



INSENERITEADUSKOND
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**TOITEPINGE MÕJU ALAJAAMA
SEKUNDAARSEADMETE TOIMELE**

**THE EFFECT OF SUPPLY VOLTAGE ON SUBSTATION
SECONDARY EQUIPMENT**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Andi Ingalt

Üliõpilaskood: 192316AAVM

Juhendaja: Marko Tealane, releekaitse ja
automaatika ekspert

Tallinn 2022

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

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

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Andi Ingalt

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„TOITEPINGE MÕJU ALAJAAMA SEKUNDAARSEADMETE TOIMELE“

mille juhendaja on Marko Tealane,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

16.05.2022

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: Andi Ingalt

Lõputöö liik: Magistritöö

Töö pealkiri: „Toitepinge mõju alajaama sekundaarseadmete toimele“

Kuupäev: 16.05.2022

73 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): Marko Tealane

Töö konsultant (konsultandid):

Sisu kirjeldus:

Käesolev töö käsitleb alajaama seadmete abitoitepinge mõju seadmete tööle. Töö eesmärgiks on tuvastada, kas abiseadmete toitepinge mõjutab seadmete toimimist. Ennekõike on vaatluse all alajaama seadmete tähtsaim funktsioon: väljalülitusahela toimimine.

Töö teoreetilises osas tutvustatakse alajaama omatarbe toite vajalikkust ja iseloomu. Puudutatakse nii vahelduvpinge kui ka alalispinge osa alajaama omatarbesüsteemis. Samuti käsitletakse alajaama sekundaarseadmete lubatud toiteandmeid.

Töö praktilises osas viiakse läbi mõõtmised töös oleva alajaama omatarbesüsteemis. Seejärel viiakse läbi katsed kolme eri tüüpi kaitsereelega ja kahe väljalülitusahela vahereelega. Katsete tulemusena tuvastati seadmete toimimise iseärasused, kui seadmete toitepinge langeb.

Märksõnad: toitepinge, alajaam, sekundaarseade, releekaitse, vaherelee, abipinge

ABSTRACT

<i>Author:</i> Andi Ingalt	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> "The Effect of Supply Voltage on Substation Secondary Equipment"	
<i>Date:</i> 16.05.2022	<i>73 pages (the number of thesis pages including appendices)</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Marko Tealane	
<i>Consultant(s):</i>	
<i>Abstract:</i>	
<p>This thesis studies the effect of auxiliary voltage on the work of substation control and automation. The aim of this thesis is to identify if the quality of the supply voltage has any effect on relay operation. This paper looks primarily into the operation of the trip circuit.</p> <p>The theoretical part of this paper describes the auxiliary power supplies in a substation. Both AC and DC systems are considered. The technical data of different control and automation equipment is also described.</p> <p>In the practical part of the paper measurements are taken from a working substation. Experiments are also conducted with three different protection relays and two trip relays. The results of the experiments show how the different devices operate under reduced auxiliary voltage.</p>	
<i>Keywords:</i> auxiliary voltage, substation, relay, protection, control, automatics	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Toitepinge mõju alajaama sekundaarseadmete toimele
Lõputöö teema inglise keeles:	The Effect of Supply Voltage on Substation Secondary Equipment
Üliõpilane:	Andi Ingalt, 192316AAVM
Eriala:	Elektroenergeetika
Lõputöö liik:	Magistritöö
Lõputöö juhendaja:	Marko Tealane
Lõputöö kaasjuhendaja: (ettevõtte, amet ja kontakt)	
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	30.06.2022
Lõputöö esitamise tähtaeg:	18.05.2022

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Alajaamade tõrketa toimimiseks on tähtis alajaama sekundaarseadmete veatu töö. Planeeritavas töös uuritakse toitepinge kvaliteedi mõju alajaama sekundaarseadmetele, mis võimaldab ennetada potentsiaalseid rikkeid tulevikus. Seetõttu on teema oluline kogu Eesti energeetikasektorile. Lisaks ei ole Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis vastavat teema ka varasemalt uuritud.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on uurida toitepinge mõju erinevatele alajaama sekundaarseadmetele.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu

- 1) Missugune on abitoitepinge kvaliteet vähemalt kahes erinevas alajaamas?
- 2) Katsemetoodika ja katsestendi loomine sekundaarseadmete toimimise testimiseks toitepingemoonutustele.
- 3) Missugust mõju avaldab abitoitepinge kvaliteet sekundaarseadmete toimele? (nt. alalisvoolu maa, pinge väärtus, lisaharmonikud)

4. Lähteandmed

Kasutatakse mõõtetulemustest saadud andmeid, mis saadakse vähemalt ühes põhivõrgu ja vähemalt ühes jaotusvõrgu alajaamas mõõtes. Lisaks kasutatakse lähteandmetena seadmete käsiraamatuid ja juba koostatud teemakohast teaduskirjandust.

5. Uurimismeetodid

Uurimiseks kasutatakse füüsilisi mõõtetulemusi, katseid laboris reaalsete seadmetega ja kirjanduse analüüsi. Andmete analüüsiks kasutatakse tabelarvutusprogrammi.

6. Graafiline osa

Graafilise osa iseloom selgub töö käigus. Kui graafikuid ja jooniseid on palju, siis tõenäoliselt lähevad enamik neist lissasse.

7. Töö struktuur

- 1) Sissejuhatus
- 2) Sekundaarseadmed
 - a. Sekundaarseadmete tüübid
 - b. Sekundaarseadmete rikete mõju alajaama tööle
 - c. Sekundaarseadmete tootjapoolse kirjanduse uurimine
 - d. Toitepingete kvaliteedi mõõtmine alajaamades
- 3) Katsemetoodika
- 4) Katsed
 - a. Pinge väärtus
 - b. Alalisvoolu maa
 - c. Harmonikud
- 5) Tulemuste võrdlus ja toitepinge mõju analüüs
- 6) Kokkuvõte

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Raamatud, teadusartiklid, seadmete manuaalid. Teadusartikleid leitakse olemasolevatest andmebaasidest IEEEExplore ja ScienceDirect.

9. Lõputöö konsultandid

Puuduvad.

10. Töö etapid ja ajakava

- Kirjanduse läbitöötamine ja analüüs. (november - detsember 2021)
- Teoreetilise osa kirjutamine. (dets 2020 – jaanuar 2022)
- Mõõtmiste teostamine alajaama(de)s. (veebruar 2022)
- Katseseadmete väljavalimine ja katsekavade koostamine. (veebruar 2022)
- Katsetuste teostamine. (veebruar – märts 2022)
- Katsetulemuste kirjeldamine ning analüüs. (märts 2022)
- Järelduste kirjutamine. (märts 2022)
- Kokkuvõtte kirjutamine. (aprill 2022)
- Juhendajale esimeseks lugemiseks saatmine. (23.04.22)
- Paranduste sisseviimine.
- Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine. (11.05.22)
- Töö lõplik verisoon valmis. (18.05.22)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	10
SISSEJUHATUS	11
1. Alajaamade abitoitesüsteemid	12
1.1 Vahelduvpinge abitoitesüsteemid	14
1.2 Alalispinge abitoitesüsteemid	20
2 Alajaama sekundaarseadmed	29
2.1 Väljalülitusahel	29
2.2 Side	31
3 Katsed	32
3.1 Mõõtmised alajaamas	32
3.2 Katsemeetod	35
3.3 Katsealused seadmed	37
3.4 Katsetulemused	40
3.5 Katsetulemuste kokkuvõte	59
KOKKUVÕTE	62
SUMMARY	64
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	66
LISAD	67

EESSÕNA

Käesolev töö on koostatud Tallinna Tehnikaülikooli poolt pakutud teemal. Töö koostamisel sooritatud katseseadmed on valdavalt pärit Tallinna Tehnikaülikooli laborist. Üks katsealustest seadmetest on laenatud ka Connecto Eesti AS poolt. Alajaamas läbi viidud mõõtmised sooritati koostöös Elektrileviga.

Lõputöö koostamisel olid abiks juhendajana Tallinna Tehnikaülikooli releekaitse ja automaatika ekspert Marko Tealane. Samuti aitas töö valmimisele kaasa alajaama sekundaarosa insener Uku Salumäe.

SISSEJUHATUS

Käesolevas töös käsitletakse alajaamade omatarbesüsteemi, sekundaarseadmete toitepinget ja selle mõju sekundaarseadmete tööle. Töö teema valikul sai määravaks selle teema vähene eelnev käsitlemine teadustöodes, samuti selle temaatika tähtis roll alajaama ja seeläbi elektrivõrgu funktsioonide tagamisel.

Alajaamade sekundaarseadmete rolliks alajaama töös on võimsusvoogude jälgimine, lülitusseadmete juhtimine ja monitoorimine ning lühiste lahutamine. Seega on alajaama veatuks toimeks tähtis sekundaarseadmete töö, seda ka olukordades, kus optimaalsed toimetingsimused ei ole tagatud. Seetõttu uuritakse käesolevas töös lähemalt, kuidas toimivad alajaama sekundaarseadmed toitepinge langemisel. Töö raamides tutvutakse ühe tähtsaima juhtimisahelate funktsiooni toimega, milleks on võimsuslülitite väljalülitusahelate toime.

Töö teoreetilises osas käsitletakse lähemalt alajaama omatarbesüsteemi. Puudutatakse nii vahelduvvoolusüsteemi kui ka alalisvoolusüsteemi: tutvutakse nende süsteemide ehituse ja töökindlusega. Samuti käsitletakse töö teoreetilises osas alajaama erinevate kaitserelee terminalide, vahereleede ja sideseadmete toiteandmeid.

Töö katselise osa esimeses osas käsitletakse alajaamas läbi viidud mõõtmisi. Mõõtmiste eesmärgiks on saada ettekujutus töös oleva alajaama omatarbe abipingest. Töö lähteülesandes seati eesmärgiks viia läbi mõõtmised kahes erinevas alajaamas, põhivõrgus ja ülekandevõrgus. Töö käigus ei õnnestunud aga põhivõrguga kokkuleppele jõuda ja seal mõõtmisi teha ei õnnestunud, seega piirduti vaid jaotusvõrgu alajaama mõõtmistega.

Töö katselise osa teises osas luuakse katsemeetod, mille abil on võimalik simuleerida elektriliini elektrilisi parameetreid tavaolukorras ja lühiseolukorras. Samuti edastada need mõõteväärtused läbi võimendi katsealusele seadmele ja mõõta katsealuse seadme lühise väljalülitamise aega. Selle katsemeetodiga on võimalik muuta ka seadmele antavat toitepinget. Simulatsiooni läbiviimiseks kasutatakse *TalTech* elektroenergeetika labori seadmeid, arvutiprogrammi *RSCAD* ja signaalivõimendit *Omicron 356*.

Katsete käigus võrreldakse kolme erineva releekaitse terminali toimet erinevatele lühiseolukordadele erinevate toitepingete juures. Eesmärgiks on tuvastada, kas ja kuidas võib alajaama toitepinge langemine akusüsteemi pinge järk-järgulisel vähenemisel mõjutada alajaama lühise lahutamise võimet. Selleks uuritakse lisaks releekaitse seadmetele ka kaht väljalülitusahela vahereleed ja võrreldakse tulemusi eelnevalt katseliselt mõõdetud võimsuslülitite väljalülituspoolide rakendumispingega.

1. Alajaamade abitoitesüsteemid

Alajaamad on elektrivõrgu ühed tuumikelemendid. Nende läbi käib igasugune elektrivõimsuse juhtimine võrgus. Üldiselt saab alajaama sisu jagada kolmeks: primaarosaks, sekundaarosaks ja üldehitusosaks. Seadmeid ja konstruktsioone, mis otseselt tegelevad võrgus liikuvate võimsuste ülekandmise ja lülitamisega, nimetatakse alajaama primaarosaks. Lülitusseadmete töö juhtimiseks kasutatakse erinevaid kaitse-, juhtimis-, side- ja mõõteseadmeid, mida kokkuvõtvalt võib nimetada alajaama sekundaarosaks. Hooneid ja vundamente nimetatakse üldehitusosaks. Abitoitesüsteemide on tarvis nii primaarosas seadmete mootorite käitamiseks, sekundaarosas releeseadmete toitepinge tagamiseks kui ka üldehitusosas, näiteks releehoone radiaatorite soojas hoidmiseks.

Abitoide on vajalik peaaegu kõikide lülitusseadmete toime tagamiseks. Leidub ka mõningaid erandeid, nagu näiteks sularid, otse mõõteahelatest toite saavad seadmed, kaitselülitid jne. Siiski on tegu pigem üksikute, ülejäänud seadmeid toetavate elementidega, mis samuti abitoitesüsteemist kasu lõikavad. Näiteks toimivad sularite või kaitselülitite seisukorda kontrollivad ahelad samuti abipingel.

Abitoitesüsteemi kasutatakse ka releekaitsete ja terminalide abil primaarpoole võimsusvoogude mõõtmise salvestamiseks, analüüsimiseks ja vajadusel kaitsefunktsioonide rakendamiseks. Samuti võimaldavad releeseadmed ka otsest lülitusseadmete töö jälgimist ja käsitsi juhtimist. Abipinget kasutatakse ka ahelates, mida mööda toimub käskude saatmine releest ja informatsiooni hankimine releesse üle kogu alajaama territooriumi. Ka alajaama kaughaldus vajab oma tööks abitoitesüsteemi. Peale otsese alajaama töö juhtimise, peavad olema tagatud tööks vajalikud tingimused, mis tähendab kütteseadet ja valgustust, nii releesaalis sees kui ka väljas paiknevates ajami- ja klemmkappides. Seetõttu võib kindlalt väita, et abitoitesüsteemid alajaamas on selle töö tagamiseks hädavajalikud, sest ilma abitoitesüsteemita lakkaks alajaama töö täies mahus. [1]

Alalispinge ja vaheduvpinge abitoitesüsteem

Alajaamades on kasutusel kaht eri tüüpi abitoitepinget. Vahelduvvoolusüsteem (AC) ja alalisvoolu (DC) süsteem. Vahelduvvoolusüsteem saab oma toite kas alajaama lattidelt, alajaama välisest võrgust või mõlemast. Alajaama lattidelt võetud omatarbe ahel võib läbida enne vahelduvvoolu keskusesse jõudmist ka omatarbetafo. Vahelduvvoolusüsteemi keskseks elemendiks on vahelduvvoolukeskus ehk AC keskus. Selles paiknevad omatarbe vahelduvvoolu latid ja fiidrid ning toimub lattide omavahelise ühendamise juhtimine (reservlülitusautomaatika ehk RLA). Vahelduvvoolukeskusest toidetakse alajaama valgustust, ventilatsiooni kütteahelaid ja muud vähemkriitilist, ilma milleta alajaama põhifunktsioonid saavad lühiajaliselt jätkuda. Lisaks sellele saavad vahelduvvoolukeskusest toite alalisvoolukeskuse akulaadid.

Alalisvoolusüsteemi kasutatakse alajaama tööks hädavajalike seadmete toiteks ja juhtimiseks. Selleks annab võimaluse alalisvoolusüsteemi laadijatega paralleelselt ühendatud akusüsteemid. Seeläbi säilib pinge ka välise toitekatkestuse korral. Alalispingel toimivad kõik releed ja terminalid, lülitusseadmete ajamite mootorid, sideseadmed, mõõtemuundurid, GPS kellad, signaaliahelad, blokeeringuahelad ja muu.

Töökindlus

Tulenevalt abitoitesüsteemile pandud vastutusest on hädavajalik tagada süsteemi talitamine ka avariolukordades. Põhiliseks töökindluse tagamise viisiks on tähtsamate elementide dubleerimine ning alalisvoolusüsteemis akuseadmete kasutamine. Näiteks on vahelduvvoolukeskuses üldjuhul kaks eraldiseisvat latti, mida on võimalik toita kahest eraldiseisvast allikast. Sõltuvalt alalisvoolukeskuse ehitusest võib olla ka selle toite seksioneeritud nii, et kumbki vahelduvvoolukeskuse latisüsteem toidab erinevat alalisvoolukeskuse alaldit ja kumbki alaldi toidab eraldi akusüsteemi. Seeläbi on võimalik tagada akude laadimine ka ühe toiteallika katkemisel või latisüsteemi rikked. Töökindluse tagamise viise käsitletakse lähemalt järgnevas peatükis.

1.1 Vahelduvpinge abitoitesüsteemid

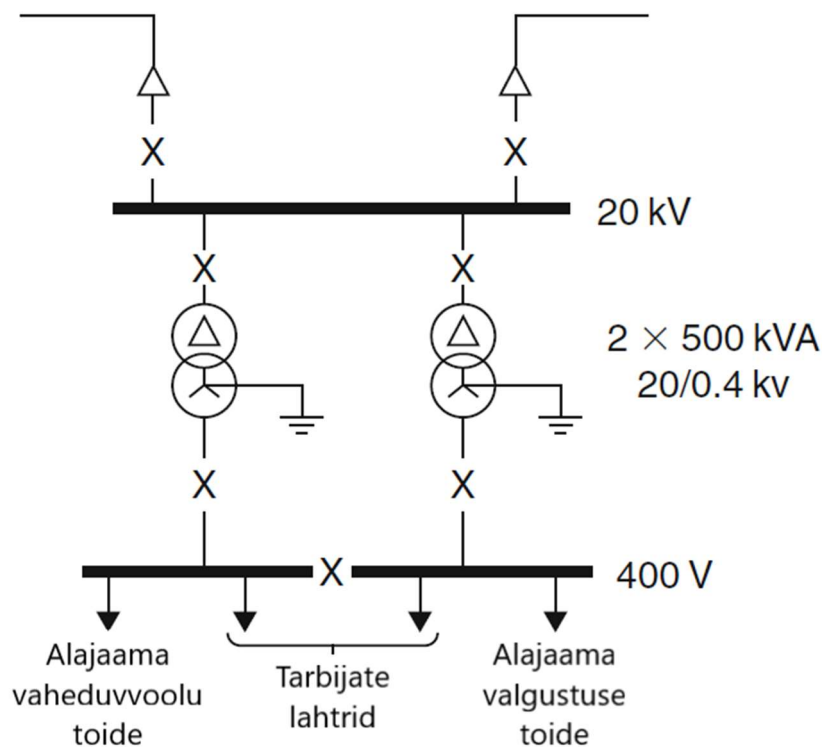
Vahelduvpinget tarbivad alajaamas seadmed, mille puhul ei ole pideva katkematu töö tagamine kriitilise tähtsusega, kuna rikked võrgus võivad tähendada katkestusi abitoitesüsteemis. Näiteks on vahelduvvoolu võrku ühendatud kõik hoone ning klemm- ja ajamikappide kütteelemendid, hoonete ja klemmkappide valgustus, hoone ventilatsioon ja veepump, aga ka alalisvoolukeskuse akulaadijad.

Selles peatükis on tehtud ülevaade alajaama vahelduvpinge abitoitesüsteemi ehitusest, vajalikkusest ja sellele seatud nõuetest.

Vahelduvpinge allikad

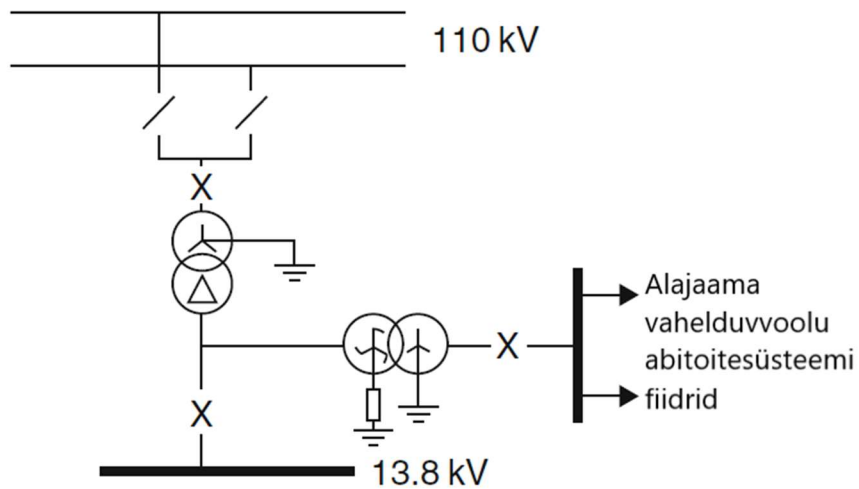
Alajaama vahelduvvoolu abitoitesüsteemid võivad toite saada välisest ühendusest või ka antud alajaama süsteemist. Järgnevalt tuuakse välja kolm näidet sekundaartoite vahelduvpinge saamiseks alajaama enese lattidelt. [2]

- a) Jaotusvõrgu alajaamades, kus alajaama alampinge on 0,4 kV, on võimalik sekundaartoite saada otse alajaama alampingepoole lattidelt (vt Joonis 1.1).



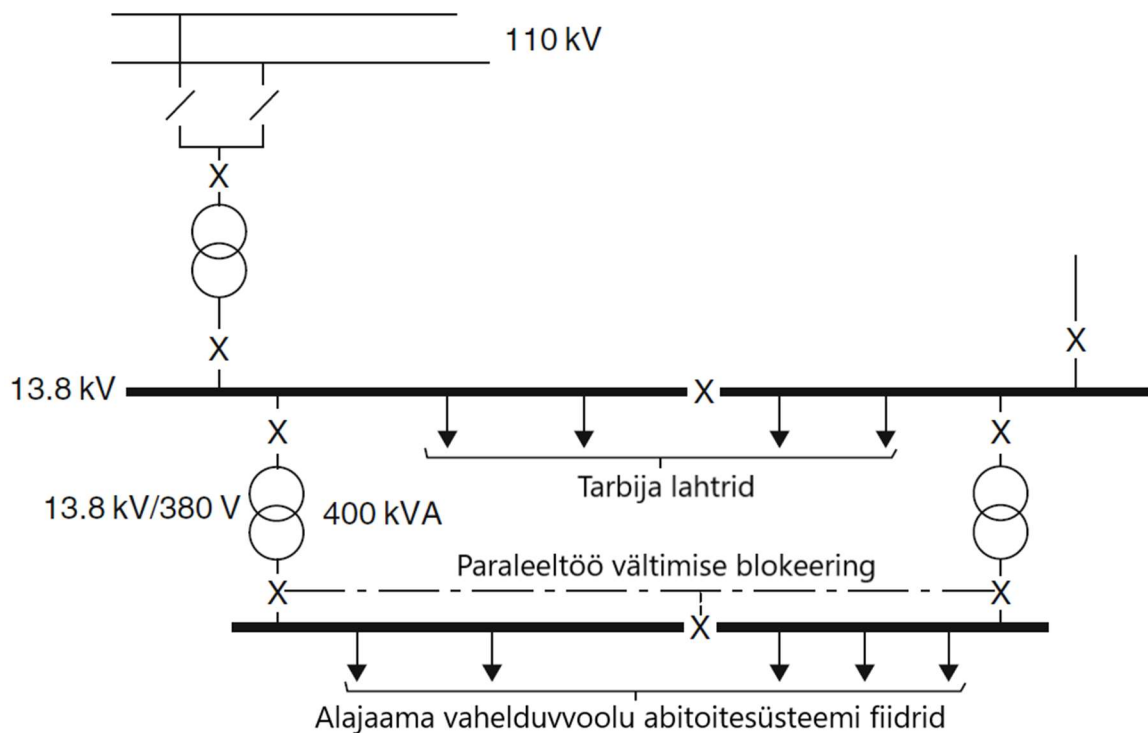
Joonis 1.1 Toitepinge saamine otse alajaama väljundfiidritest [2]

- b) Sekundaarpinge on võimalik võtta alajaama võimsustrafode kolmandalt mähiselt või maandustrafo mähiselt (vt Joonis 1.2).



