summaarne aktiivvõimsuskadu,
 ΔP_{Cu} — trafo vaseskadu,
 ΔP_t — trafo tühijooksu aktiivvõimsuskadu.

$$\Delta Q_T = \Delta Q_X + \Delta Q_t = \frac{S_N}{U_N^2} X + \frac{I_t \% S_N}{100} = \frac{315}{20^2} \cdot 57,14 + \frac{0,8 \cdot 315}{100} = 2,52 \text{ kvar} \quad (3.4)$$

kus ΔQ_T — trafo summaarne reaktiivvõimsuskadu,
 ΔQ_X — trafo puistekadu,
 ΔQ_t — trafo tühijooksu reaktiivvõimsuskadu,
 $I_t \%$ — trafo tühijooksuvool protsentides nimivoolest.

$$I = \frac{S + \Delta S_{T \text{ kaod}}}{\sqrt{3}U} = \frac{300 + \sqrt{0,6^2 + 2,52^2}}{\sqrt{3} \cdot 20} = 8,74 \text{ A} \quad (3.5)$$

kus I — vool,
 S — koormuse näivvõimsus,
 U — võrgu nimipinge.

Lisaks koormusvoolule peab jaotusseade vastu pidama ka lühisvoolule. Lühisvoolu väärtus on seda suurem, mida lähemal lühisekoht toiteallikale asub. Seega on antud näites suurim lühisvoolu väärtus enne trafot. Lühisvoolu arvutamiseks on oluline teada süsteemi näivtakistust enne lühisekohta. Süsteemiharu näivtakistust arvutatakse valemitega 3.6-3.8. Lisaks on oluline arvutatud takistused taandada lühisekoha pingele, kusjuures lähtutakse valemist 3.9.

$$Z_Q = c \frac{U_{nQ}^2}{S_{kQ}} = 1,1 \cdot \frac{110^2}{440} = 30,25 \Omega \quad (3.6)$$

kus Z_Q — süsteemiharu näivtakistus,
 U_{nQ} — süsteemiharu nimipinge,
 S_{kQ} — süsteemiharu lühisvõimsus.

$$X_Q = 0,995 Z_Q = 0,995 \cdot 30,25 = 30,10 \Omega \quad (3.7)$$

kus X_Q — süsteemiharu reaktiivtakistus.

$$R_Q = 0,1 X_Q = 0,1 \cdot 30,10 = 3,01 \Omega \quad (3.8)$$

kus R_Q — süsteemiharu aktiivtakistus.

$$Z' = Z \frac{U_{n2}^2}{U_{n1}^2}; \quad R' = R \frac{U_{n2}^2}{U_{n1}^2}; \quad X' = X \frac{U_{n2}^2}{U_{n1}^2}, \quad (3.9)$$

kus Z' — lühisekoha nimipingele taandatud näivtakistus,
 R' — lühisekoha nimipingele taandatud aktiivtakistus,
 X' — lühisekoha nimipingele taandatud reaktiivtakistus,
 U_{n1} — lühisekoha pingeaaste,
 U_{n2} — lühisekoha pingeaastmest erinev pingeaaste.

$$Z'_Q = 30,25 \cdot \frac{20^2}{110^2} = 1 \Omega$$

$$X'_Q = 30,10 \cdot \frac{20^2}{110^2} = 1 \Omega$$

$$R'_Q = 3,01 \cdot \frac{20^2}{110^2} = 0,1 \Omega$$

Kahemähiselise trafo 110/20 kV aktiiv- ja reaktiivtakistus arvutatakse kasutades valemit 3.10-3.13.

$$u_{kR\%} = \frac{\Delta P_l}{S_{nT}} 100\% = \frac{51}{20} \cdot 100\% = 0,3\% \quad (3.10)$$

kus $u_{kR\%}$ — trafo lühisepinge aktiivkomponent protsentides,
 S_{nT} — trafo nimivõimsus.

$$u_{kX\%} \sim u_{k\%} = 10\% \quad (3.11)$$

kus $u_{kX\%}$ — trafo lühisepinge reaktiivkomponent protsentides,
 $u_{k\%}$ — trafo lühisepinge protsentides.

$$R_T = \frac{u_{kR\%} U_{nT}^2}{100 S_{nT}} = \frac{0,3 \cdot 20^2}{100 \cdot 20} = 0,06 \Omega \quad (3.12)$$

kus R_T — trafo aktiivtakistus,
 U_{nT} — trafo lühise poolse mähise nimipinge,
 S_{nT} — trafo nimivõimsus.

$$X_T = \frac{u_{kX\%} U_{nT}^2}{100 S_{nT}} = \frac{10 \cdot 20^2}{100 \cdot 20} = 2 \Omega \quad (3.13)$$

kus X_T — trafo reaktiivtakistus.