Joonis 1.2 Toitepinge saamine läbi maandustrafo mähiste [2]

- c) Sekundaarpinge on võimalik võtta spetsiaalsete omatarbetrafodega otse alajaama lattidelt (vt Joonis 1.3).



Joonis 1.3 Toitepinge saamine omatarbetrafodega [2]

Alajaama vahelduvvoolukeskust ehk AC keskust toidetakse üldjuhul läbi omatarbeträfo, mille võimsus jääb suurusjärku 100-630 kVA [2]. AC keskuse sektsioone toidetakse üldjuhul läbi ühe omatarbeträfo, vältimaks paralleeltööd. Latilt toimub fiidrite kaupa tarbijate jaoks toitepinge jaotamine. Omatarbesüsteemi koostamisel tuleb arvestada nõutud töökindluse taset, lühisvoolusid ja perspektiivseid laienemisi tulevikus. Joonisel 1.4 on kujutatud ühe tüüpilise 0,4 kV vahelduvvoolukeskuse pilt. Keskuse alaosas on roheliste tuledega märgitud sisselülitatud kaitselülitid, milleks on esimese sektsiooni toiteallikas ja sektsioonide vaheline lüliti (SVL). Lülitite asendite järgi on näha, et mõlemat sektsiooni toidetakse hetkel ühest allikast.

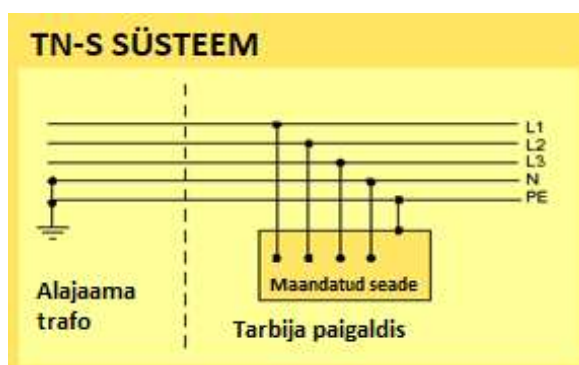


Joonis 1.4 0,4 kV AC keskus 110 kV alajaamas

Võrguettevõtte nõuded

Võrguettevõtte nõuete näitena vahelduvvoolu abitoitesüsteemile on toodud välja põhivõrguettevõtte hankedokumentatsiooni lisa „601 Requirements for AC auxiliary system“. [3] Järgnevalt tuuakse välja mõned töökindluse seisukohast olulisemad punktid.

- Vahelduvvoolu abitoitesüsteem on ehitatud TN-S süsteemile ehk tegu on kolmefaasilise süsteemiga, mille neutraal ja maandus paiknevad eraldi juhtmetes (vt Joonis 1.5).



Joonis 1.5 TN-S süsteemi ühendus [3]

- Keskuse juhtimised ja signaalid toimivad alalispingel.
- Vahelduvvoolukeskuses paiknevad kaitselülitid on jagatud vähemalt viide eraldi paiknevasse gruppi:
 - Esmalt igasugused alalisvoolu kaitselülitid. Kõik kaitselülitid saadavad asendi signaali LED indikaatorile, samuti SCADAse ja kohalikku juhtimisarvutisse.
 - Kahes eraldi grupis peavad paiknema esimese ja teise sektsiooni tehnoloogilised kaitselülitid, nagu jaotla klemm- ja ajamikappide AC ahelad, trafo astmelüliti, välisvalgustus ja muu selline. Need kaitselülitid saadavad asendisignaali SCADAse ja kohalikku juhtimisarvutisse.
 - Kahes eraldi grupis on hoone abitoite kaitselülitid. Nende alla kuuluvad enamik hoones paiknevad pistikupesad, kliimaseadmed, kütteseadmed, veepump ja muu selline. Nendele kaitselülititele üldiselt asendikontakte ette nähtud ei ole.

- Sektsioneeritud vahelduvvoolukeskus peab omama reservlülitusautomaatika (RLA) võimekust. RLA võib toimida kahel viisil: digitaalselt juhitud läbi eraldiseisva vahelduvvoolukeskuse terminali või analoogselt läbi pinge- ja vahereleede.

Töökindluse tagamine

Vahelduvvoolukeskuses on töökindlus tagatud eelkõige kaitselülite selektiivsuse ja latisüsteemide sektsioneerimisega. Samuti on osades alajaamades kasutusel varugeneraatorid.

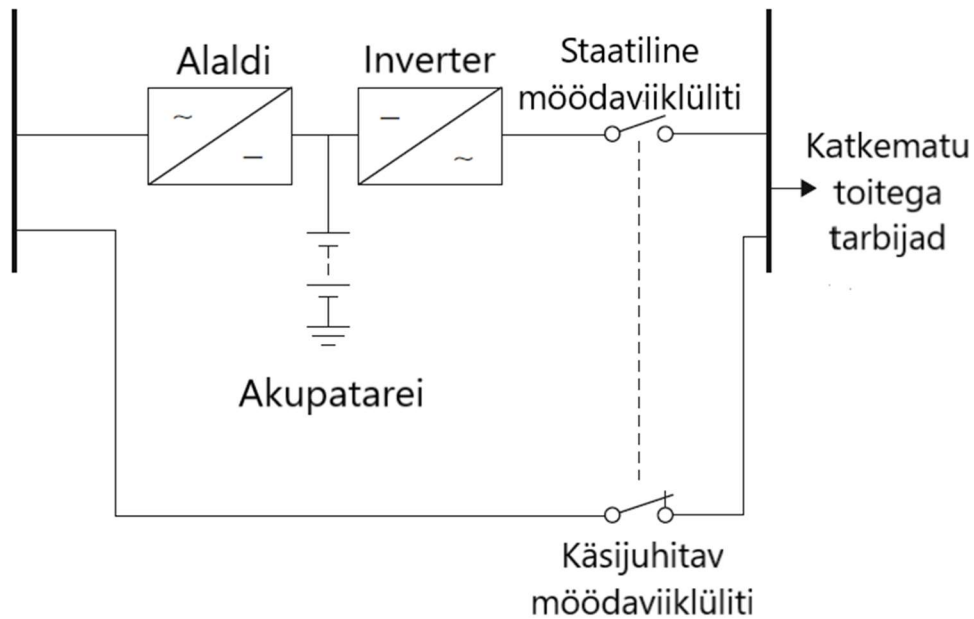
Põhivõrgu alajaamades on sektsioneeritud vahelduvvoolukeskuse RLA ette nähtud toimima ühel viisil kolmest. Kas prioriteetse sisendiga, ilma prioriteetse sisendita või varugeneraatori sisendiga. [3]

Prioriteetse sisendi korral on üks sisendfiider alati prioriteetne. Ühe põhivõrgu omatarbeträfo olemasolul on see sisendfiider seatud prioriteetseks. Mõlemat latisektsiooni toidetakse ühelt sisendfiidrikt ja teine sektsioon saab toite läbi suletud SVL-i. Sisendfiidrite paralleeltööd tuleb vältida, mistõttu peab ühe sisendfiidri lüliti sulgumisel olema teine avatud. Ühe sisendfiidri rikke või pingetuse korral lülitatakse see fiider välja ja seejärel lülitatakse sisse teine sisendfiider. Rikke kadumisel taastatakse esialgne olukord.

Ilma prioriteetse sisendfiidritä on normaalolukorras suletud mõlemad fiidrid ja SVL on avatud. Paralleeltöö vältimiseks tuleb tagada, et SVL saab sulgeda vaid siis, kui üks sisendfiidritest on väljas. Ühe sektsiooni rikke või pingetuse korral lülitatakse selle sektsiooni sisendfiider välja ja seejärel SVL sisse. Rikke kadumisel taastatakse esialgne olukord.

Varugeneraatori olemasolu korral on vahelduvvoolukeskusel sisendeid kolm, kaks ühendust võrgust ja üks generaatorilt. Normaaltalitusel on suletud üks võrguühendusega sisendfiider ja teised on avatud. Paralleeltöö vältimiseks saab korraga olla sisse lülitatud vaid üks sisendfiider. Kui mõlemad võrguühendusega sisendfiidrid on pingeta, ühendatakse mõlemad lahti ja lülitatakse sisse generaatori fiider. Generaatori fiidri lüliti seesasendist saadetakse ka signaal generaatori käivitamiseks. Ühe võrgu fiidri pinge taastumisel lülitatakse tagasi võrgufiidrite peale.

Mõnedes vahelduvvoolukeskustes on kasutusel ka *UPS* seade (*Uninterrupted Power Supply* ehk katkematu toitesüsteem), mis tagab vahelduvvoolutoite ka toitekatkestuste korral, kasutades selleks akusid. Joonisel 1.6 on kujutatud UPS seadme paiknemist iseloomustav põhimõtteline skeem. Selline lahendus on mõeldud juhtimisruumi kriitilisemate seadmete toiteks, näiteks juhtimisarvuti või valveseadmed.



Joonis 1.6 *UPS* seadme ühendamine vahelduvvooluvõrku [2]

Ülaltoodud meetodid aitavad ületada toitekatkestusi, kuid teevad seda teatud ajalise viitega. Näiteks vahetab automaatselt toimiv reservlülitusautomaatika süsteem toite ümber sisuliselt hetkega, kuid paralleelühenduse vältimiseks toimub ühendamine siiski teatud katkestusega. Lisaks sellele on varugeneraatorid kulukad ja sellest tulenevalt vähemlevinud. Ainus katkematu AC toitesüsteemi tagamise võimalus on *UPS* seade, kuid seda kasutatakse vaid sideruumi töös hoidmiseks. Seega on arusaadav, miks alajaama kriitiliste seadmete juhtimine käib läbi alalisvoolusüsteemi ja akupatareide.

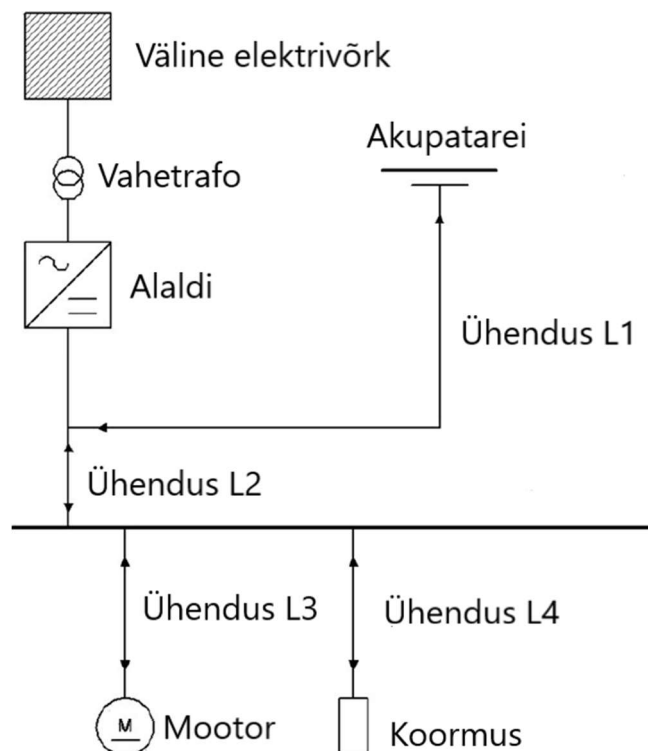
1.2 Alalispinge abitoitesüsteemid

Alalisvoolu süsteemi põhiülesandeks alajaamas on tagada alajaama põhiseadmete töökindel talitus. Suur hulk alajaama seadmeid vajavad toimimiseks alalisvoolu, et tagada nende seadmete toimimine ka võrgu katkestuste korral võrgu taastamiseks. Sellised seadmed on näiteks võimsuslülitid, lahk- ja maanduslülitid, aga ka juhtimis- ja sisedeadmed. Kuna kogu selle süsteemi toimimise tagab alalisvool, võib väita, et kõige kriitilisem osa alajaama kaitse, juhtimise ja jälgimise funktsioonist on alalisvoolu abitoitesüsteem. Rike alalisvoolu abitoitesüsteemis võib tähendada, et alajaama seadmed ei suuda tuvastada rikkeid võrgus, võimsuslülitid ei suuda lahutada lühiseid ja alajaama kaugjuhtimine ei ole võimalik. [4] [1]

Selles peatükis võetakse kokku alajaama alalisvoolu abitoitesüsteemi ehitus ja vajalikkus, sellele esitatavad nõuded ja esineda võivad rikked.

DC süsteemi komponendid

Alajaamade alalisvoolu abitoitesüsteem koosneb akusüsteemist, akulaadijast, toiteahelatest, kaitselülititest ja mõõteseadmetest. Korrektseks toimimiseks on vajalik kogu süsteemi õige dimensioneerimine, ehitamine ja hooldus. Joonisel 1.7 on kujutatud alajaama alalisvoolusüsteemi lihtsustatud skeem.[1]



Joonis 1.7 Alalisvoolu süsteemi lihtsustatud skeem [4]

Akusüsteem

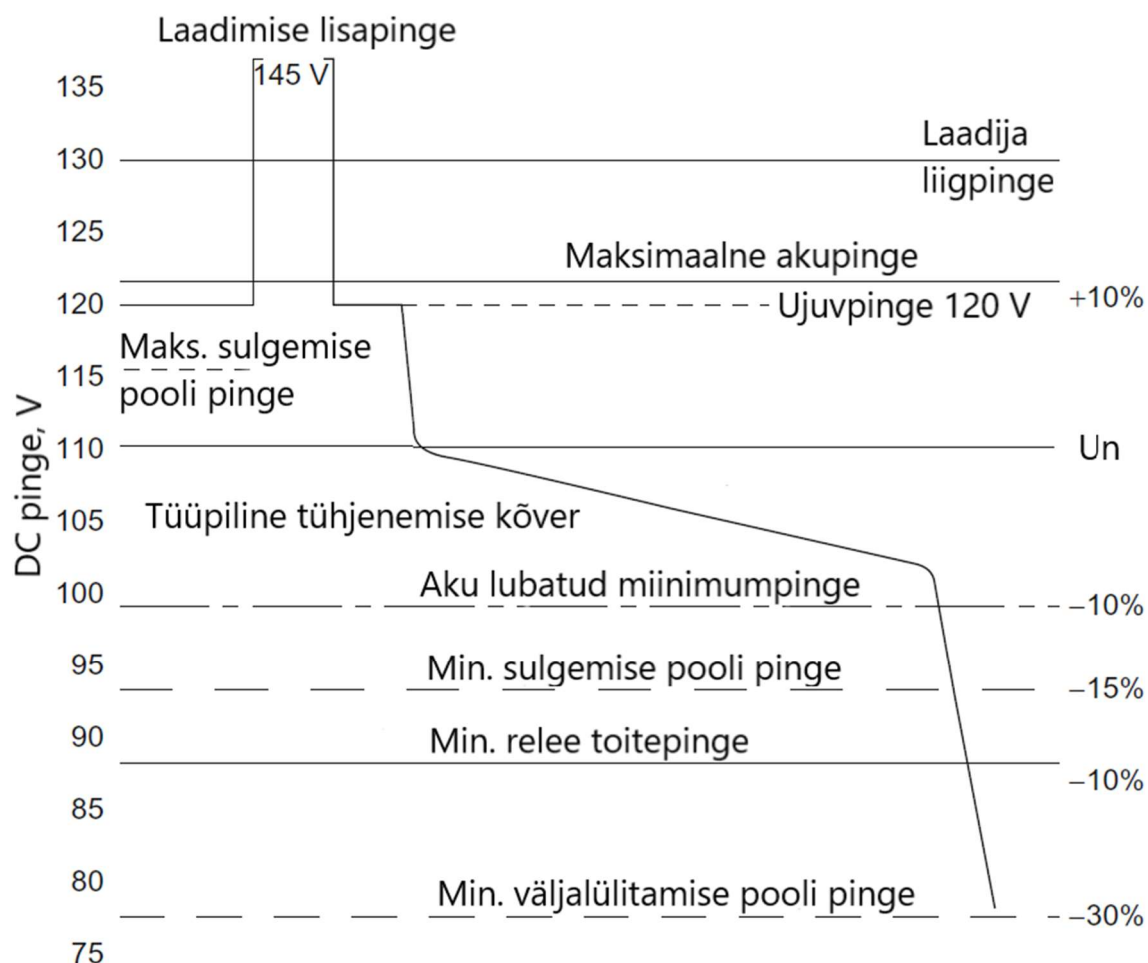
Akusüsteem koosneb jadamisi ühendatud üksikutest patareidest, mille hulk sõltub alajaama nimipingest. Näiteks on põhivõrgu poolt nõutud kas 51x2V või 102x2V tüüpi lahendus, kuid ka monoblokk tüüpi akud on lubatud. Sõltuvalt alajaama pingest on määratud ka kasutatavate akude tüüp: 330 kV alajaamades on lubatud tavalised happeakud, 110 kV alajaamades on lubatud geel tüüpi akud. [5]

Normaaltalitluse korral hoitakse akupatareisid laetuna läbi laadimisseadme. Laadimisseade tagab, et aku pinge ei lange kadude tõttu nimipingest allapoole ja hoiab ühtlast ujuvpinget (*float voltage*) aku klemmidel. Laadimisseade tagab ka pinge alajaama normaaltalitluse ühtlase koormuse rahuldamiseks, kuid kui alalisvoolusüsteemis esineb äkilisi koormusi, nagu näiteks võimsuslülitite vedru vinnastamine, võetakse selleks vajalik energiat akupatareidelt. Patareid laetakse seejärel uuesti täis. [1]

Akulaadija rikke või toitepinge kadumise korral võetakse kogu alalisvoolu võrgu tarbitav võimsus akupatareidelt. See tähendab, et akud peavad varustama alajaama normaaltalitluseks ja lülitamiseks vajaliku energiaga piisavalt kaua, et laadimissüsteem on võimalik taastada. Seetõttu tuleb akupatareide dimensioneerimisel arvestada realistlike ajavahemikega. Põhivõrgu tehnilistes nõuetes on näiteks ette nähtud, et akusüsteem peab tagama antud alajaama toite vähemalt 10 tunniks ja mitte olema vähem kui 100 Ah. Samuti peab akusüsteem suutma peale 10 tunnist seisakut välja lülitada mitu võimsuslülitit samaaegselt. [1] [5]

Akude nõutav mahtuvus määratakse akudele ette nähtud koormusega, akutoite kestusega ja süsteemi pingeparameetritega. Akude koormus arvutatakse välja tarbijate koormuse põhjal, arvestades seejuures tarbijate iseloomu: tarbimine võib olla pidev (nt. releede toide), lühiajaline (nt. mootorid, töö jätkamise valgustus) või hetkeline (nt võimsuslülitite väljalülitamine). [2]

Joonisel 1.8 on näidatud tüüpilise 110 V Nikkel-Kadmium akusüsteemi tühjaks laadimise graafik ajas. Tasub märkida, et akupatareide tühjaks laadimise lõpuosas toimub toitepinge järsk langus. Sarnane langus iseloomustab ka traditsioonilist pliiakut. [2]



Joonis 1.8 Nikkel Kaadmium akudega 110 V DC akusüsteemi näitlik pinge languse kõver akude tühjenemisel [2]

Alalisvoolukeskus

Alalisvoolukeskuses võivad paikneda koos laadijad, alalisvoolu latisüsteem, sisend ja väljundfiidrid ning ka akusüsteem, kuid suuremate süsteemide puhul on üldiselt akusüsteem eraldatud. Alalisvoolusüsteemi töökindluse tagamiseks võib keskuses paikneda mitu laadijat ja samuti võib latisüsteem olla seksioneeritud. [2]

Kuna laadija ülesandeks on nii alalisvoolu süsteemi toitmine kui ka akude laadimine, peab laadija olema valitud selline, et suudab tagada korraga nii kogu akude laadimisvoolu kui ka süsteemi maksimaalse tarbimise. Laadija peab tagama ka, et alalispinge kvaliteet jääks lubatud piiridesse, näiteks nõuab põhivõrk, et alalispinge vahelduvkomponent ei ületaks $U_{pp} = 4\%$. [1] [5]

Tänapäeva akulaadid võivad olla varustatud erinevate seadme tervist jälgivate süsteemidega. Näiteks on võimalik saada hoiatust akude üle- ja alapingest, AC toite puudumisest, laadija siserikkest, maandamata võrgus alalisvoolu maaühendusest ning jälgida näiteks laadija laadimisvoolu ja akude temperatuuri. [1]

Joonisel 1.9 on kujutatud ühe alalisvoolukeskuse paneeli pilt. Tegu on alalispinge jaotuskapiga, mille laadid paiknevad eraldi kapis. Pildilt on näha kuidas väljundfiidrid on jagatud kahte sektsiooni.

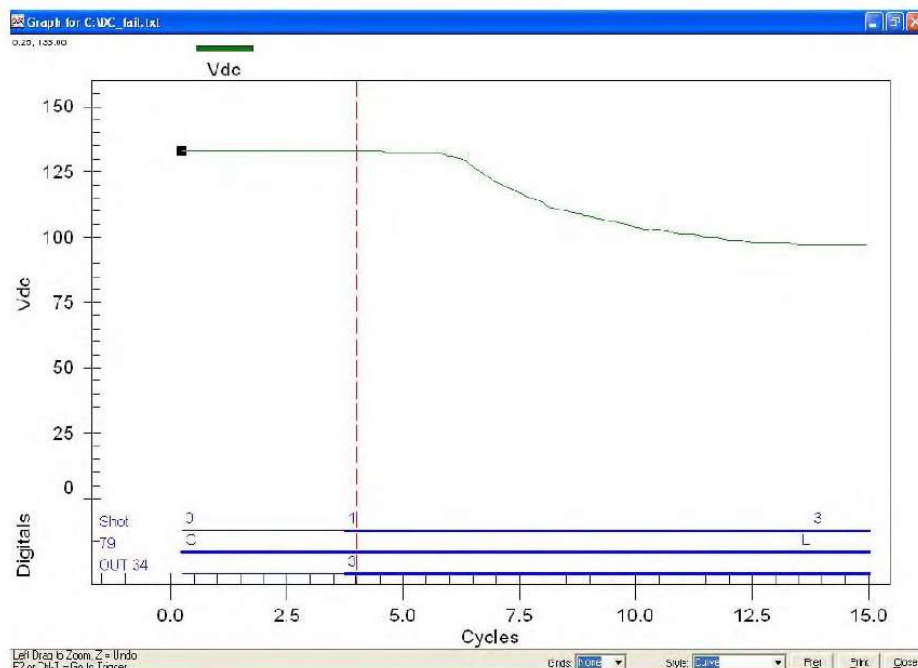


Joonis 1.9 110V DC keskus 110 kV alajaamas

Tarbijad

Nagu eelnevalt mainitud, tarbivad alalisvoolu kõik seadmed, mille puhul on vajalik seadmete töö ka süsteemi häiringute korral. Nendeks on üldjuhul nn *PCM* (Protection, Control and Monitoring ehk kaitse, juhtimine ja jälgimine) grupi seadmed, vastavalt näiteks kaitserелеed ja võimsuslülitite *trip* (väljalülitamise) poolid, lahtriterminalid ja lülitite ajamid, *RTU*d ja optikakordajad. [1]

Ka sekundaarseadmete läbi toimub osaline alalisvoolu võrgu jälgimine. Näiteks suudavad osad releed kontrollida pinget tähtsamates ahelates, sh. väljalülitusahelates. Samuti on osad tänapäevased releed võimelised toitepinget analüüsima ja salvestama seda infot ka häiresalvestisse. Nii on võimalik saada näiteks sekundaarahelatest üle- ja alapinge signaale ning viia läbi rikete tuvastamist. Joonisel 1.10 on kujutatud kuvatõmmis ühest häiresalvestisse salvestatud toitepinge kukumisest. Salvestiselt on näha, kuidas alalispinge langeb järsult sisselülitamise käsu peale, mistõttu võimsuslülitite sisselülitust ei toimu. [1]



Joonis 1.10 Häiresalvesti kuvatõmmis toitepinge langemisest [1]

Nõuded

Alajaama DC süsteemi rajamisel tuleks lähtuda järgnevast:

- Akusüsteemi dimensioneerimine ja valik
- Juhtmestiku ristlõike valik vastavalt lühisvoolude temperatuuritaluvusele
- Juhtmestiku ristlõike valik vastavalt ahelate nimivoolule
- Pingelangu arvutus
- Kaitselülitite selektiivsus

Need kriteeriumid on välja toodud standardis IEEE 946-2020 "Recommended Practice for the Design of DC Auxiliary Power Systems for Generating Stations". [6]

Võrguettevõtte nõuded

Võrguettevõtte nõuete näitena vahelduvvoolu abitoitesüsteemile on toodud välja põhivõrgu hankedokumentatsiooni lisa [5]. Järgnevalt tuuakse välja mõned alalisvoolu võrgu töökindlust kirjeldavad punktid:

- Kasutatakse 110 V või 220 V alalisvoolu süsteemi. Ülejäänud pingeastmed saadakse DC/DC konverteritega.
- Alalisvoolukeskusel on kaks sektsiooni, kumbki eraldi akusüsteemiga ja eraldi laadijaga. Mitte ühegi üksiku seadme rike ei tohi põhjustada mõlema sektsiooni toitekatkestust. Üksik laadija peab suutma toita mõlemat sektsiooni.
- Releekaitse ja muud tähtsamad süsteemid on jagatud kaheks süsteemiks, millest kumbki saab toite erinevalt alalisvoolukeskuse sektsioonilt. Igal võimsuslülitil on kaks *trip* pooli, mida toidetakse eri sektsioonidelt. Iga liini kaitseterminal ja selle liini sidesüsteem saab toite samalt sektsioonilt, RTU saab toite mõlemalt sektsioonilt.
- Suurt tähelepanu tuleb pöörata kaitselülitite selektiivsusele. Selektiivsuse tagamiseks tehtud lühivooluarvutused tuleb esitada kliendile kooskõlastamiseks.
- Alalisvoolukeskusest SCADAse peavad jõudma järgnevad signaalid: alalisvoolu keskuse kaitselüliti väljas, aku üle- või alampinge, aku üle- või alatemperatuur, laadija rike, alalisvooluahelate maaühendus.
- Alalisvooluvõrk on maast isoleeritud, kuid maaühenduste tuvastamiseks on olemas vastav süsteem.
- Alajaama alalisvoolu vahelduvkomponendi amplituudväärtus ei tohi ületada 4 % ja selle mõju ei tohi olla rohkem kui 0,01%, ka siis kui akud ei ole DC süsteemi ühendatud ja võrk on vaid laadijate toitel.
- Võrgu seadmed peavad toimima ka 0,85 kordse nimipinge juures ja pingelang sekundaarahelates ei tohi ületada 0,05 kordset nimipinget.

Töökindluse tagamine

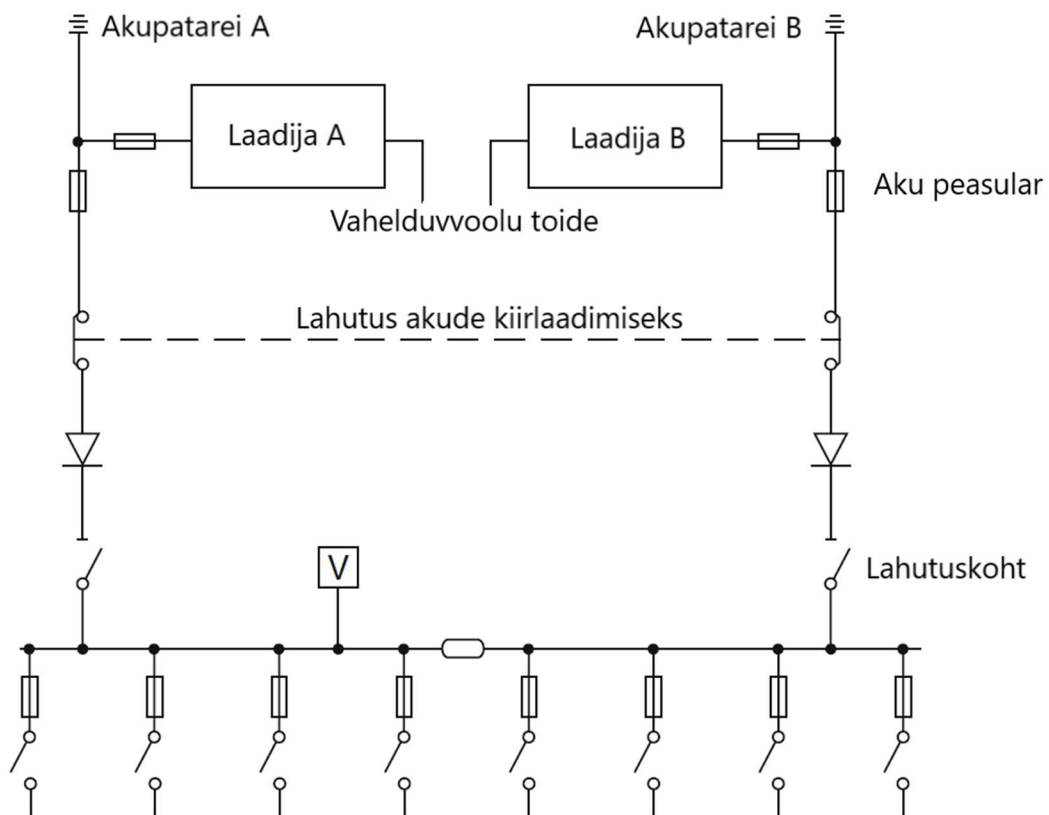
Alalisvoolu abitoitesüsteemi põhieesmärgiks on tagada võrgu töökindlus. Järgnevalt tuuakse välja mõned meetodid, mida kasutatakse töökindluse saavutamiseks.

1. Akusüsteem:

Esmatähtsaks töökindluse tagamise viisiks alalisvoolusüsteemis on akusüsteemi kasutamine. Lisaks laadijate toetamisele suurte koormuste korral, tagab akusüsteem, et vahelduvvoolu toitepinge kadumisel laadijatelt jääb alalisvoolu võrk toimima akutoitel. Seetõttu ei sõltu seadmete toime välisvõrgu häiringutest. Akusüsteemi ehitust ja toimet on lähemalt kirjeldatud alapeatükis „Akusüsteem“.

2. Sektsioneerimine ja dubleerimine:

Sarnaselt vahelduvvoolusüsteemiga saab ka alalisvoolukeskuses kasutada latisüsteemide sektsioneerimist. See võib tähendada, et kumbagi latti toidetakse eraldi akulaadijalt ja akusüsteemist, millest kumbki on võimeline iseseisvalt kogu süsteemi toitma (vt Joonis 1.11), kuid on olemas ka soodsamaid hübriidlahendusi. [2]



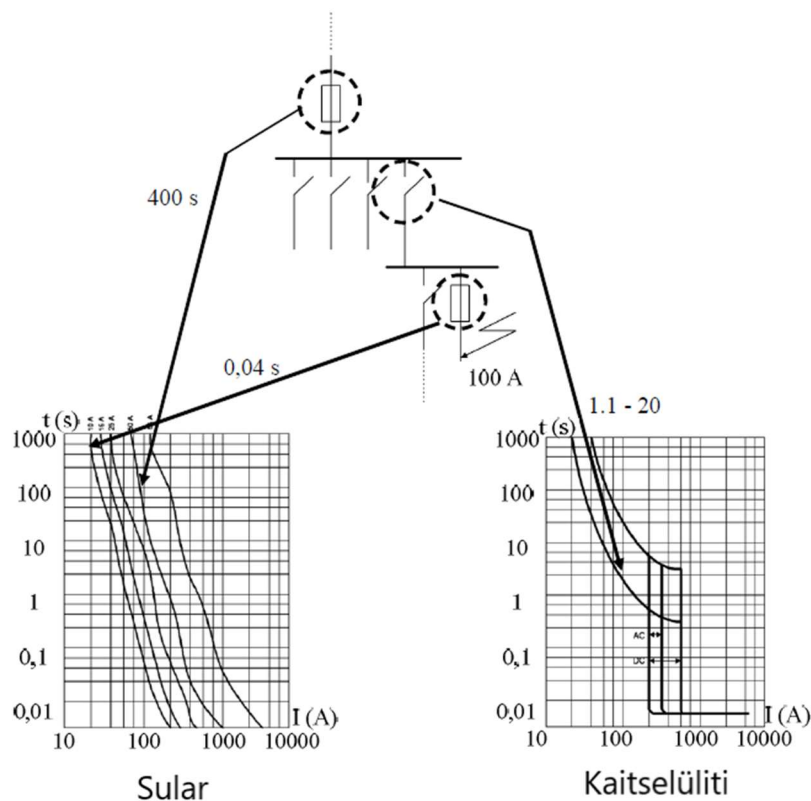
Joonis 1.11 Täielikult dubleeritud alalisvoolukeskuse sektsioonid [2]

Alalisvoolusüsteem, kui osa suuremast alajaama abitoitesüsteemist, saab oma toite vahelduvvoolukeskuse lattidelt. Kui ka vahelduvvoolukeskuses on samuti kasutusel kaks sektsiooni, on võimalik toita mõlemat laadijat eraldi sektsioonilt, tõstes nii rikkekindlust veelgi.

3. Selektiivsus:

Kaitstesüsteemi selektiivsus tähendab, et rikke korral lülitatakse välja ainult see elektrisüsteemi osa, mis on rikkega, säilitades ülejäänud võrgu häiringuvaba töö. Selektiivsus tagatakse, kasutades seadmetele lähemal kiirema toimega ja seadmetest kaugemal aeglasema toimega kaitseseadmeid. Sealjuures tuleks arvestada, et eri astmete kaitseseadmete rakendumise viite erinevus oleks üle 100 ms. [4]

Joonisel 1.12 on kujutatud selektiivsuse saavutamise skeem kolme tasemega, millest üks on kaitselüliti ja kaks sularid. Antud näitel on selektiivsus tagatud, sest rike kolmanda taseme ühes väljundis eemaldatakse ahelast ainult selle väljundi sulari läbipõlemise teel. Vale selektiivsus võib näiteks põhjustada teise astme kaitselüliti väljalülitamist, mille tagajärjel jääks toiteta kõik kolmanda astme tarbijad. [4]



Joonis 1.12 Näide selektiivsuse saavutamisest [4]

Alalisvooluvõrgu rikked ja häiringud

Alalisvoolu toitesüsteemis võib sarnaselt vahelduvvoolu toitesüsteemiga esineda häiringuid pinge kvaliteedis. Elektriseadmete vastu pidamist erinevatele võrgu häiringutele kirjeldab näiteks IEC standard 61000-4. Järgnevalt tuuakse näidetena välja mõned võrgus esinevad häiringud, millele alajaama elektroonikaseadmed vastavalt standardile peavad vastu pidama.

- 61000-4-11 [7] määrab ära seadme vastupidavuse alalisvooluvõrgus aset leidvatele pingelohkudele ja lühiajalistele katkestustele. Võrgus aset leidvate rikete korral võib võrgu pinge lühiajaliselt langeda või nullini jõuda, sõltuvalt rikke iseloomust ja asukohast. Ka PSU seadme sisselülitamine võib ajutiselt tekitada pingelohke. [8]
- 61000-4-4 [9] käsitleb võrgus esinevaid kiireid transient liigpingeid. Kommutatsiooniprotsesside tulemusena võib võrku tekkida üksikuid pingetippe, mida elektroonikaseadmete toiteblokid võivad liigpingeks pidada ja seetõttu seadme välja lülitada. Antud liigpinged ei levi võrgus pikalt ja jäävad oma kestuselt üldiselt kümnetesse nanosekunditesse. [8]
- 61000-4-5 [10] puudutab võrgu lähedal toimuvatest pikselöökidest tekkivaid liigpingeid.
- 61000-4-6 [11] käsitleb raadiosageduslikke häiringuid alalisvooluvõrgus, mis jõuavad seadmete toiteblokki. Häiringud tekivad võrku põhjustatuna lähedalasuvatest raadiosidel toimivatest seadmetest, nagu näiteks telefonimastid ja raadiosaatjad. [8]

Seadmete vastavust erinevatele standarditega määratud elektromagnetilistele häiringutele on võimalik kontrollida seadme manuaalidest. Näiteks käsitletakse ABB kaitserelee REF615 tehnilises manuaalis kõiki seadmele rakendatud testide väärtusi ja vastavaid standardeid. [12]

Alajaama käidu kontekstis võib lihtsamini vaadeldavateks toitepinge häiringuteks pidada näiteks:

- Toitepinge langemist, akupatareide järk-järgulisel tühjenemisel.
- Toitepinge katkemist, lühiajaliselt või lühiseolukorras sooritatud kaitselahutamise korral.
- Maaühenduse tekkimist alalisvooluvõrgus.

2 Alajaama sekundaarseadmed

Selles peatükis on kokku võetud lühike ülevaade erinevatest alajaama sekundaarosas kasutatavatest seadmetest. Tulenevalt käesoleva töö temaatikast on lähemalt käsitletud ka mõne seadme tootjapoolseid toitepinge andmeid.

2.1 Väljalülitusahel

Alajaama kaitsefunktsiooni toimimiseks peab toimima terve ahel seadmeid. Kaitsefunktsiooniga rele sooritab mõõteandmete analüüsi ja annab selle põhjal vajadusel välja kaitselahutamise signaali. Antud signaal paneb aga üldjuhul tõmbuma väljalülitusahela vaherelee, mis saadab väljalülitamise signaali võimsuslülitisse. Sellest lähtuvalt käsitletakse selles peatükis väljalülitusahelasse kuuluvate seadmete tootjapoolseid toiteandmeid.

Tabelis 2.1 on kujutatud kolme releeseadme toitepingeid. Tegu on seadmetega, mis tegelevad otse seadmete juhtimiseks ja jälgimiseks vajalike signaalide saatmisega ja vastuvõtmisega. Võrdlusesse on valitud kolme Eestis kasutusel oleva releekaitse tootja seadmed. On näha, et seadmete lubatud toiteparameetrid jäävad väga sarnastesse vahemikesse.

Tabel 2.1 Releeseadmete tootjapoolsed toiteandmed [12] [13] [14]

Nimetus	ABB REF620	Toshiba GRL200	Siemens SIPROTEC 5 seeria
Tüüp	Lahtriterminal	Liini distantkaitse	Releekaitse ja lahtriterminalid
Nimi abitoitepinge	48, 60, 110, 125, 220, 250 V DC	110, 250 V DC	60, 110, 125, 220, 250 V DC
Maks. lubatud toitekatkestuse kestus	50ms (Un juures)	50ms (Un juures)	50ms (kui $U_n \geq 110$ V DC)
Abitoitepinge variatsioon	80-120% U_n (38,4-300 VDC)	88 - 300 VDC	88 - 300 VDC
Vahelduvkomponent	max 15% DC väärtusest	max 15% DC väärtusest	max 15% DC väärtusest
Märkused	Lubatud ka 110 - 240 VAC (ja teise toiteblokiga 24-60 VDC) toitepinged	-	Lubatud ka 100, 115 ja 230 VAC toitepinged

Kaitserelee edastatud väljalülitussignaali ahel üldjuhul otse võimsuslülitisse ei lähe. Selle asemel läbib see kiiretoimelise vaherelee, mille kaudu signaali vastavalt vajadusele paljundatakse. Kiiretoimelise vaherelee rakendumisaeg on tootekataloogi järgi lubatud kuni 8 ms. Vaherelee puhul on põhivõrgu ettevõtte poolt ette nähtud ka minimaalne pinge, millest madalamal relee ei tohi töötada, milleks on 0,6 kordne nimipinge. Järgnevas tabelis 2.2 on ühe põhivõrgu ettevõtte poolt heaks kiidetud kiiretoimelise vaherelee nimiandmed. [15]

Tabel 2.2 Väljalülitusahela vaherelee tootjapoolsed andmed

Tüüp	Vaherelee
Nimetus	General Electric/Arteche RF-4R
Nimipinge	24,48,72,96,110,125,220Vdc/Vac; 50/60 Hz
Abitoitepinge variatsioon	+10% -20% UN

Väljalülitamise signaali jõudmisel võimsuslülitisse paneb signaal tõmbuma võimsuslüliti väljalülituspooli. Võimsuslüliti väljalülituspooli rakendumisel lahutatakse võimsuslüliti kontaktid. Järgnevas tabelis 2.3 on kokku võetud kolmes eri alajaamas läbi viidud võimsuslüliti testide tulemused võimsuslüliti rakendumise pinge seisukohast. On näha, et võimsuslülite väljalülituspoolid rakenduvad keskeltläbi poole nimipinge juures.

Tabel 2.3 Võimsuslülite mõõdetud toimimispinged

Tüüp	Võimsuslüliti	Võimsuslüliti	Võimsuslüliti
Nimetus	ABB OVB-VMF	GE GL312 F1/4031 DCB	Siemens 3AP1FG
Pingeaste	40,5 kV	145 kV	24 kV
Nimi abipinge	110 V DC	110 V DC	220 V DC
Mõõdetud min. trip pinge	60 V DC	40-50 V DC	130-135 V DC
Mõõdetud min. close pinge	70 V DC	65 V DC	135 V DC
Katseseade	OMICRON CIBANO 500	OMICRON CIBANO 500	OMICRON CIBANO 500

Selles alapeatükis kokku võetu illustreerib seda, kuidas alajaama kaitsefunktsioonide tagamiseks ei piisa ainult kaitserelee toimimisest. Näiteks võib toitepinge langemisel toimimise lõpetada mõni muu element, mille tagajärjel jääb kaitseülitus sooritamata. Käesolevas töös seatakse üheks eesmärgiks leida lisaks kaitsereleele ka vaherelee toimimine toitepinge muutusel.

2.2 Side

Side loomiseks alajaama ja kaughalduse (SCADA) vahel kasutatakse RTU seadet. RTU kogub alajaama sisevõrgus liikuvaid signaale ja edastab need juhtimiskeskusesse. Seeläbi toimub alajaama mõõteandmete kogumine, signaalide edastamine ja lülitite kaugjuhtimine. [16]

Selleks, et tagada sideahela terviklikkus, peab aga toimima nii signaali väljasaatev seade, milleks on üldiselt kaitserellee; erinevad võrguseadmed, nagu *switchid* või optikakonverterid ja ka RTU ise. Seega on oluline, et abitoitepinge tagaks kõikide seadmete töö. Tabelis 2.4 on välja toodud kahe erineva RTU tootjapoolsed toiteandmed. On näha, et toitepinge oodatav kvaliteet jääb samasse suurusjärku releeseadmete lubatud toitepingega.

Tabel 2.4 RTUde tootjapoolsed toiteandmed

Tüüp	RTU	RTU
Nimetus	SPRECON-E-C-SERIES	SIEMENS SICAM AK 3
Nimi abitoitepinge	24-60 V DC 110 - 220 V DC ja 110 - 230 V AC	24 VDC / 48 VDC / 60 VDC (18 VDC - 78 VDC) 110 VDC / 220 VDC (82,5 VDC - 286 VDC) 115 VAC / 230 VAC (90 VAC - 264 VAC)
Maksimaalne lubatud toitekatkestuse kestus	min 50 ms	min 50 ms
Abitoitepinge variatsioon	AC -20/+15 % DC -20/+20 %	18 ... 78 VDC 82.5 ... 286 VDC 90 ... 264 VAC

3 Katsed

Töö lähteülesandes seati eesmärgiks uurida toitepinge mõju alajaama sekundaarseadmete tööle. Tulenevalt alajaama sekundaarseadmete suurest kogusest ja mitmekesisusest on antud töö kontekstis otsustatud süveneda alajaama ühe tähtsaima funktsiooni uurimisele. Selleks on lühiste tuvastamine, väljalülitusahel ja sellega seotud seadmed.

Käesolevas töös viiakse läbi katseid, tutvumaks relekaitseadmete ja väljalülitusahela tööga toitepinge langemise korral. Seeläbi proovitakse tuvastada, kas ja kui palju mõjutab toitepinge langemine releseadmete tööd. Samuti tuvastatakse, mis osa väljalülitusahelast esmalt pingelangemise tõttu töö lõpetab.

Esmalt on katsetega kavas tuvastada, kuidas käituvad sekundaarseadmed toitepinge väärtuse järk-järgulisel vähenemisel akusüsteemi pingelangemisel. Seeläbi loodetakse tuvastada, millised põhifunktsioonid ja mis järjekorras kaovad alajaama sekundaarpoole väljalülitusahelas.

Leidmaks konteksti reaalses elus kasutatavast toitepinge kvaliteedist, teostatakse ka toitepinge mõõtmised ühes jaotusvõrgu alajaamas.