Trafo takistusi tuleb korrigeerida parandustegurite abil. Parandustegurit arvutatakse valemiga 3.14, kusjuures korrigeeritud takistused saadakse valemiga 1.15.

$$K_T = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,006 u_{kX\%}} = 0,95 \frac{1,1}{1 + 0,006 \cdot 10} = 0,985 \quad (3.14)$$

kus K_T — trafo parandustegur,
 c_{max} — pingetegur (maksimaalse lühisvoolu arvutamisel väärtusega 1,1).
 $R_{TK} = K_T R_T$; $X_{TK} = K_T X_T$; (3.15)

kus R_{TK} — trafo korrigeeritud aktiivtakistus,
 X_{TK} — trafo korrigeeritud reaktiivtakistus.

$$R_{TK} = 0,985 \cdot 0,06 = 0,059 \Omega$$

$$X_{TK} = 0,985 \cdot 2 = 1,97 \Omega$$

Enne jaotlaga ühendatava kaabli takistuse leidmist on oluline välja valida kasutatav kaabel. Liini takistused leitakse valemitega 3.16-3.17. Kaabli valimisel lähtutakse koormusvoolust, kusjuures on tuleb arvestada võimsuskadudega liinis. Võimsuskaod liinis arvutatakse valemitega 3.18-3.19. Koormusvool kaablis arvutatakse valemiga 3.20. Järgnevalt uuritakse, kas kaabel AHXAMK-W 3X50+35 sobib paigaldamiseks vaadeldavasse võrku.

$$R_L = r \cdot l = 0,641 \cdot 3,5 = 2,24 \Omega \quad (3.16)$$

kus R_L — liini aktiivtakistus,
 r — kaabli aktiivtakistus kilomeetri kohta,
 l — liini pikkus.

$$X_L = x \cdot l = 0,12 \cdot 3,5 = 0,42 \Omega \quad (3.17)$$

kus X_L — liini induktiivtakistus,
 x — kaabli reaktiivtakistus kilomeetri kohta.

$$\Delta P_L = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R_L = \frac{(S + \Delta S_{T kaod})^2}{U^2} R_L = \frac{(300 + \sqrt{0,6^2 + 2,52^2})^2}{20^2} \cdot 2,24 = 0,51 \text{ kW} \quad (3.18)$$

kus ΔP_L — liini summaarne aktiivkadu,
 P — aktiivvõimsus liinis,
 Q — reaktiivvõimsus liinis.

$$\Delta Q_L = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} X_L = \frac{(S + \Delta S_{T kaod})^2}{U^2} X_L = \frac{(300 + \sqrt{0,6^2 + 2,52^2})^2}{20^2} \cdot 0,42 = 0,1 \text{ kvar} \quad (3.19)$$

kus ΔQ_L — liini summaarne reaktiivkadu.

$$I = \frac{S + \Delta S_{T kaod} + \Delta S_{L kaod}}{\sqrt{3}U} = \frac{300 + 2,59 + 0,52}{\sqrt{3} \cdot 20} = 8,75 \text{ A} \quad (3.20)$$

Kaabli koormusvoolu taluvus on 155 A ning seega sobib kaabel vaadeldavasse võrku. Tegelikult võiks valida ka väiksema ristlõige kaabli, kuid Eesti elektrivõrgus eelistatakse paigaldamisel kaableid, mille ristlõige on 3x50, 3x120 või 3x240 mm².

Kõik arvutute teostamiseks vajalikud takistused on leitud ning seega saab välja arvutada lühisvoolu valemiga 3.21.

$$I_k = \frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot Z} = \frac{1,1 \cdot 20}{\sqrt{3} \cdot 4,15} = 3,06 \text{ kA} \quad (3.21)$$

kus I_k — lühisvool,
 Z — süsteemi näivtakistus enne lühisekohta.

Lisaks minimaalsele ja maksimaalsele lühisvoolule on oluline kindlaks määrata löökvoolu suurus. Löökvool iseloomustab lühisvoolu suurimat hetkväärtust, mis vastab näiteks lühisele lülitamise hetkele. Löögiteguri arvutamiseks kasutatakse valemit 3.22. Löökvoolu arvutamiseks kasutatakse valemit 3.23.

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3\frac{r}{x}} = 1,02 + 0,98e^{-3\frac{2,40}{3,39}} = 1,14 \quad (3.22)$$

kus κ — löögitegur,
 r — ahela aktiivtakistus,
 x — ahela reaktiivtakistus.

$$i_m = \kappa\sqrt{2}I_k = 1,14 \cdot \sqrt{2} \cdot 3,06 = 4,93 \text{ kA} \quad (3.23)$$

kus i_m — löökvool.

Jaotusseadme valimisel lähtutakse suurimast lubatavast kestevpingest, nimivoolust, lühisvoolust ja löökvoolust. Valituks osutuks õhkisolatsiooniga keskpinge jaotusseade Schneider Electric SM6. Antud jaotusseadme tehnilised karakteristikud nagu nimivool, löökvool ja lühisvool on tunduvalt suuremad võrreldes arvatud suurustega. Seega sobib jaotusseade vaadeldavasse võrku, kusjuures on võimalik laiendada võrku ilma jaotusseadet vahetamata.

KOKKUVÕTE

Laboratoorse töö raames teostatud katsete põhjal selgus, et käsitletava seadme lülitusmehhanismid, asendinäiturid ja pingeindikaatorid on töökorras. Samuti suudab seade taluda ette nähtud suurimat lubatavat kestevpinget, kusjuures pinget rakendati igale faasile eraldi. Lisaks veenduti releekaitse töökorras ning koostati releekaitse rakendumist iseloomustav kõver. Käesolevas aruandes koostati kaks lülitamiste kava, mis võimaldavad teostad lülitamisi etteantud töö teostamiste eesmärkide täitmiseks. Lülitamiste kavade koostamisel lähtuti põhimõttest, et elektrikatkestus mõjutaks võimalikult vähe tarbijaid ning veenduti, et ei toimuks pingestatud osa maandamist või maandatud osa pingestamist. Jaotusseadme ja kaabli valimiseks teostati arvutused, mille põhjal valiti ette antud parameetriga elektrivõrku sobivaks seadmed jaotusseade Schneider Electric SM6. Jaotusseadmega ühendatavaks kaabliks valiti AHXAMK-W 3X50+35.