3.1 Mõõtmised alajaamas

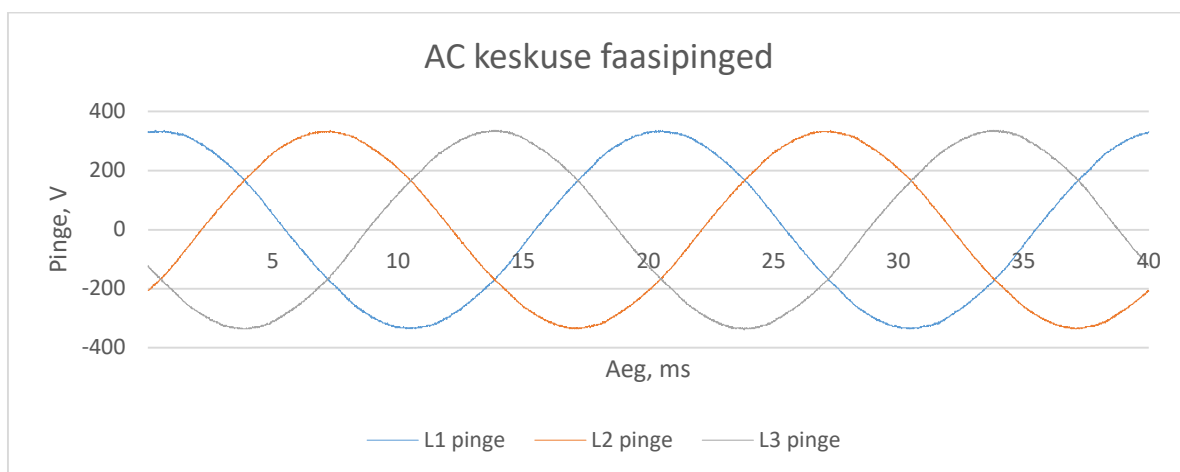
Käesoleva töö raames viidi esmalt läbi abitoitepingete analüüs olemasolevas alajaamas. Näiteks valiti üks Tallinnas paiknev jaotusvõrgu alajaam. Mõõtmiste läbiviimiseks kasutati Rhode&Schwarz RTE1024 ostsilloskoopi. Selle abil tehti ülesvõtte voolu ja pingeväärtustest vaatlusaluse alajaama normaaltalitusel.

Mõõdeti vahelduvvoolukeskuse sisendi voolu ja pingeid. Samuti mõõdeti alalisvoolukeskuse lati pinget ja akude laadimisvoolu.

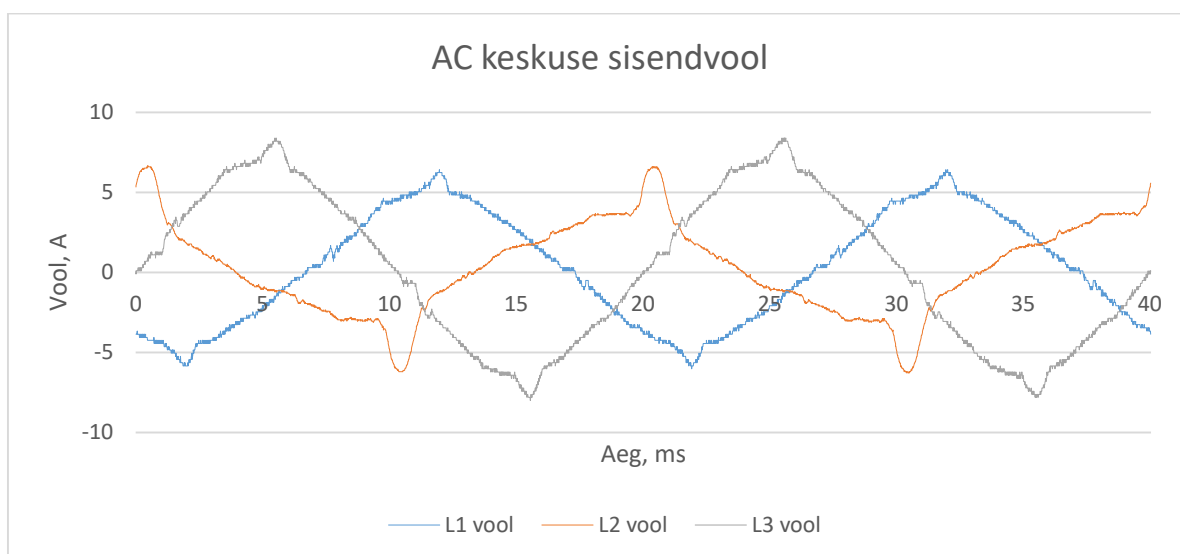
Jaotusvõrgu alajaam

Uuritavaks jaotusvõrgu alajaamaks sai Mustamäe alajaama jaotusvõrgupoolne osa. Mõõtmised viidi läbi juhtimishoone alalisvoolukeskuses ja vahelduvvoolukeskuses.

Vahelduvvoolukeskuses viidi kõik mõõtmised läbi keskuse sisendfiidris, üks faas haaval. Kolme faasi mõõtetulemused on lihtsama ülevaate saamiseks joonistel kujutatud samadel graafikutel 120° vahega. Mõõdetud faasipinged on kujutatud joonisel 3.1. Jooniselt paistavad kõik faasipinged olevat korrektsed ja võrdsete parameetritega. Joonisel 3.2 kujutatud faasivoolud on aga ebaühtlased. Kuna katsete sooritamise ajal kõikus vool 2-20 A vahel ja mõõtmised viidi läbi faas haaval, ei ole võimalik võrrelda omavahel faaside koormatust.

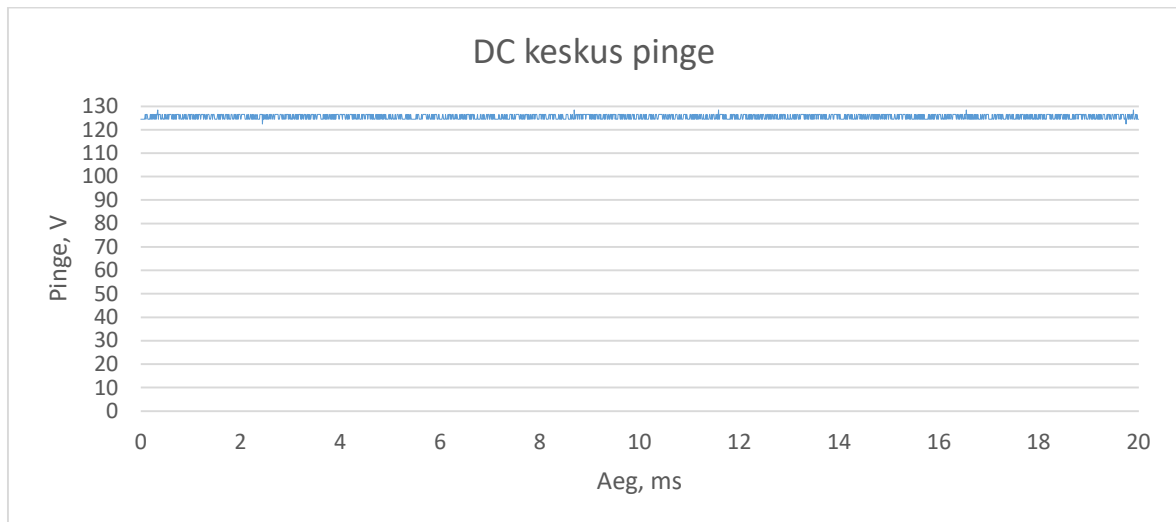


Joonis 3.1 Vahelduvvoolukeskuse faasipinged

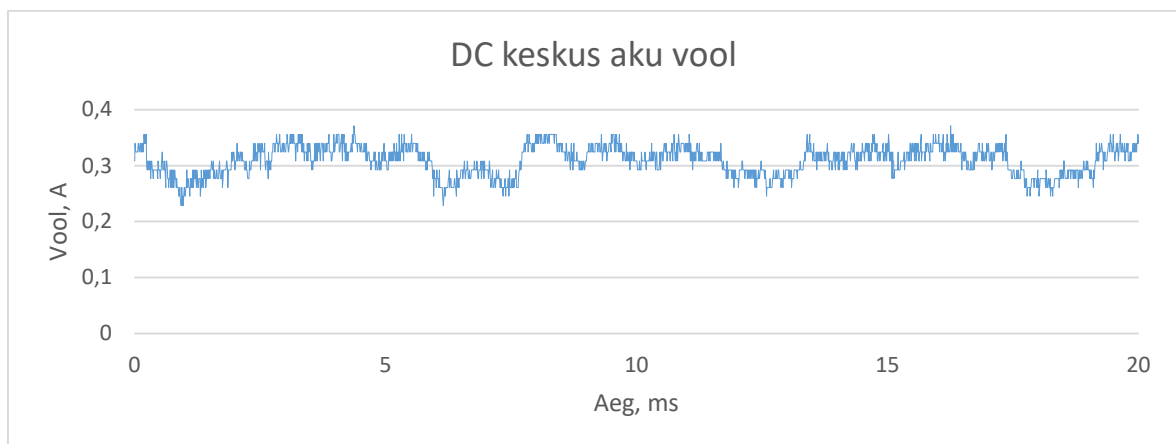


Joonis 3.2 Vahelduvvoolukeskuse faasivoolud

Alalisvoolukeskuses viidi pinge mõõtmised läbi alalisvoolukeskuse latil ja voolu mõõtmised akude fiidris. Saadud tulemused on kujutatud graafikutena joonistel 3.3 ja 3.4. Mõõtmistest selgus, et alalisvoolukeskuse pinge mõõdetud tulemused jäid ühtlaselt vahemikku 124-126 V. Akude laadimisvool oli akude tavatalituse korral keskmiselt 300 mA.



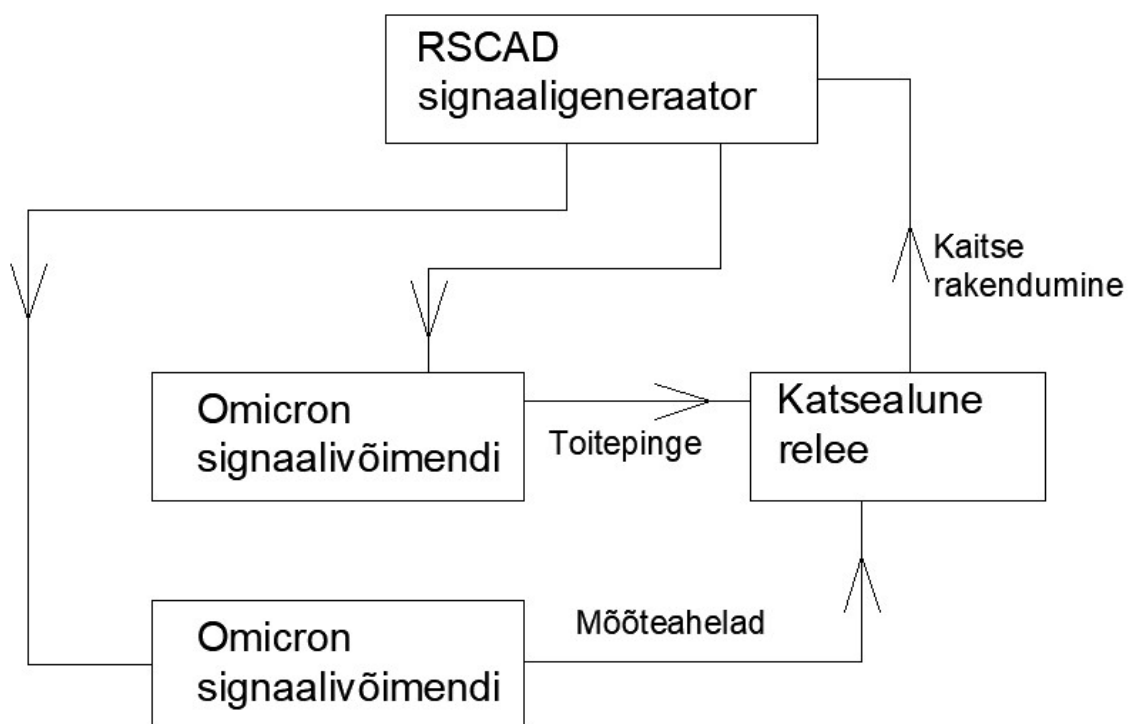
Joonis 3.3 Alalisvoolukeskuse pinge



Joonis 3.4 Alalisvoolukeskuse aku laadimisvool

3.2 Katsemeetod

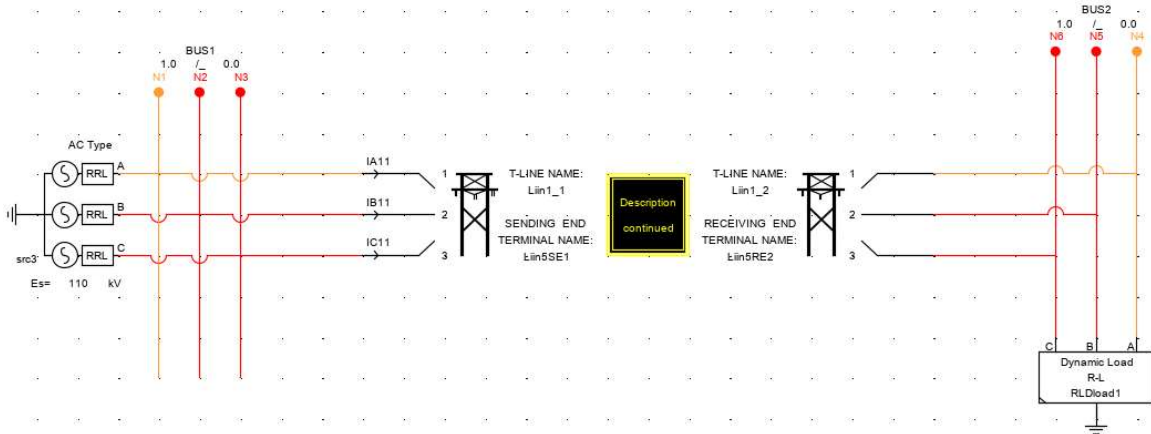
Katsete sooritamisel seati eesmärgiks tuvastada, kas ja millisel määral mõjutab toitepinge langus alajaama releseadmete lühise tuvastamise ja väljalülitamise käsu andmise võimet. Uuriti erinevate tootjate seadmete puhul erinevate kaitsefunktsioonide toimimist. Katset teostati läbi *Omicron 356* [17] võimendite, mille abil oli võimalik simulatsioonis saavutatud lühisvoolud ja -pinged rakendada otse kaitsereleele. Joonisel 3.5 on kujutatud põhimõtteline skeem kaitsereleede katsetamise käigust.



Joonis 3.5 Katseseadme põhimõtteline skeem

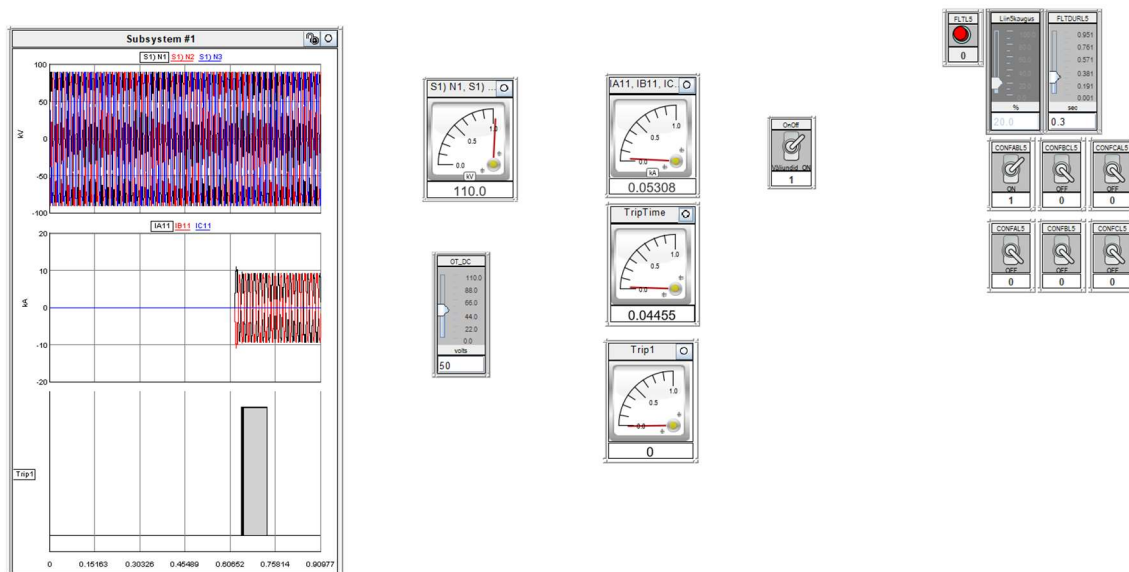
Katses vaadeldav simuleeritav 110 kV võrk koosneb toiteallikast, tarbijast ja neid ühendavast elektriliinist. Katse käigus simuleeriti programmiga *RSCAD* [18] lühist etteantud liini erinevatel pikkustel. Programm võimaldas lisaks lühisekoha valimisele määrata ka väljalülituse rakendumise ajalise viite. Seetõttu oli katseliselt võimalik määrata, kas toitepinge langemisel on mõju lühise tuvastamisele ja ka väljalülituse rakendumise ajalisele viitele. Katseid viidi läbi distantskaitsete puhul 5% sammudena üle kogu liini pikkuse. Iga liini pikkuse juures viidi läbi katsed pinget samm haaval langetades kuni relele enam ei toiminud. 110 V toitepingega seadmete puhul oli pingel langetamise samm 5 V ja 220 V toitepingega seadmete puhul 10 V.

Järgnevalt on kujutatud läbi viidud simulatsioon simuleerimisprogrammi *RSCAD* keskkonnas. Joonisel 3.6 on kujutatud simuleeritava võrgu skeem. Jooniselt on näha latil BUS1 liini toitev generaator ja latil BUS2 koormus. Kaks latti on omavahel ühendatud liiniga, millel lühist simuleeritakse.



Joonis 3.6 Simuleeritava võrgu testmudel RSCAD keskkonnas

Joonisel 3.7 on kujutatud lühisesimulatsiooni keskkonda. Joonise paremas servas paiknevad lülitid, millega on võimalik määrata lühise kestus sekundites ja lühise asukoht protsentides liini pikkusest. Samuti on lülititega võimalik määrata lühise iseloom, mis antud joonisel on määratud faaside A-B vahelise lühisena. Joonise keskel on kujutatud voolu ja pinget hetkväärtused, väljalülitamise käsu rakendumise mõõdetud viide ja relee määratud toitepinge. Joonise vasakus servas on näha mõõdetud pinget, voolu ja lühise väljalülitamise käsu graafikud ajas. Antud jooniselt on näha, et väljalülitamise käsk *Trip1* lõpeb ära enne lühisvoolu lõppemist. Selle põhjuseks on relee väljalülitumine.



Joonis 3.7 Läbiviidud lühisesimulatsioon RSCAD keskkonnas

Tabelis 3.1 on kujutatud simulatsioonis kasutatava liini aktiiv- ja reaktiivtakistused.

Tabel 3.1 Liini parameetrid simulatsioonis

	Aktiivosa	Reaktiivosa
Pärijärgnevus takistus, Ω	3,86	9,64
Nulljärgnevus takistus, Ω	7,28	33,56

Tabelis 3.2 on kujutatud simulatsioonis kasutatava võrgu põhiparameetrid.

Tabel 3.2 Võrgu põhiparameetrid simulatsioonis

Parameeter	Väärtus
Nimipinge, kV	110
Võrgu sagedus, Hz	50

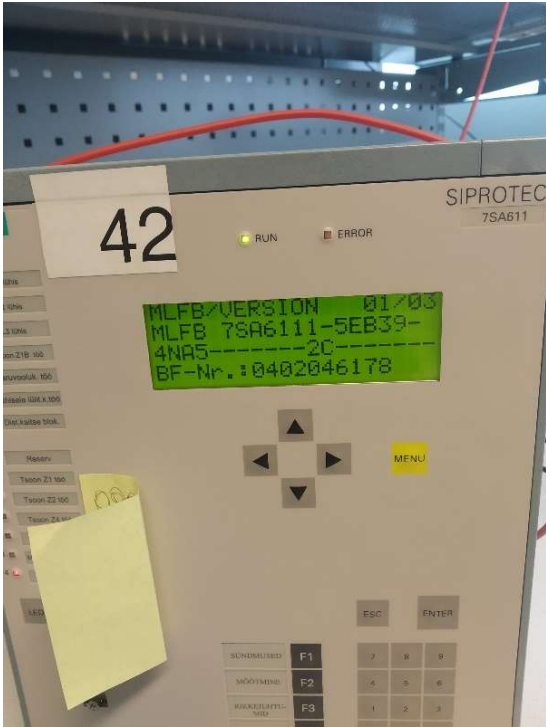
3.3 Katsealused seadmed

Katsed viidi läbi kaitserleedega kolmelt erinevalt tootjalt. Katsealused releed valiti tootjatelt Siemens, Toshiba ja ABB. Valik tehti selline tagamaks võimalikult erikülgete releede kajastamise katsetes. Samuti on tegemist Eesti elektrivõrgus kasutusel olevate tootjate releedega. Tabelis 3.3 on kujutatud vaadeldavate seadmete tootjad ja täpsemad nimetused.

Tabel 3.3 Katsealused releekaitse terminalid

Tootja	Toshiba	ABB	Siemens
Nimetus	GRL200	REF 620	7SA611

Joonistel 3.8, 3.9 ja 3.10 on kujutatud kolme katsetes kasutatud releekaitse terminali. Seadmed Siemens ja Toshiba laenati Tallinna Tehnikaülikooli laborist. ABB terminal laenati väljastpoolt kooli. Katsete käigus on seadmetele antud nimetused kaitserelee 1, kaitserelee 2 ja kaitserelee 3, vältimaks tulemuste seostamist ühegi konkreetse seadmega.



Joonis 3.9 Katsealune Siemens 7SA611



Joonis 3.8 Katsealune Toshiba GRL200



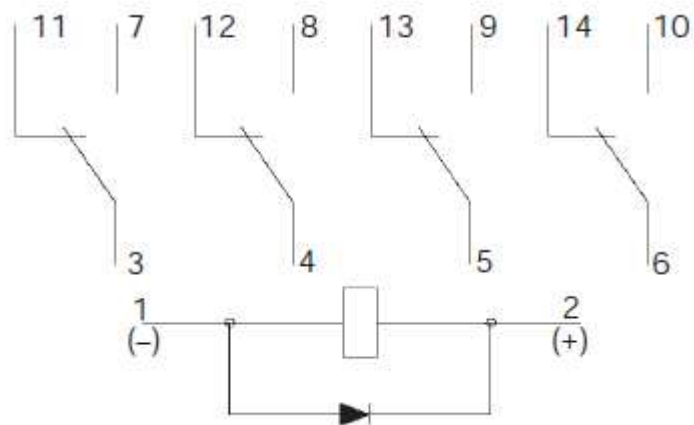
Joonis 3.10 Katsealune ABB REF 620

Samuti viidi läbi katsed kahe, erineval toitepingel toimiva väljalülitamisahela vahereleega Arteche RF4R, tuvastamaks, millisest toitepingest alates relee enam ei rakendu. Tabelis 3.4 on välja toodud katsealuste vahereleede nimiaandmed. [19]

Tabel 3.4 Katsealused väljalülitamisahela vahereleed

Tootja	Arteche	Arteche
Nimetus	RF4R	RF4R
Nimitoitepinge U_n, V	110	220
Lubatud pinge	+10% -20% U_n	+10% -20% U_n
Rakendumiskiirus, ms	20	20

Joonisel 3.11 on kujutatud Arteche RF4R vaherelees askeem. Jooniselt on näha seadme pooli klemmid ja seadme nelja ümberlülitasi asendikontaktid.



Joonis 3.11 Katsealuste vahereleede Arteche RF4R askeem [19]

3.4 Katsetulemused

Selles peatükis võetakse kokku katsetulemused seadmete kaupa. Iga seadme katsetulemused on paigutatud eraldi alapeatükki. Seejärel koostatakse alapeatükkide lõpus lühikokkuvõtte katse tulemustest ja tähelepanekutest.

Distantskaitsete katsetulemusi kujutatakse kolmel graafikul. Esmalt on ühel graafikul kokku võetud lühise lahutamise aja sõltuvus lühise asukohast erinevatel toitepingetel. Selle pildi järgi on võimalik saada kiire kergesti mõistetav ülevaade katse käigust. Seejärel on täpsema ülevaate saamiseks katsetulemused jagatud kahte ossa: kiirema tsooni tulemused ja aeglasema tsooni tulemused. Nendel graafikutel on kujutatud lühise lahutamise aja sõltuvust relee toitepingest erinevate lühise asukohtade juures. Selline lähenemine võimaldab lihtsamini tuvastada sõltuvust lühise lahutamise aja ja relee toitepinge vahel.

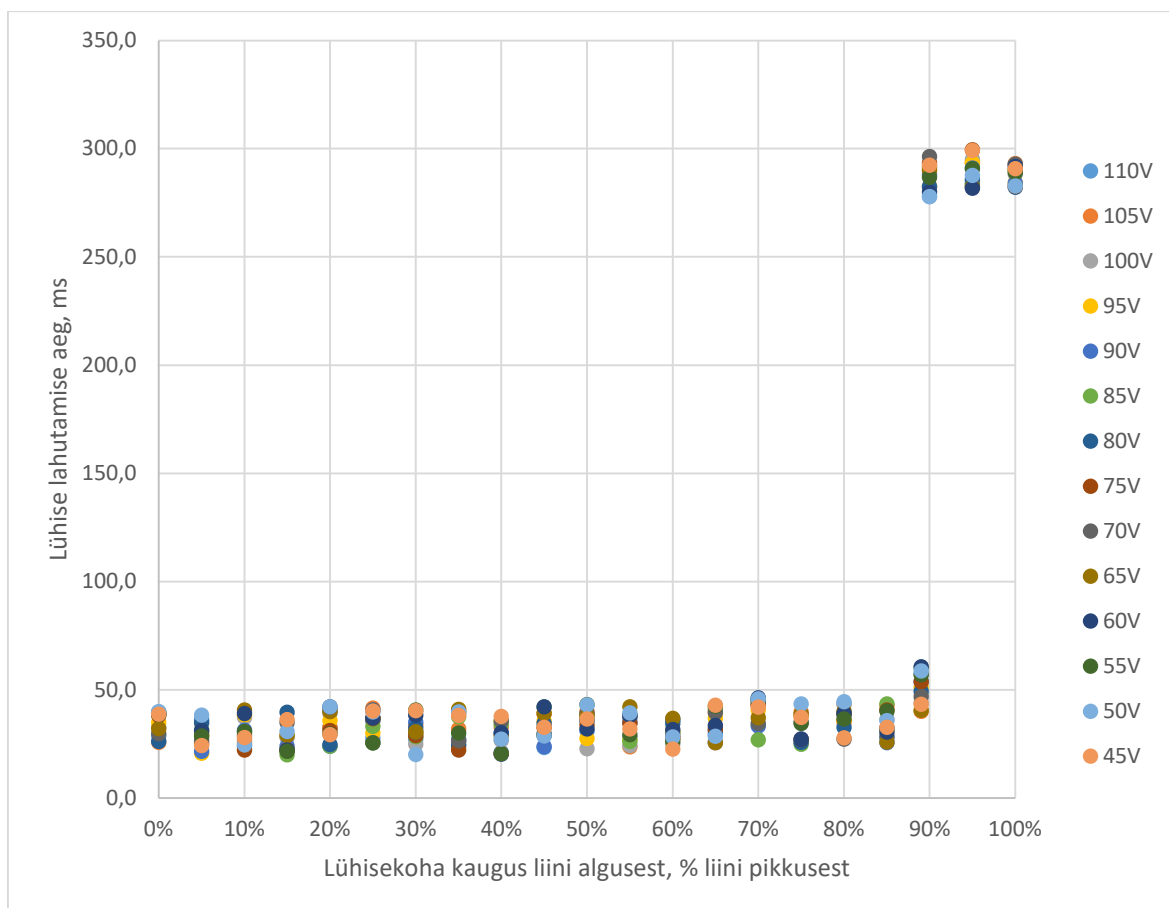
Kaitserellee 1

Kaitserellee 1 puhul uuriti relee distantskaitse funktsiooni toimimist faas-faas ja faas-maa tüüpi lühiste korral. Selleks kasutati läbi programmi *RSCAD* simuleeritud lühiseid liini erinevatel pikkustel. Releesse olid eelnevalt sisestatud sätted nii, et osa liini pikkusest olid kaetud esimese tsooniga, mille viide on 0 ms ja ülejäänud liin teise tsooniga, mille viide on 250 ms. Katsetulemused tabelite kujul on toodud välja töö lisas.

Katsete käigus tutvuti relee toimimisega toitepinge alumisel piiril. Katsealuse kaitserellee 1 puhul leiti, et relee on võimeline lühist välja lülitama probleemideta kuni toitepingeni 46 V. Sellest allapoole liikudes on relee veel võimeline lülitama, aga lülituse kestus on 50-100 ms ja selle järel lülitub relee välja ning enam ei käivitu. Toitepinge langedes alla 44 V lülitub relee välja.

1. Distantkaitse faas-faas lühis

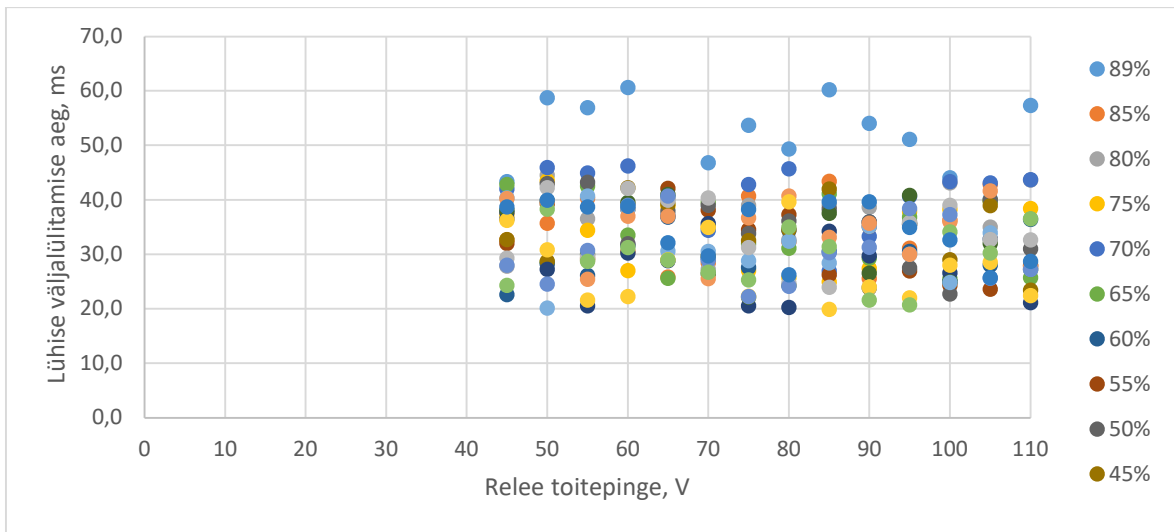
Joonisel 3.12 on kujutatud kokkuvõtavad katsetulemused faas-faas lühiste korral. Eri värvidega on toodud eri toitepinged.



Joonis 3.12 Lühise väljalülitamise ajalise viite sõltuvus lühise asukohast erinevatel toitepingetel

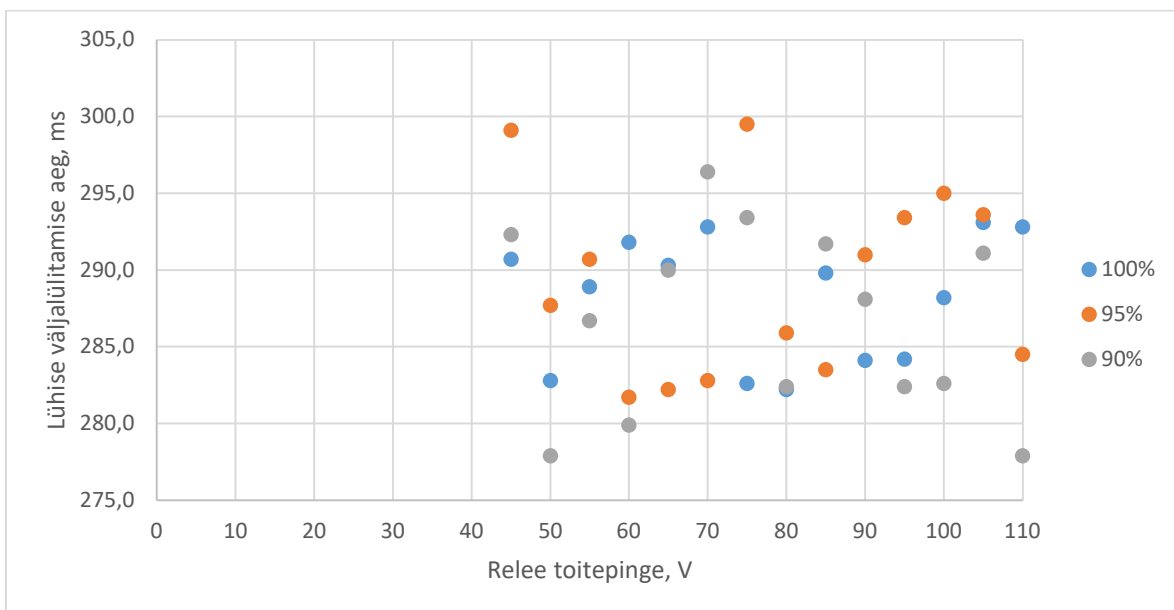
Faaside vahelise lühise tulemuste täpsemaks uurimiseks jagati tulemused kahte ossa: kiirema tsooni lühised, viitega 0 ms ja aeglasema tsooni lühised, viitega 250 ms. Võrreldes aeglasema tsooni väljalülitusaega eri toitepingetega, selgub, et otsest seost toitepinge ja lühise väljalülitamise aja vahel ei ole. Samas on märgata, et keskmisest suuremad väljalülitusajad esinevad liini kaugusel 89% ehk kahe tsooni ülemineku piiril. Kui kõikide aeglasema tsooni keskmine lühise väljalülitusaeg on arvutuslikult 33,9 ms, siis liini kaugusel 89% on keskmine väljalülitusaeg 51,2 ms.

Joonisel 3.13 on välja toodud graafik kiirema tsooni katsetulemustega, kus on eri värvidega toodud ära erinevate lühisekohtade kaugused, protsentides liini kogupikkusest.



Joonis 3.13 Kiire tsooni lühisekoha väljalülitamise viite sõltuvus relee toitepingest erinevatel kaugustel

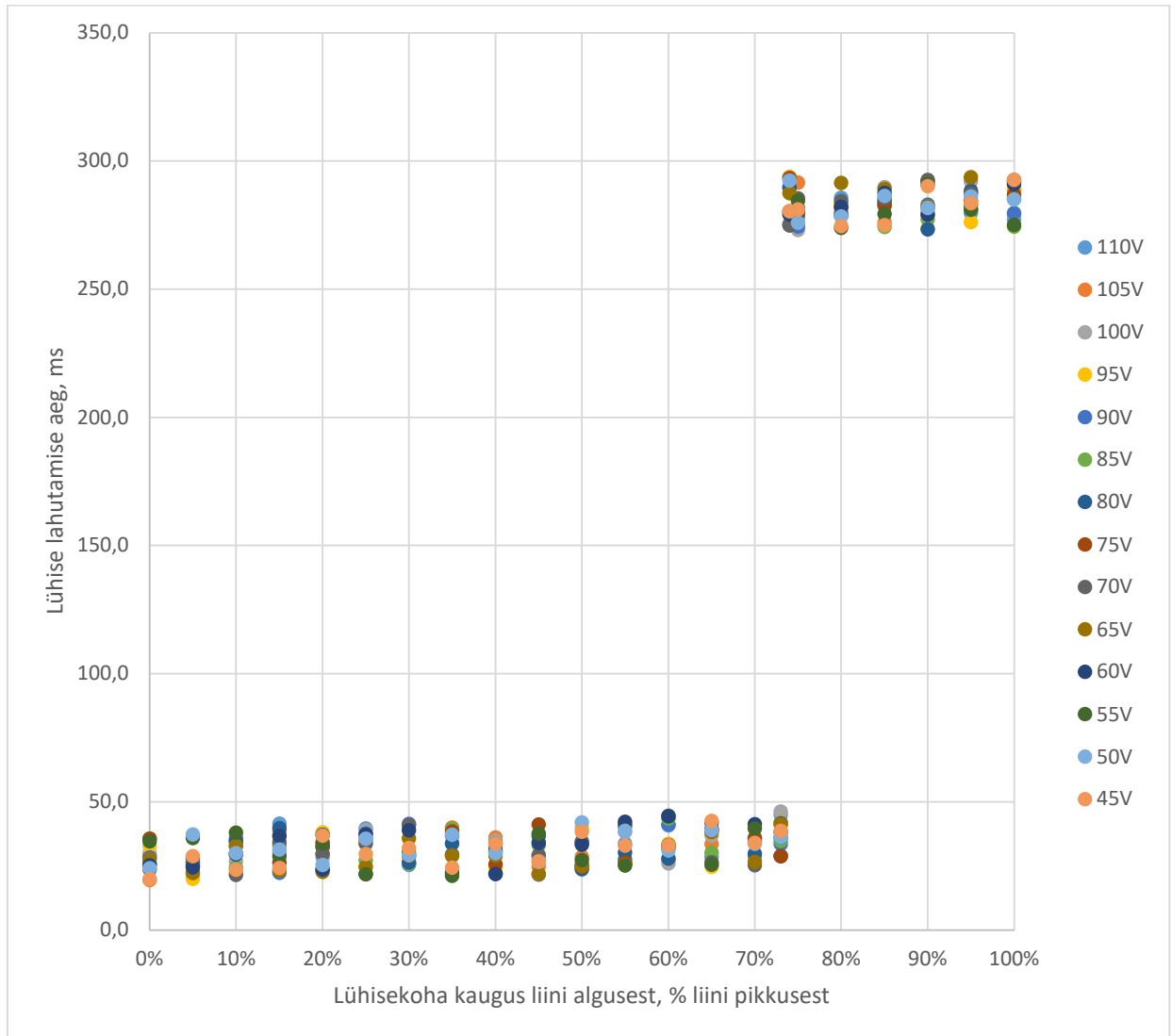
Aeglasema tsooni lühise väljalülitamise ajalise viite suhtes relee toitepingesse silmnähtavaid mustreid ei esine. Joonisel 3.14 on graafikul need tulemused välja toodud.



Joonis 3.14 Aeglasema tsooni lühise väljalülitamise ajalise viite sõltuvus relee toitepingest erinevatel kaugustel

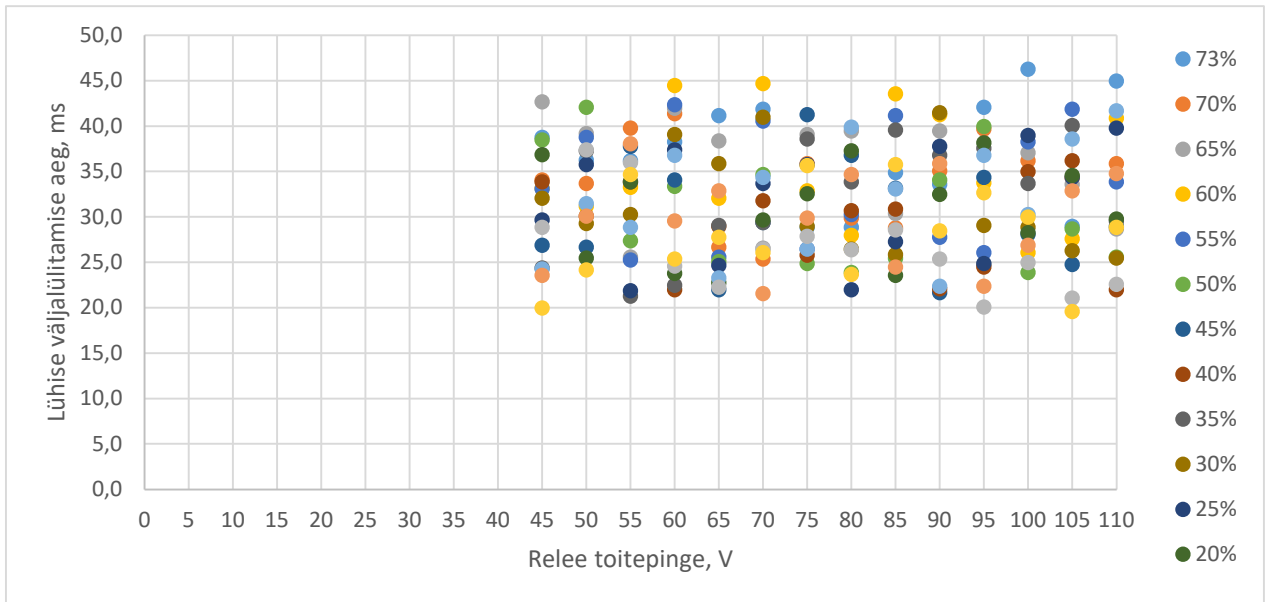
2. Distantkaitse faas-maa lühis

Distantkaitsega viidi läbi ka faas-maa lühise simulatsioon. Faas-maa lühised erinevad releekaitse faaside vahelisest lühisest selle poolest, et relees sooritatakse ka nulljärgnevus voolu kompenseerimine. Joonisel 3.15 on kokku võetud lühise väljalülitamise aja sõltuvus lühisekoha asukohast erinevatel toitepingetel.

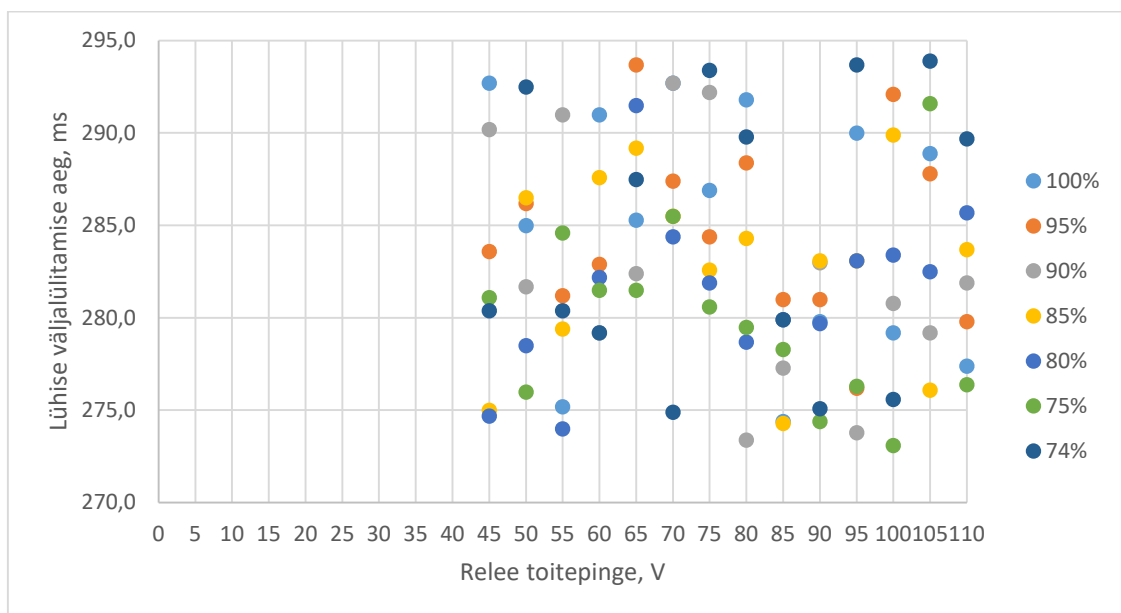


Joonis 3.15 Distantkaitse faas-maa lühise väljalülitamise ajalise viite sõltuvus lühisekoha asukohast erinevatel toitepingetel

Joonisel 3.16 on kujutatud katse käigus läbi viidud distantsskaitse kiire tsooni faas-maa lühise katsetulemused, kus y-teljel on lühise väljalülitamise aeg ja x-teljel on rele toitepinge. Joonisel 3.17 on kujutatud sellesama katse aeglase tsooni katsetulemused. Mõlemalt graafikult on näha, et pinge langedes süstemaatilist muutust lühise väljalülitamise ajas ei esine. Samuti on näha, et toitepingega 40 V rele enam lühistele ei reageeri.



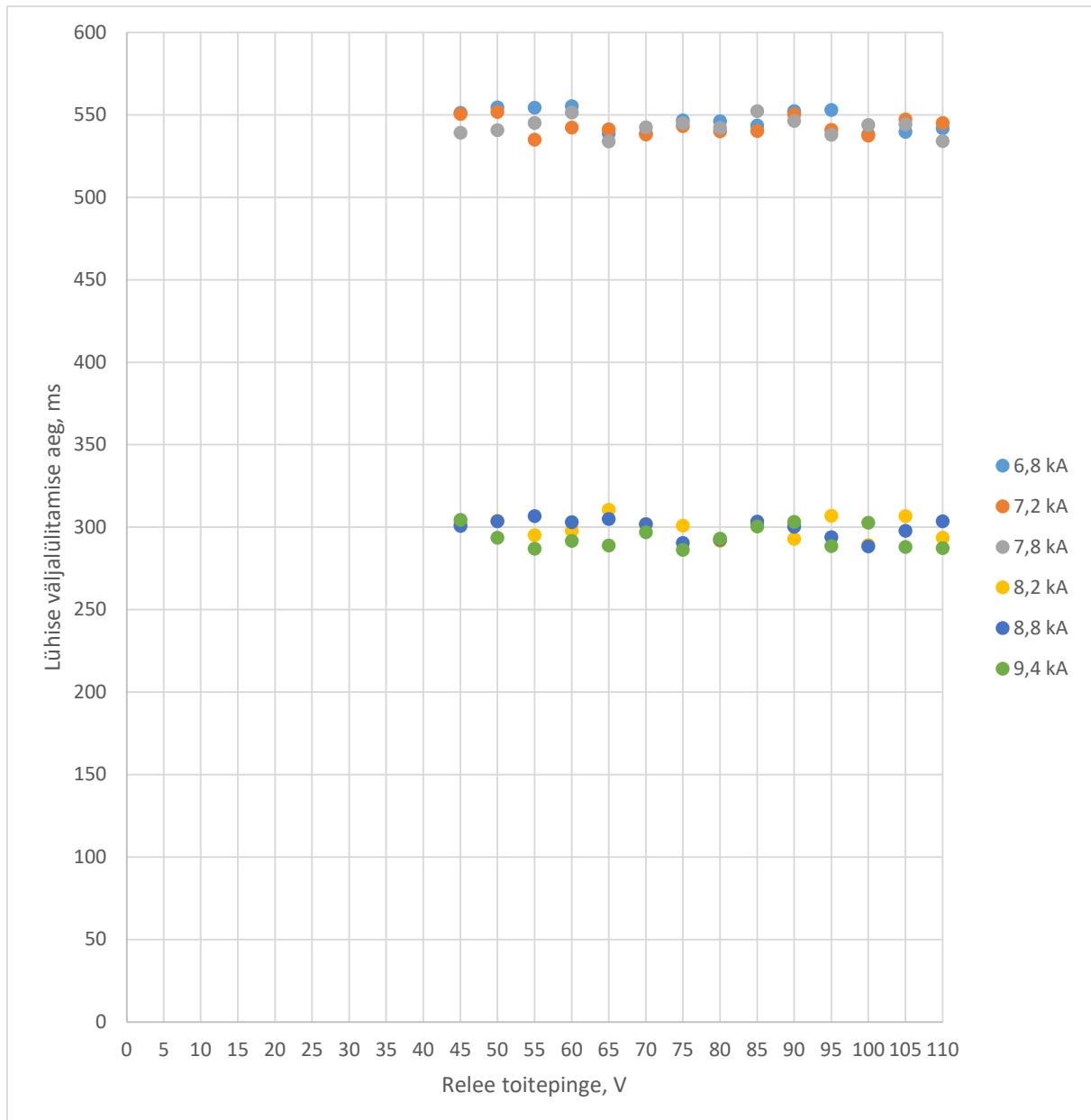
Joonis 3.16 Kiire tsooni lühisekoha väljalülitamise viite sõltuvus rele toitepingest erinevatel kaugustel



Joonis 3.17 Aeglase tsooni lühisekoha väljalülitamise viite sõltuvus rele toitepingest erinevatel kaugustel

3. Liigvoolukaitse

Releega viidi läbi ka suunamata voolukaitse toime uurimine. Selleks kasutati sama simulatsiooni, määrates selleks katseliselt lühisvoolude suurused erinevatel liini kaugustel. Joonisel 3.18 on kokku võetud kiirema ja aeglasema voolukaitse astme toime erinevatel toitepingetel. Kiirema astme ajaliseks viiteks on määratud 250 ms ja aeglasema astme ajaliseks viiteks on määratud 500 ms. Graafikult paistab, et releekaitse toimib ühtlaselt kuni toitepinge langemiseni alla 45 V.



Joonis 3.18 Liigvoolukaitse lühise lülitamise aja sõltuvus relee toitepingest

Liigvoolukaitsega viidi läbi ka katse tuvastamiseks toitepinge mõju kaitserelle toimele lühise lülitamise ja mittelülitamise piiril. Selleks jäeti töösse vaid voolukaitse kiirem tsoon ja aeglasem tsoon viidi tööst välja. Seega peab lühise lülitamine leidma aset vaid siis, kui lühisvool ületab 8 kA. Viidi läbi katse 1 ja katse 2 lühisvooluga 7,8 kA ja katse kolm ja katse neli lühisvooluga 8,2 kA. Voolukaitse viiteks määrati 250 ms. Tabelis 3.5 on kokku võetud katsetulemused.

Tabel 3.5 Kaitserelle 1 liigvoolukaitse katsetulemused lühise mittelülitamise piiri katsel

Toitepinge, V	Lühise lahutamise aeg, ms			
	Katse 1	Katse 2	Katse 3	Katse 4
110	Ei lülita	Ei lülita	304,6	311,0
105	Ei lülita	Ei lülita	298,8	306,7
100	Ei lülita	Ei lülita	296,0	295,0
95	Ei lülita	Ei lülita	297,2	292,4
90	Ei lülita	Ei lülita	300,5	292,9
85	Ei lülita	Ei lülita	300,3	291,2
80	Ei lülita	Ei lülita	303,7	297,6
75	Ei lülita	Ei lülita	304,6	295,9
70	Ei lülita	Ei lülita	295,1	296,8
65	Ei lülita	Ei lülita	292,8	306,5
60	Ei lülita	Ei lülita	299,1	291,6
55	Ei lülita	Ei lülita	298,5	293,2
50	Ei lülita	Ei lülita	296,6	310,6
45	Ei lülita	Ei lülita	306,4	294,9
40	-	-	-	-

Kokkuvõte

Kaitserelleega 1 läbi viidud katsete tulemused näitavad, et rele toomis ühtlaselt pinge langemisel nimipingelt minimaalse lubatud toitepingeni, mis on toodud tabelis 2.1. Rele toomis probleemideta kuni toitepingeni 46 V ja reageeris lühistele ka kuni pingeni 44 V. Seost toitepinge langemise ja lühise lülitamise kvaliteedi vahel ei tuvastatud.

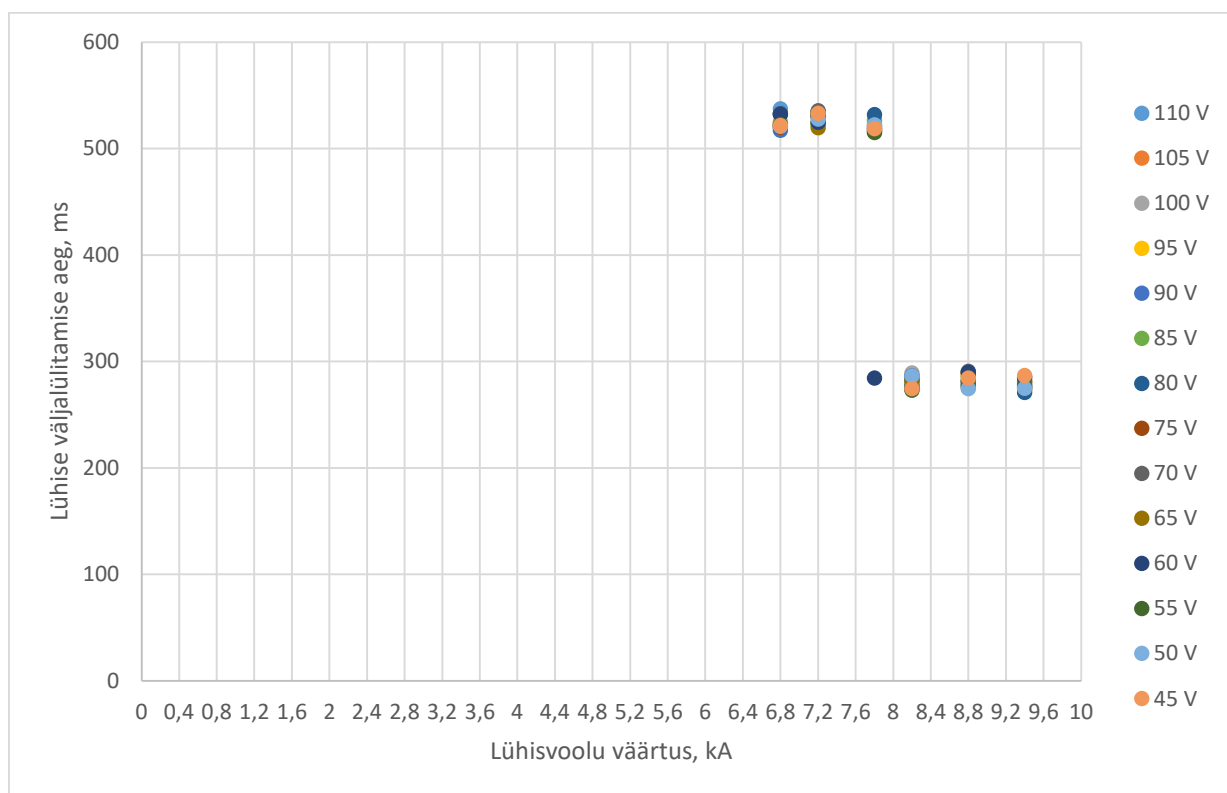
Kaitserelle 2

Kaitserelleega 2 viidi läbi ainult voolukaitse funktsiooni testimine. Distantkaitse funktsioone katsealusel releel ei olnud ja seega ei olnud võimalik neid ka katsetada. Voolukaitse testimisel viidi läbi kaks katset. Esmalt uuriti kaitse toimimist kiirema ja aeglasema tsooni vahel, kus kiirem tsoon oli määratud sättega 8 kA ja 250 ms ning aeglasema tsooni viiteks oli määratud 500 ms.

Relee katsetest selgus, et volt haaval pinge langemisel toimib relee tõrgeteta kuni pingeni 48 V. Alates 47 V toitepingest suudab relee küll lühise lahutada, kuid lülitub selle peale välja ja hakkab korduvalt sooritama ebaedukaid taaskäivitamisi ehk relee normaalset talitust enam ei taasta. Märkimist väärib, et pingevahemikus 47-46 V suudab relee taaskäivitamise protsessi ajal samuti mõnikord lühist lülitada, sõltuvalt, millises käivitumise etapis relee on. Pinge langedes 45 V peale relee enam ühelegi lühisele ei reageeri ja jätkab ebaedukaid taaskäivitamisi. Relee kustub täielikult 35 V peal.

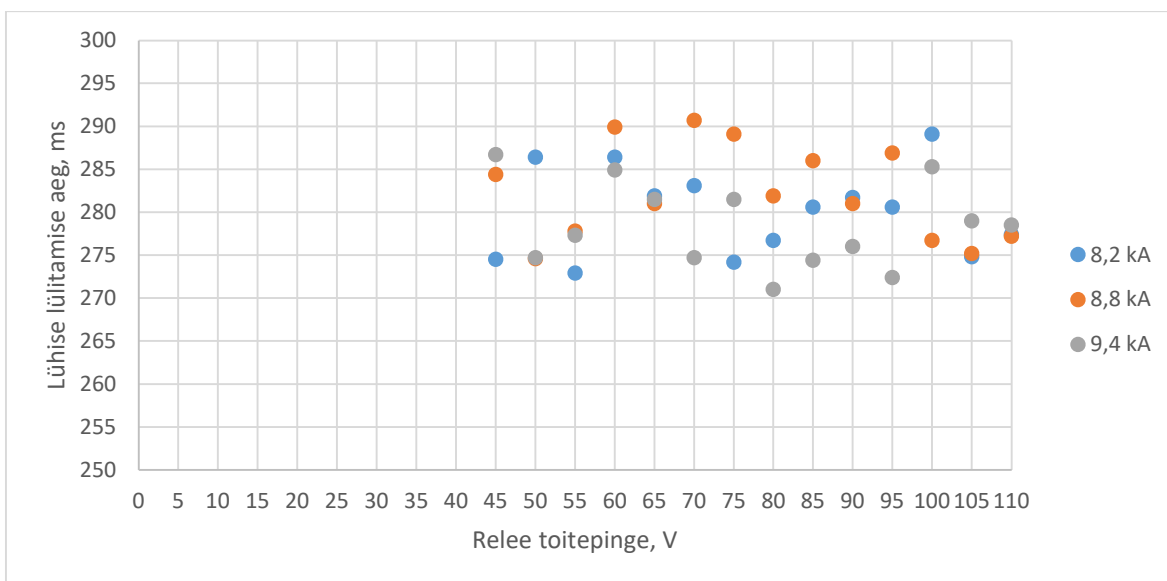
Liigvoolukaitse

Relee voolukaitse testimiseks viidi läbi katsed järgnevatel lühisvooludel: 9,4 kA; 8,8 kA; 8,2 kA; 7,8 kA; 7,2 kA; 6,8 kA. Voolukaitse kiirema ja aeglasema astme vaheline piir oli 8 kA. Joonisel 3.19 on kujutatud lühise väljalülitamise aja sõltuvus lühisvoolust erinevate toitepingete juures. Graafikult selgub, et üldjoontes eristuvad kaks tsooni üksteisest hästi. Samas on näha üht esinenud anomaaliat 60 V relee toitepinge juures, kus aeglasemas astmes tehtud lühis rakendus kiirema astme viitega. Joonistel 3.20 ja 3.21 on katsed astmete kaupa täpsemalt kujutatud.



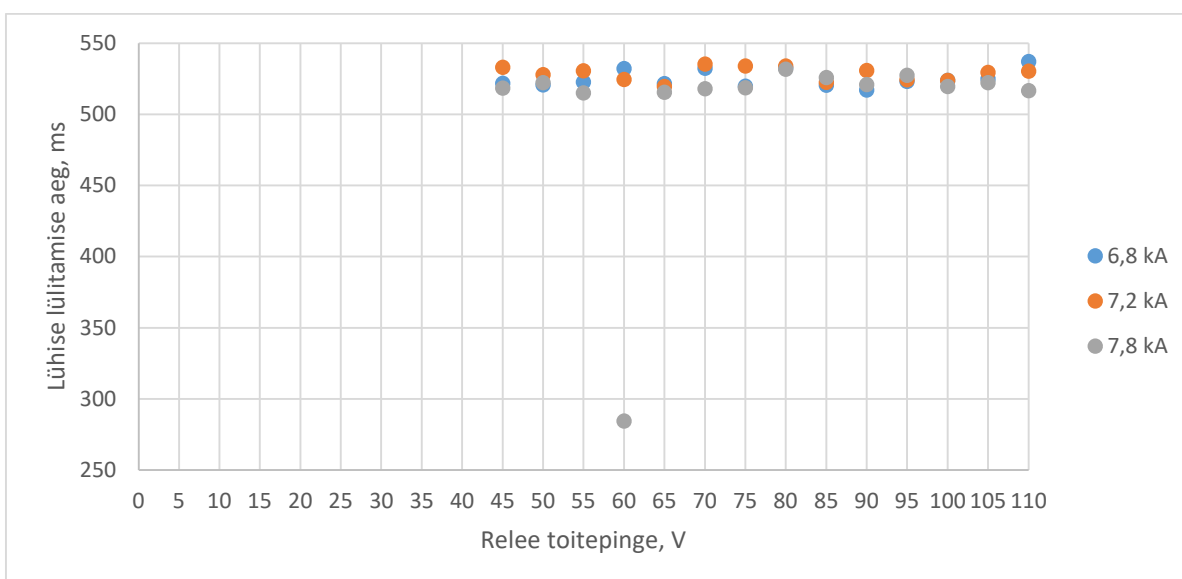
Joonis 3.19 Voolukaitse lühise väljalülitamise kiiruse sõltuvus lühisvoolust erinevatel toitepingetel

Jooniselt 3.20 on näha, et kiirema astme katsetulemused olid erinevate toitepingete lõikes ühtlased ja trende või iseärasusi märgata ei ole. Kõik lühise lülitamise ajad jäid vahemikku 291-271 ms. Voolukaitse kiirema astme viide oli relees määratud 250 ms.



Joonis 3.20 Voolukaitse kiire astme lühise väljalülitamise aja sõltuvus seadme toitepingest erinevate lühisvoolude korral

Jooniselt 3.21 on näha, et aeglasema astme lülitamisajad jäid üldiselt vahemikku 540-515 ms. Aeglasema astme voolukaitse ajaline viide oli relees määratud 500 ms. Ühe erandina oli 7,8 kA tehtud katse 60 V toitepinge juures, mis rakendus viitega 284 ms. See tähendab, et sellel juhul rakendus kaitse kiirema tsooni viitega.



Joonis 3.21 Voolukaitse aeglase astme lühise lülitamise aja sõltuvus toitepingest erinevate lühisvoolude korral

Sarnaselt kaitseraleega 1 viidi ka kaitseralee 2 liigvoolukaitse funktsiooniga läbi katsed lühise lülitamise ja mittelülitamise piiril. Kaitsetsäteteks oli sarnaselt kaitseraleega 1 määratud 8 kA ja katsed viidi läbi vooludega 7,8 kA ja 8,2 kA. Voolukaitse viiteks määrati 250 ms. Katsetulemused on toodud tabelis 3.6. Katsetulemustest selgus, et toimus üks liigne lülitamine toitepingel 60 V.

Tabel 3.6 Kaitseralee 2 liigvoolukaitse katsetulemused lühise mittelülitamise piiri katsel

Toitepinge, V	Lühise lahutamise aeg, ms			
	Katse 1	Katse 2	Katse 3	Katse 4
110	Ei lülita	Ei lülita	284,6	284,3
105	Ei lülita	Ei lülita	280,5	270,2
100	Ei lülita	Ei lülita	282,7	273,7
95	Ei lülita	Ei lülita	280,4	278,5
90	Ei lülita	Ei lülita	274,4	287,9
85	Ei lülita	Ei lülita	275,5	270,3
80	Ei lülita	Ei lülita	283,9	280,2
75	Ei lülita	Ei lülita	270,3	284,0
70	Ei lülita	Ei lülita	271,6	281,5
65	Ei lülita	Ei lülita	281,9	277,4
60	Ei lülita	283,5	273,6	288,5
55	Ei lülita	Ei lülita	275,8	2768,0
50	Ei lülita	Ei lülita	284,7	278,8
45	Ei lülita	Ei lülita	280,9	284,6
40	-	-	-	-

Kokkuvõte

Kaitseralee 2 katsete käigus toimis relee lubatud toitepinge piires vigadeta (vt Tabel 2.1). Relee toimib üldjoontes kõrvalekalleteta ka kuni toitepingeni 48 V. Kui toitepinge langeb alla selle, on relee võimeline veel ühekordselt lühist lahutama toitepingeni 45 V, millest allapoole langedes relee enam lühisele reageerida ei suuda. Katsete käigus tuvastati kaitsefunktsiooni vale toimimine, kui 60 V toitepinge juures rakendus aeglasem astme lühise juures ekslikult kiire astme voolukaitse. Samuti esines toitepinge 60 V juures üks relee liigne lülitumine.

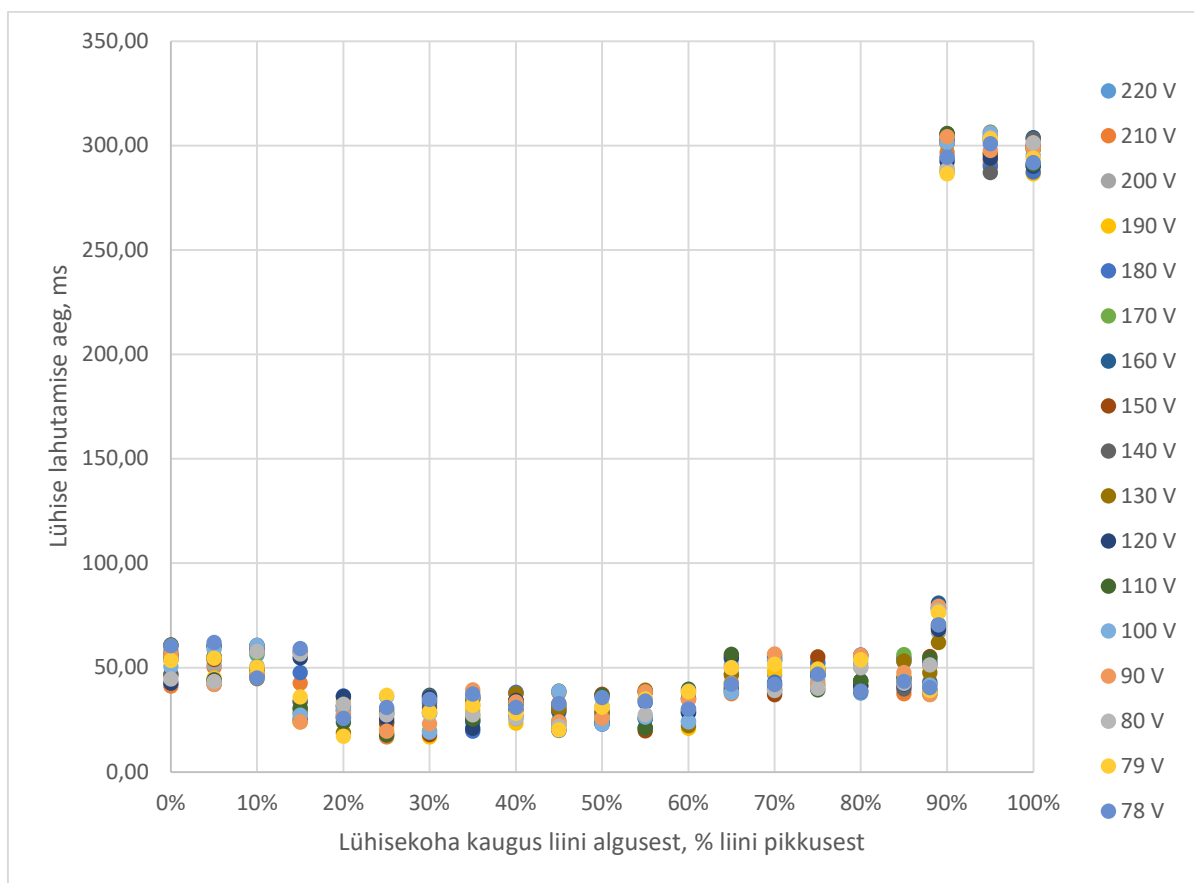
Kaitseralee 3

Kaitseralee 3 puhul uuriti sarnaselt kaitseraleega 1 distantkaitse funktsiooni toimimist. Samuti vaadeldi ka liigvoolukaitse toimimist. Distantkaitse korral uuriti kaht tsooni, millest kiirem oli ajasättega 0 ms ja aeglasem ajasättega 250 ms. Voolukaitse katsetel oli voolukaitse kiirema astme viiteks valitud 250 ms ja aeglasema astme viiteks valitud 500 ms. Katsetulemused on tabelite kujul välja toodud töö lisas.

Katsete käigus tutvuti relee toimega toitepinge madalaimatel astmetel. Selgus, et alates toitepingest 79 V lülitub relee lühise lülitamise peale välja, kuid sooritab eduka taaskäivituse. Alates toitepingest 77 V relee enam ei toimi ja see hakkab sooritama ebaedukaid taaskäivitumisi. See tähendab, et peale relee väljalülitumist hakkab relee taaskäivituma, kuid enne lõpliku käivitumist lülitab end taas välja.

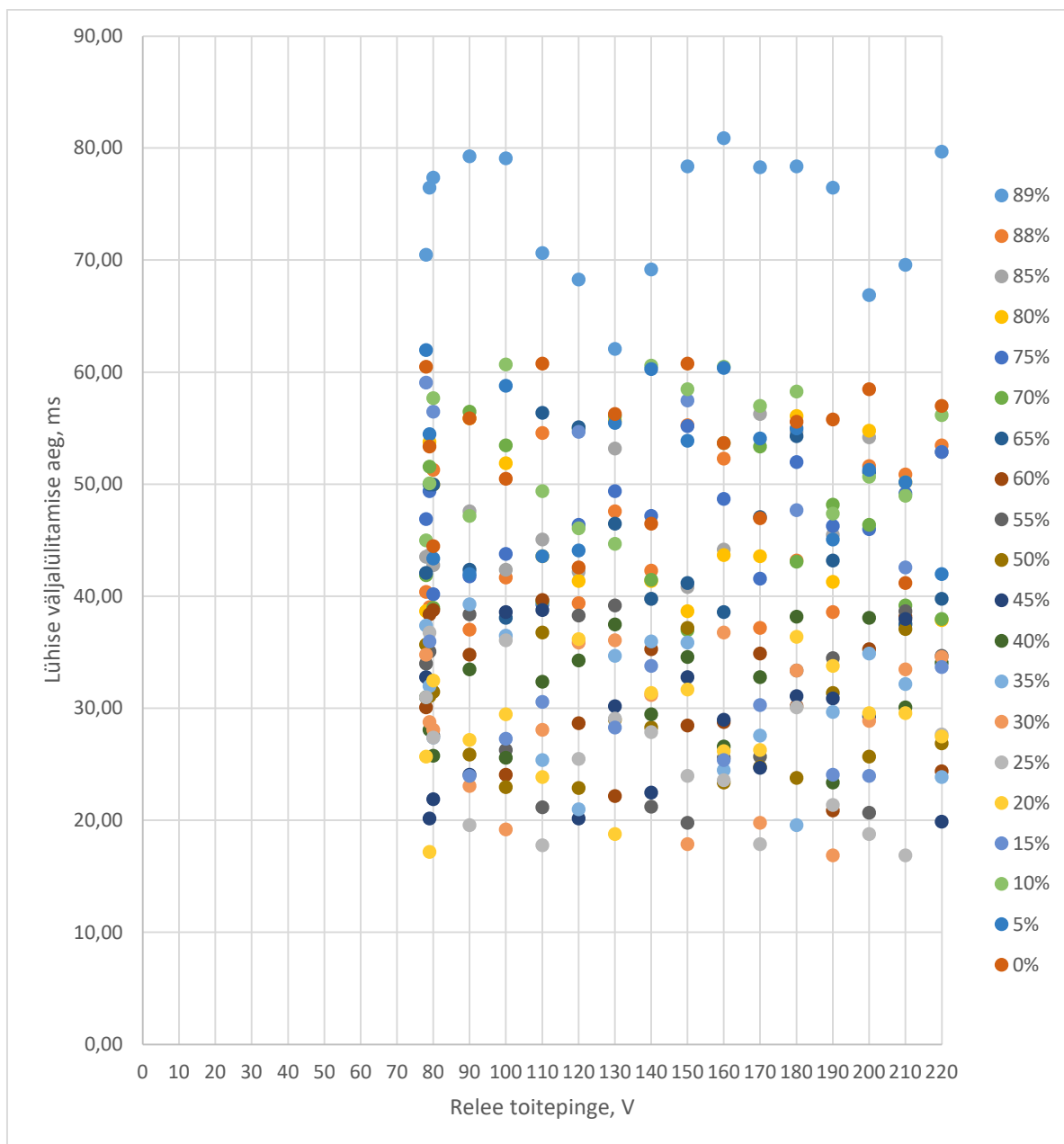
1. Distantkaitse faas-faas lühis

Joonisel 3.22 on kujutatud kokkuvõttev graafik distantkaitse faasidevahelise lühise katsetulemustest. Y-teljel on kujutatud lühise väljalülitamise aeg ja x-teljel on kujutatud lühisekoha asukoht. Graafikult on näha, et 90% liini pikkuse juures paikneb tsoonide vahe. Samuti on graafikult näha, et kiire tsooni keskkohas, vahemikus 20%-60% liini pikkusest toimub lühise lülitamine kiiremini kui kiirema tsooni alguses ja lõpus.



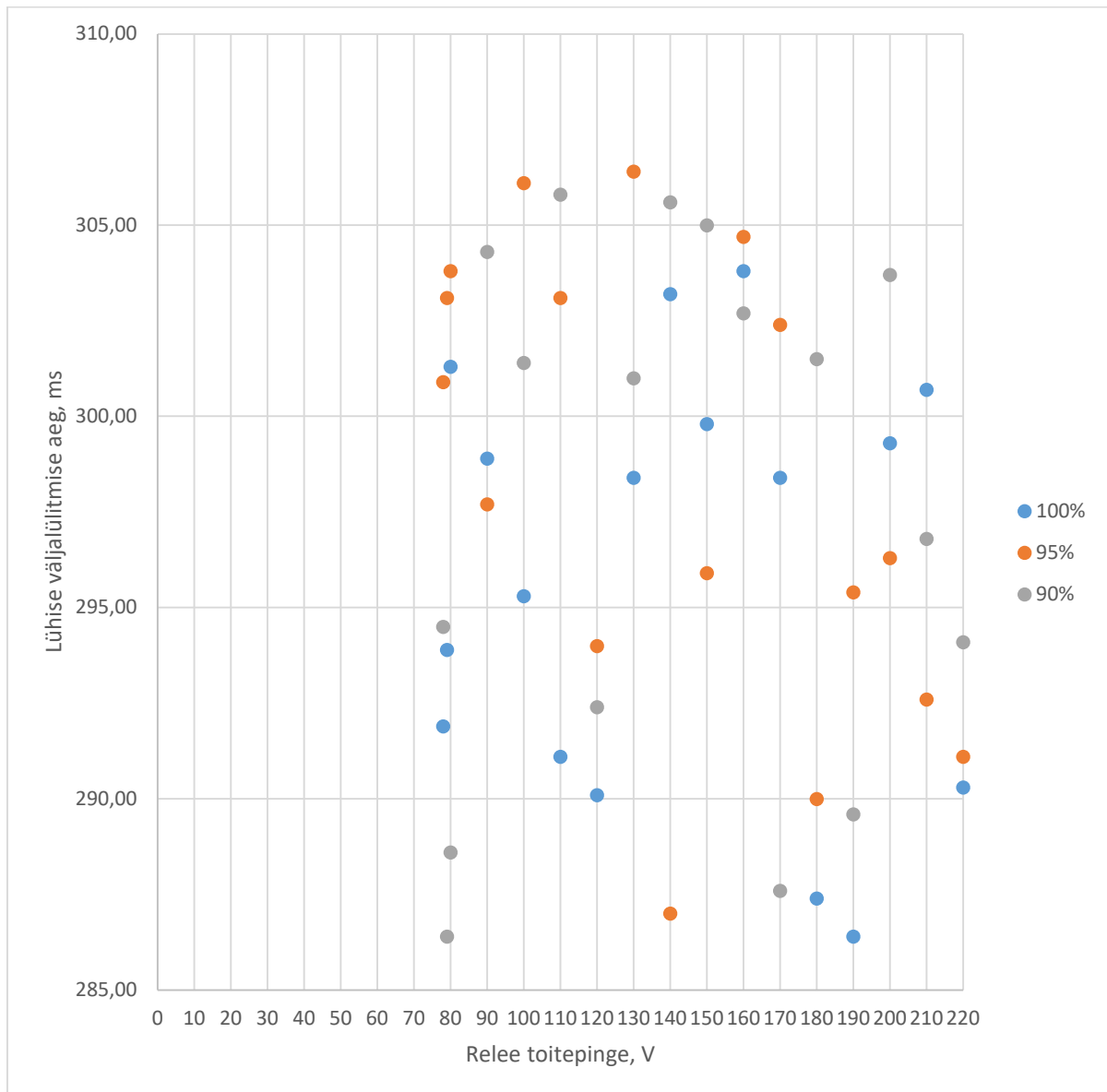
Joonis 3.22 Lühise väljalülitamise ajalise viite sõltuvus lühise asukohast erinevatel toitepingetel

Joonisel 3.23 on näha distantsskaitse kiire tsooni faas-faas tüüpi lühise väljalülitamise aja sõltuvus relee toitepingest. Graafikult ei paista selgeid trende lühise lahutamise aja ja relee toitepinge seose tuvastamiseks.



Joonis 3.23 Kiire tsooni lühisekoha väljalülitamise viite sõltuvus relee toitepingest erinevatel kaugustel

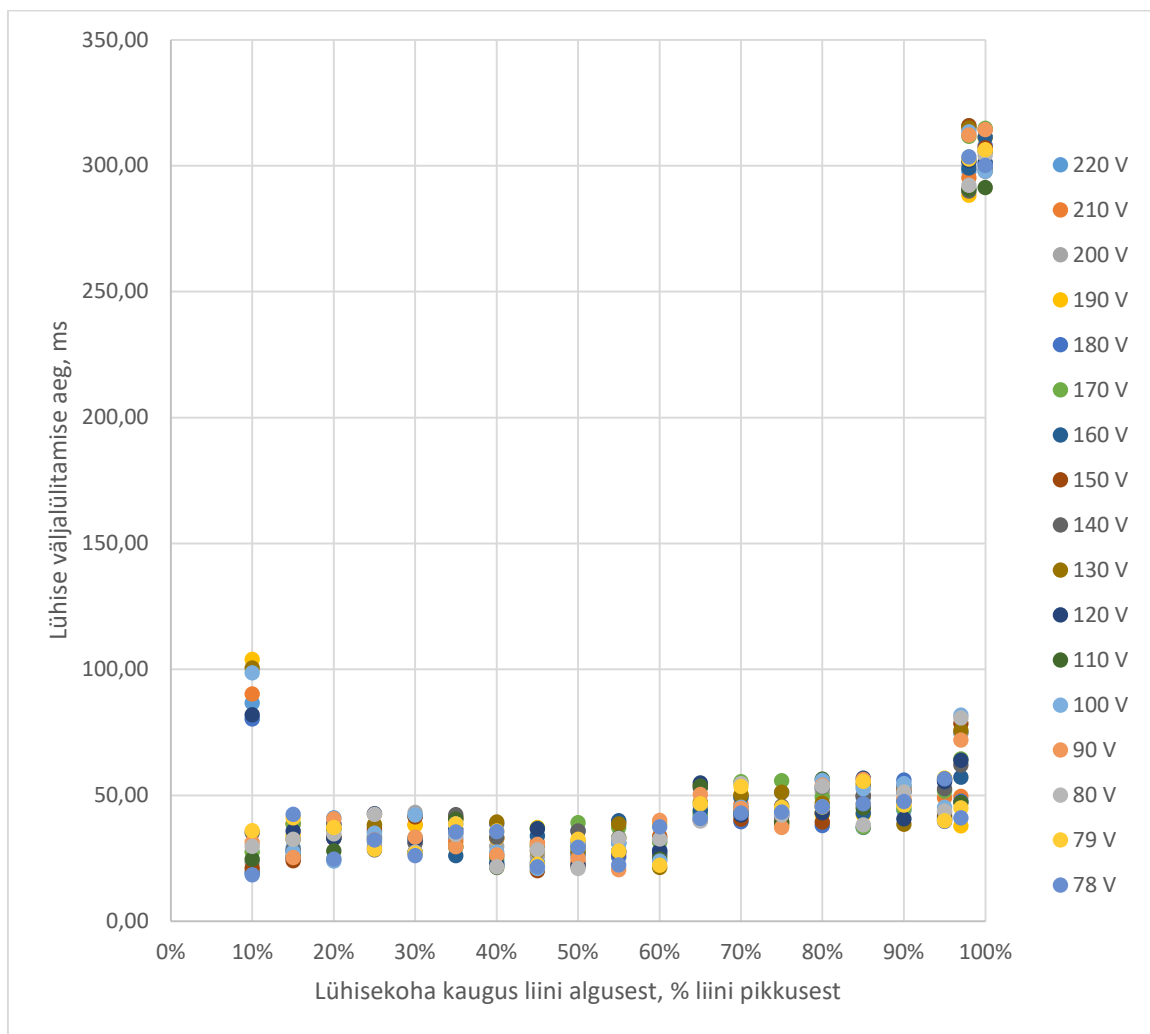
Joonisel 3.24 on näidatud distantskaitse aeglase tsooni faas-faas tüüpi lühise väljalülitamise aja sõltuvus relee toitepingest. Sarnaselt kiire tsooniga ei ole võimalik tuvastada ka aeglase tsooni lühistes sõltuvust lühise väljalülitamise aja ja relee toitepinge vahel.



Joonis 3.24 Aeglase tsooni lühisekoha väljalülitamise viite sõltuvus relee toitepingest erinevatel kaugustel

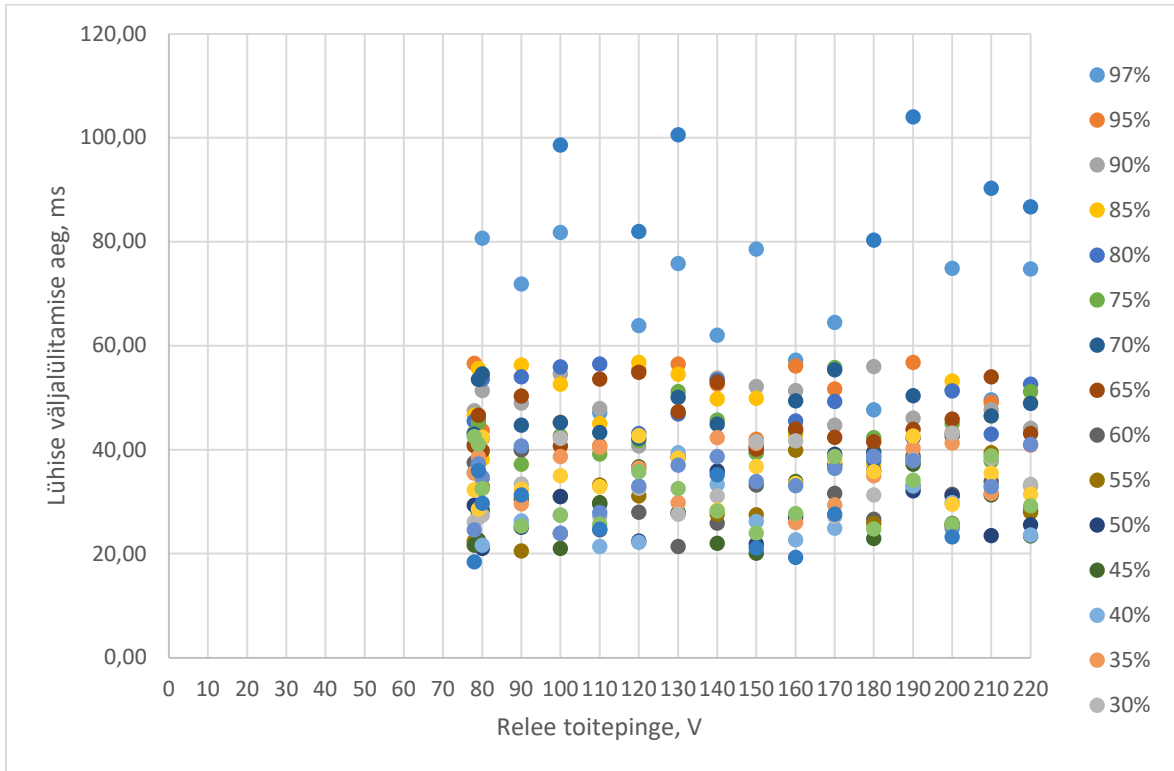
2. Distantkaitse faas-maa lühis

Joonisel 3.25 on kujutatud distantkaitse tulemused faas-maa tüüpi lühise korral. Jooniselt on näha kiirema ja aeglasema tsooni vahe 97% juures liini pikkusest. Samuti on jooniselt näha, et sarnaselt faas-faas lühisele on vahemikus 10%-60% lühise lülitamise aeg märgatavalt väiksem kui vahemikus 65%-95%. Katsetest selgus ka relee ebaühtlane toimimine väga lähedal aset leidvate lühiste korral (lähemal kui 10%). See võib olla seotud *Omicron* võimendi maksimaalse vooluväljundiga, milleks on primaarväärtustesse teisendatuna 40 kA. See piirväärtus ületatakse, kui lühisekoha kaugus latist langeb alla 7%. Selle piiri juures hakatakse võimendi poolt lühisvoolu sinusoide piirama ja seda võib relee tunnetada kui voolutrafo küllastumist.

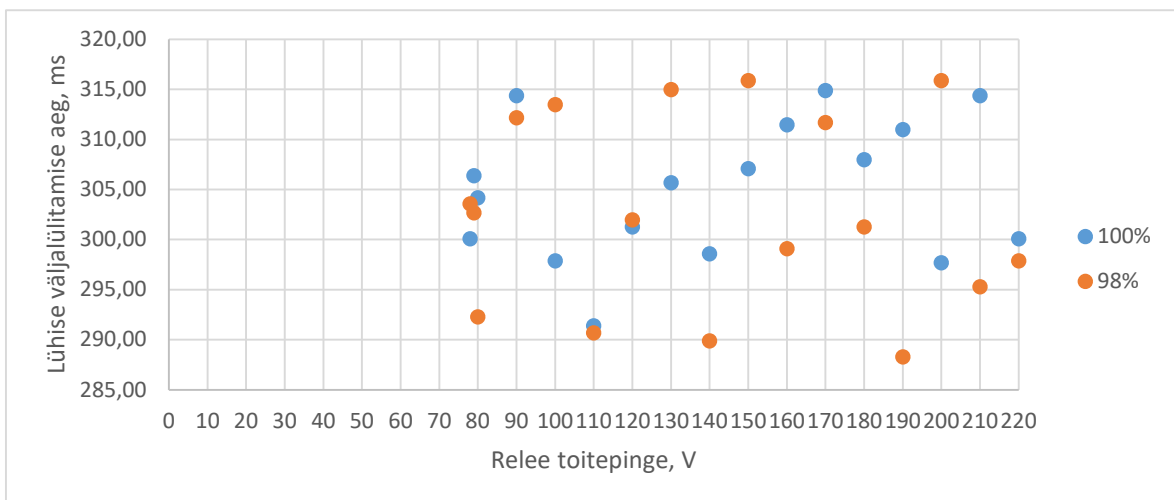


Joonis 3.25 Lühise väljalülitamise ajalise viite sõltuvus lühise asukohast erinevatel toitepingetel

Joonisel 3.26 ja 3.27 on näha vastavalt kiire ja aeglase tsooni lühise väljalülitamise aja sõltuvus relee toitepingest. Graafikutelt ei selgu trende lühise lahutamise aja ja relee toitepinge langemise vahel.



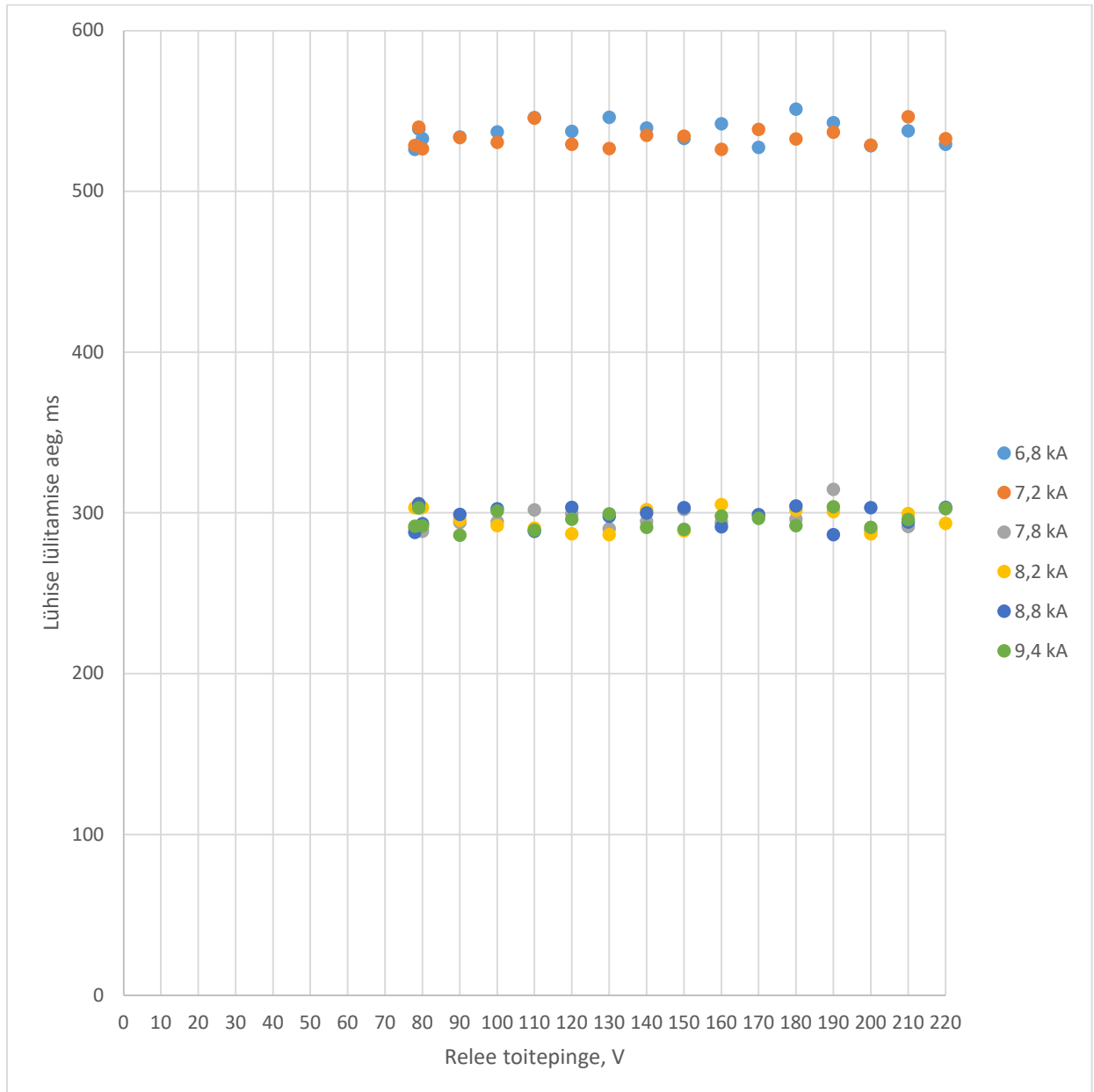
Joonis 3.26 Kiire tsooni lühisekoha väljalülitamise viite sõltuvus relee toitepingest erinevatel kaugustel



Joonis 3.27 Kiire tsooni lühisekoha väljalülitamise viite sõltuvus relee toitepingest erinevatel kaugustel

3. Liigvoolukaitse

Releega viidi läbi ka suunamata voolukaitse toime uurimine. Joonisel 3.28 on kokku võetud kiirema ja aeglasema voolukaitse astme toime erinevatel toitepingetel. Kiirema astme viiteks on määratud 250 ms ja aeglasema astme viiteks on määratud 500 ms. Graafikult paistab, et releekaitse toimib ühtlaselt kuni toitepinge langemiseni alla 78 V.



Joonis 3.28 Liigvoolukaitse lühise lülitamise aja sõltuvus relee toitepingest

Kaitsereleel 3 katsetati ka toimet voolukaitse toimimise ja mittetoimimise piiril. Katsete käigus ei tuvastatud väärasid rakendumisi. Tabelis 3.7 on kokku võetud katse tulemused.

Tabel 3.7 Kaitserelee 3 liigvoolukaitse katsetulemused lühise mittelülitamise piiri katsel

Toitepinge, V	Lühise lahutamise aeg, ms			
	Katse 1	Katse 2	Katse 3	Katse 4
220	Ei lülita	Ei lülita	301,3	294,1
210	Ei lülita	Ei lülita	294,0	304,7
200	Ei lülita	Ei lülita	298,4	286,7
190	Ei lülita	Ei lülita	296,3	299,7
180	Ei lülita	Ei lülita	292,6	301,8
170	Ei lülita	Ei lülita	302,2	287,8
160	Ei lülita	Ei lülita	304,3	296,5
150	Ei lülita	Ei lülita	301,6	301,6
140	Ei lülita	Ei lülita	289,0	296,6
130	Ei lülita	Ei lülita	295,6	296,3
120	Ei lülita	Ei lülita	298,7	291,6
110	Ei lülita	Ei lülita	293,4	306,2
100	Ei lülita	Ei lülita	295,4	294,6
90	Ei lülita	Ei lülita	304,3	301,3
80	Ei lülita	Ei lülita	295,5	305,6
70	-	-	-	-

Kokkuvõte

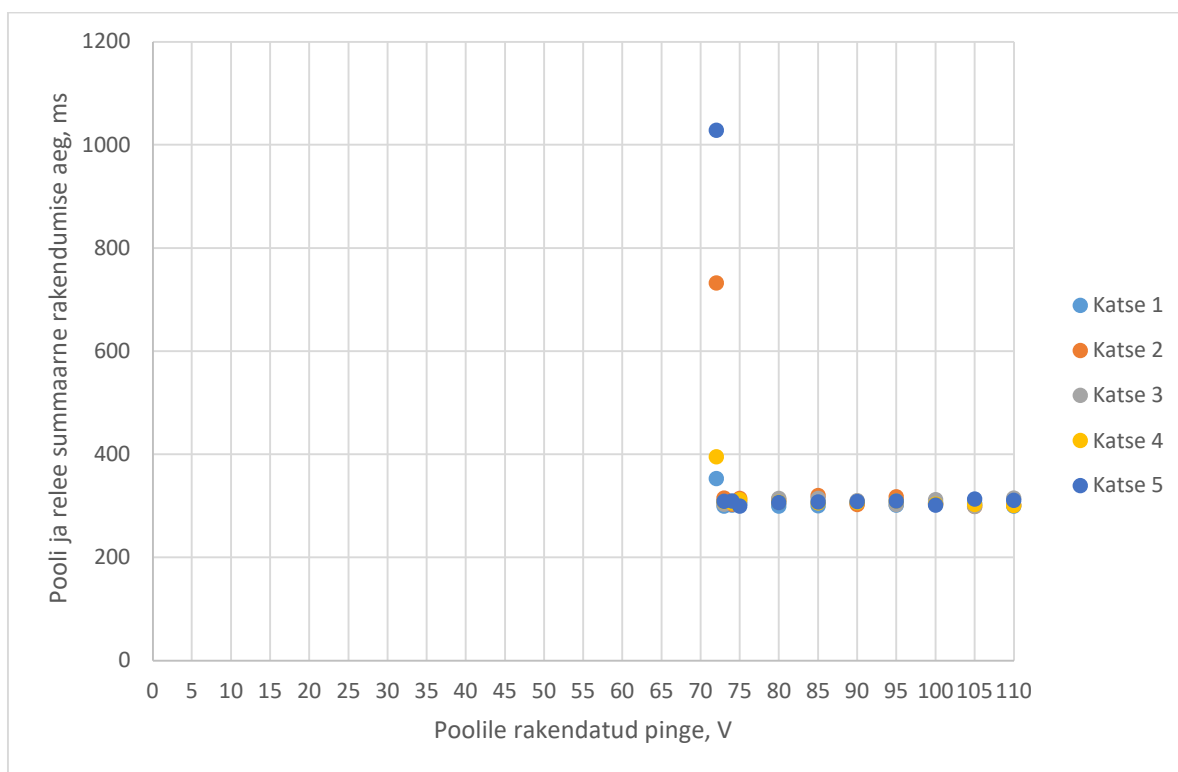
Kaitserelee 3 katsetest selgub, et kuni toitepinge langemiseni alla 80 V toimib relee probleemideta. Lisaks ei ole relee töös näha seoseid toitepinge ja lühistele reageerimise vahel. Katsete käigus esinesid aga seosed lühise asukoha ja lühise lahutamise aja vahel distantskaitsete kiiremas tsoonis.

Kiiretoimelised vahereleed Artech

Võimsuslüliti väljalülitamise ahela üheks elemendiks on ka nn. *trip* rele. Tegu on kiiretoimelise vahereleega, mis rakendub kaitsereleede väljundkontaktidest ja mille kaudu saadetakse väljalülitamise signaal edasi võimsuslülitisse. Katsete käigus viidi läbi ka mõõtmised, tutvumaks vaherelee toimemega erinevatel pingetel. Katsetes kasutati Artech RF4R tüüpi vahereleesid, millest üks oli 110 V toitepingele ja teine oli 220 V toitepingele. Katsete sooritamisel rakendati ABB kaitserelee volukaitse funktsiooni viitega 250 ms, sealjuures rakendati kaitsereleele baaspinge 110 V ja vahereleele rakendatavat pinget vähendati. Katseid sooritati igal pingestmel 5 korda.

1. Artech RF4R 110 V DC

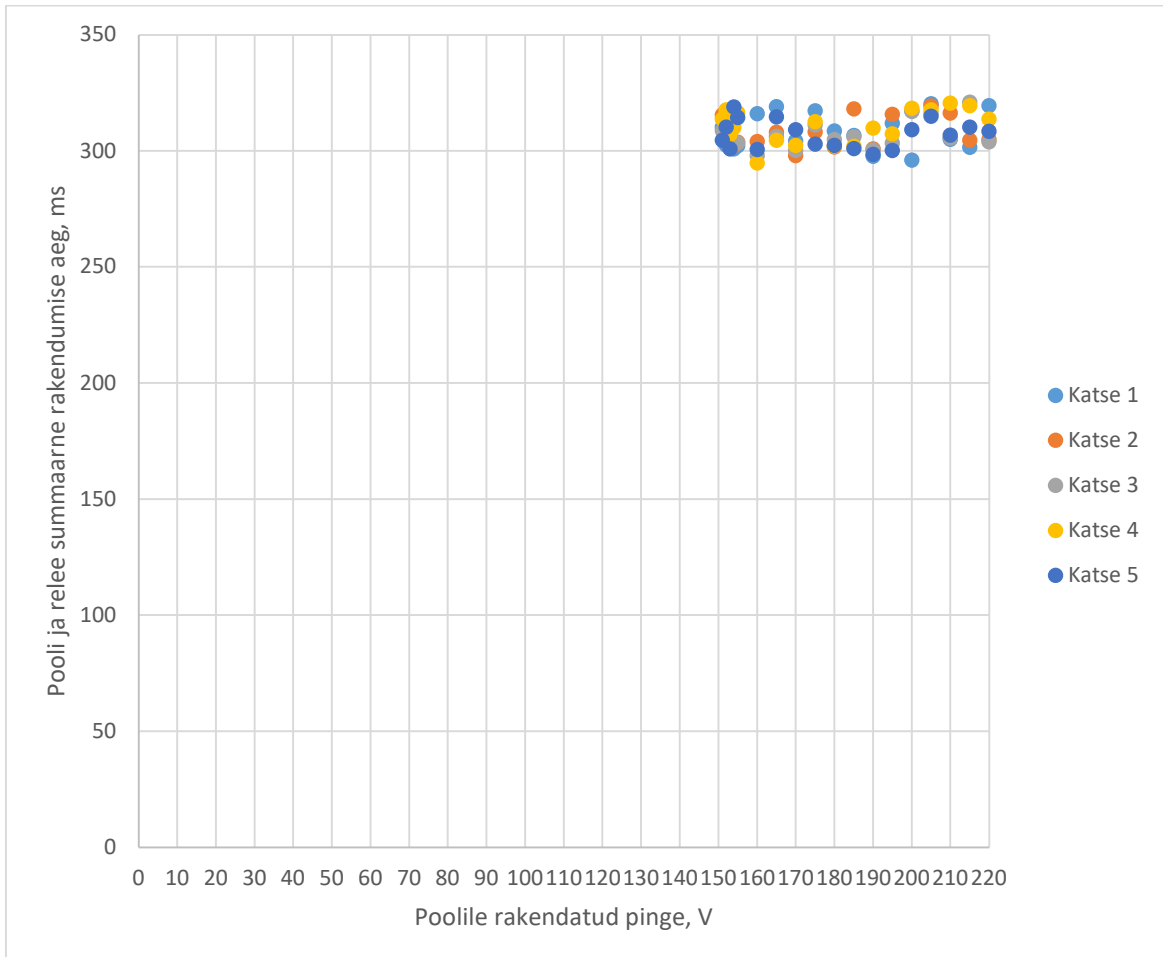
110 V vaherelee puhul täheldati, et kui üldiselt oli vaherelee enda rakendumise aeg koos rele viite ajaga 300-320 ms, siis pinge langedes 72 V peale muutus järsku rele rakendumise aeg ebaühtlaseks ja leidis aset lülitamisi 350 ms viitega, 1000 ms viitega ja ka üldse üks olukord, kus rele ei rakendunud. Pinge langedes 71 V peale ei rakendunud rele enam üldse. Joonisel 3.29 on kokku võetud Artech RF4R 110 V vaherelee katsetulemused.



Joonis 3.29 Artech RF4R 110 V vaherelee rakendumine erinevatel pingetel

2. Arteche RF4R 220 V

220 V vaherelee katsetest selgus, et relee toimeaeg koos vaherelee rakendumisajaga jäi sarnaselt 110 V vahereleele vahemikku 300-320 ms. Vaherelee lõpetas rakendumise pinge langedes alla 151 V. Kogu pingevahemikus 220 V - 151 V rakendus relee ühtlaselt. Joonisel 3.30 on kokku võetud Arteche RF4R 220 V vaherelee katsetulemused.



Joonis 3.30 Arteche RF4R 220 V vaherelee rakendumine erinevatel pingetel

Kokkuvõte

Vahereleede katsete tulemustest selgus, et releed toimivad oma lubatud toitepinge vahemikus ühtlaselt (vt Tabel 3.4). 110 V relee hakkas ebaühtlaselt toimima 72 V juures. Sellest allpool ei toiminud vaherelee enam üldse. 220 V relee toimis kogu katsevahemiku juures ühtlaselt ja lõpetas rakendumise, kui pinge langes alla 151 V.

3.5 Katsetulemuste kokkuvõte

Katsete käigus kontrolliti kolme eri tüüpi ja eri tootja releekaitse seadme toimet toitepinge langemise korral. Uuriti kaitsereleede erinevaid funktsioone, sealhulgas distantskaitse faas-faas lühise funktsiooni, distantskaitse faas-maa lühise funktsiooni ja voolukaitse funktsiooni.

Distantskaitsete katsed viidi läbi 5% sammuga liini pikkusest terve liini jooksul. Kaitsete sätted olid määratud nii, et liin oleks kaetud vähemalt kahe erineva tsooniga. Iga valitud lühisekoha juures viidi läbi katsed, kus pinget langetati ettemääratud sammu võrra ja seejärel mõõdeti väljalülitamise kiirust. Katsete eesmärgiks oli tuvastada, kas ja kuidas võib releede toime sellises situatsioonis muutuda. Voolukaitsete katsed viidi läbi distantskaitsete katsetega sarnasel põhimõttel. Sooritati lühised liinil erinevatel pikkustel kahe voolukaitse astme piiri peal ja uuriti, kas pinge langemine mõjutab lühisele reageerimist või astmete tajumist.

Samuti uuriti, kuidas käituvad sarnastes tingimustes väljalülitusahela vahereleed. Selleks valiti kaks eri pingel toimivat sama tootja väljalülitusahela vahereleed. Nende puhul vaadeldi vaherelee tõmbumist erinevate toitepingete korral. Relee tõmbumise aja vaatlemiseks kasutati sama katsesimulatsiooni, mida kasutati eelnevalt releekaitse toime uurimiseks.

Katse tulemused saab jagada katsealuste seadmete järgi osadeks. Esimesena vaadeldi 110 V nimipingega kaitserelee 1 toimimist. Katsetest selgus, et relee toimis tehase poolt määratud lubatud alampingeni probleemideta. Katsete käigus ei tuvastatud ühtegi väära rakendumist kummagi distantskaitse või ka voolukaitse funktsioonide katsete käigus. Samuti suutis relee edukalt ja ühtlase kiirusega lahutada ning eristada tsoone kuni toitepinge langemiseni alla 46 V. Peale seda esines olukord, kus relee lülitus lühisele reageerimise peale välja ja väljalülituse signaal oli ajaliselt piiratud. Kui toitepinge langes alla 44 V, lülitus relee ka ilma lühisele reageerimiseta välja. Seega võib määrata relee toitepinge alampiiriks 46 V ehk 41,8% nimipingest.

Teine katse viidi läbi kaitsereleega 2, mille nimipinge oli 110 V. Kuna antud seadmel puudub distantskaitse funktsioon vaadeldi ainult voolukaitse käitumist. Voolukaitse astmete piiriks oli määratud 8 kA ja kaitse juures vaadeldi kaitse käitumist vahemikus 6,8-9,4 kA. Lubatud pinge raamides ei tuvastatud seadmel ühtegi vale rakendumist. 60 V pinge juures tuvastati üks olukord, kus relees rakendus 7,8 kA lühisvoolu juures kiire voolukaitse aste. Samuti tekkis 60 V toitepinge juures olukord, kus relee rakendus lühisvoolule, millele see tegelikult rakenduda ei oleks tohtinud. Selle põhjuseks võib olla nii madal toitepinge kui ka asjaolu, et lühis leiab aset kahe astme piiri peal.

Kaitserelee 2 suutis lühist lülitada kuni 48 V toitepingeni. 47-46 V suutis relee veel lühisele reageerida, kuid lülitus selle peale ise välja. Kokkuvõtvalt võib katseliselt määrata relee toitepinge alampiiriks 48 V ehk 43,6% nimipingest.

Kolmandaks uuriti kaitsereleed 3. Seade erines teistest kaitsereleedest selle poolest, et selle abitoitepinge normaalväärtus on 220 V. Seadmega viidi läbi distantskaitse faas-faas ja faas-maa tüüpi lühiste lahutamise kontroll ja voolukaitse kontroll. Katsetulemused näitasid, et erinevalt kaitsereleest 1 sõltub kaitserelee 3 lühise lahutamise kiirus rohkem lühise asukohast ja ei ole terve distantskaitse tsooni juures ühtlane: kiirema tsooni kaugemas osas jäid lühise lahutamised valdavalt üle 40 ms, samas kui tsooni keskmistes osades jäid lahutamised alla 40 ms. Toiteallikale väga lähedal paiknevate lühiste korral leidis samuti tähelepanekuid: faas-faas lühiste korral tõusis lühiste lahutamise aeg taas üle 40 ms. Faas-maa lühiste korral ei suutnud aga relee enam väga lähedal asuvaid lühiseid tuvastada. Need tulemused ei ole aga seotud relee toitepinge langemisega ja lühiste lahutamise võime seost relee toitepinge langemisega ei tuvastatud. Kaitserelee suutis lühiseid probleemideta tuvastada ja lahutada kuni toitepingeni 80V. Pingete 79-78 V juures lülitus relee lühise lahutamise peale välja. Pinge langemisel alla 78 V relee enam lühiseid ei lahutanud ja lülitus välja. Kokkuvõtvalt võib katseliselt määrata relee toitepinge alampiiriks 80 V ehk 36,4% nimipingest.

Katsete viimase osana vaadeldi väljalülitusahela vahereleede toimimist pinge langemisel. Selleks sooritati katseid Artech RF4R tüüpi kiiretoimeliste vahereleedega, millest ühe nimitoitepinge oli 110 V ja teise nimitoitepinge oli 220 V. Tegu on vahereleedega, mis rakendub väljalülituskäsu peale ja mille kontaktid lülitavad otse võimsuslülitil poolile minevat ahelat. 110 V vaherelee katsetulemusest selgus, et relee toimib ühtlaselt kuni toitepingeni 73 V ehk 66,4% nimipingest. 72 V peal oli relee rakendumine äärmiselt ebaühtlane ja 71 V peal relee enam ei rakendunud. 220 V vaherelee toimis ühtlaselt kuni pingeni 151 V ehk 68,6% nimipingest. Pinge langedes alla 151 V relee enam ei rakendunud.

Katsetulemustest lähtuvalt on näha, et väljalülitusahela vaherelee lõpetab töö enne releekaitse seiskumist. 110 V abitoiteahelate näitel toimivad releekaitse seadmed kuni alla 50 V toitepingeni. Vaherelee lõpetab aga rakendumise 73 V juures. Antud tulemusi on võimalik kõrvutada tabelis 2.3 toodud võimsuslülitite mõõteandmetega, kus on toodud võimsuslülitite minimaalne väljalülitamise pooli rakendumise pinge, mis jääb 110 V abitoitesüsteemi juures 40-60 V vahemikku. 220 V abitoitesüsteemis lõpetab katses kasutatud relee toimimise 80 V pinge juures. Vaherelee lõpetab rakendumise alates toitepingest 151 V. Võimsuslülitil väljalülituspool lõpetab rakendumise pinge

langedes alla 135 V. Seega on mõlema pingeastme juures ühiseks näitajaks asjaolu, et toitepinge langemisel on väljalülitusahela esimesena töö lõpetav seade väljalülitusahela vaherelee. Võimsuslüliti väljalülituspool on töö seiskumise järjekorras teine seade. Viimasena lõpetab töö kaitseterminal. Sellest saab järeldada, et kuigi abitoite pinge langemisel ei ole võimalik teatud piirist alates enam lühiseid lahutada, suudab relee neid ikka tuvastada.

KOKKUVÕTE

Käesoleva töö teemaks on alajaama sekundaarseadmete toime uurimine sõltuvalt seadmete toitepinge kvaliteedist. Sellega seoses määrati ülesandeks uurida abitoitepinge kvaliteeti töösolevas alajaamas, koostada katsemetoodika ja katsestend sekundaarseadmete toime uurimiseks ning viimaks uurida, missugust mõju avaldab toitepinge kvaliteet sekundaarseadmete tööle.

Töö teoreetilises osas tutvustati ülevaatlilikult alajaamas kasutusel olevat abitoitepinge süsteemi. Puudutati nii vahelduvpinge kui ka alalispinge süsteeme, nende ülesehitust ja esitatavaid nõudeid. Samuti käsitleti mõnede, alajaamades kasutatavate seadmete tehasepoolseid ja eelnevalt mõõdetud toiteandmeid. See võimaldas määratlada, mida töö katselises osas lähemalt uurida ja andis ka võimaluse katsetulemusi paremini analüüsida.

Töö katselises osas sooritati mõõtmised ühes töösolevas jaotusvõrgu alajaamas, kaardistamiseks alajaama abitoitepinge kvaliteeti. Lähteülesandes seati eesmärgiks viia läbi mõõtmised nii ühes jaotusvõrgu alajaamas kui ka ühes põhivõrgu alajaamas. Mõõtmised põhivõrgu alajaamas jäid aga selle töö raames ära, kuna ei olnud võimalik jõuda kokkuleppele põhivõrgu haldajaga. Seega piirduti alajaamades läbi viidavate mõõtmiste raames vaid jaotusvõrgu alajaama mõõtmistega.

Töö lähteülesandes seatud eesmärkideks oli ka katsemetoodika ja katsestendi loomine seadmete toitepinge mõju uurimiseks ning seejärel ka katsete läbiviimine antud katsemeetodil. Katsete läbiviimiseks sai loodud simulatsioon võrgusimulatsiooniprogrammis *RSCAD*. Antud simulatsiooniga on võimalik simuleerida lühist ühel liinil ning saata resulteeruvad sekundaarpoole mõõteväärtused läbi *Omicron* võimendi kaitsereleele. Samuti võimaldas simulatsioon määrata katseseadmele antava toitepinge väärtuse. Simulatsiooniga uuriti antud relele toimimist antud lühisväärtustele erinevate relele toitepinge väärtuste korral.

Katsed viidi läbi kolme eri tootja releekaitse terminalidega. Kahel terminalil uuriti distantskaitse funktsiooni faas-faas lühistele ja faas-maa lühistele. Ühel terminalil puudus distantskaitse funktsioon. Kõigil kolmel terminalil uuriti ka volukaitse funktsiooni. Lisaks kolmele releekaitse terminalile uuriti ka kahte väljalülitusahela vahereleed. Eesmärgiks oli saavutada võrdlusmoment kogu väljalülitusahela raamides, tuvastamiseks, milline ahela osa on kõige tundlikum toitepinge langemisele ja mis osa võib osutada takistuseks lühiste lahutamise juures.

Töö katsetulemustest selgus, et katsete käigus toimisid kõik releed oma lubatud toitepinge piirides ilma häiringuteta. Toitepinge lubatud piiridest väljaspool tuvastati ühe kaitseterminali puhul kahekordne väärlülitus. Relee nr 2 puhul rakendus 60 V toitepinge juures aeglase tsooni asemel kiire tsoon. Samuti rakendus volukaitse 60 V juures ühel korral olukorras, kus see ei oleks pidanud rakenduma. 110 V toitepingega kaitseterminalid saatsid lühise lahutamise signaale kuni toitepingeni vahemikus 48-46 V. 220 V toitepingega kaitserelee toimis probleemideta kuni toitepinge langemiseni alla 80 V. Katsetulemustest tuvastati lühiste lahutamises mõningaid sõltuvusi ka lühise asukoha ja lühise lahutamise aja vahel: selgus, et lühise lahutamise aeg võib olla suurem kahe kaitsetsooni vahelises ülemineku piirkonnas.

Väljalülitusahela vahereleede katsetest selgus, et need releed on samuti kogu oma tööpiirkonnas ühtlase toimega. Küll aga selgus, et 110 V vaherelee lõpetab tõmbumise 72 V juures ja 220 V vaherelee lõpetab tõmbumise 151 V juures. Kui võrrelda saadud tulemusi ja võimsuslülitite mõõdetud minimaalseid rakendumispingeid (vt Tabel 2.3), mis jäid 110 V süsteemi korral vahemikku 40-60 V ja 220 V süsteemi korral 80 V juurde, siis on näha, et võimsuslülitid väljalülitusahela osadest lõpetab esimesena toimimise ahela vaherelee. Seejärel võimsuslülitid enda lülituspool ja kõige viimasena kaitseterminal.

Kokkuvõtvalt saab katsete tulemustest järeldada, et toitepinge langemine ei omanud kaitseterminalide tööle märgatavat mõju. Releede lubatud toitepinge vahemikus anomaaliaid ei täheldatud ja releede toime piirkonnas ei saanud üheselt tuvastada seost toitepinge langemise ja lühiste lülitamise anomaaliatega.

Käesoleva töö lähteülesandega seati eesmärgiks uurida ka teiste toitepinge omaduste mõju seadmete tööle, näiteks alalisvoolu maaühendust ja vahelduvvoolukomponenti. Töö käigus selgus aga, et ajaliste kitsenduste tõttu tuli lisakatsetest loobuda. Seega on võimalik seda teemat hilisemates töodes edasi uurida. Näiteks oleks võimalik katseid läbi viia teist tüüpi alajaama sekundaarseadmetega, sealhulgas sideseadmetega. Ühe võimaliku uurimissuunana saaks vaadelda ka sekundaarseadmete pingelohkude läbimise võimet ja seadmete võimalikku taaskäivitumise aega peale pingelohku.

SUMMARY

The topic of this dissertation was the study of the effect of supply voltage on the work of substation secondary equipment. The aim was set to measure the supply voltage in at least two different substations, create a test method and to study of secondary equipment under different supply voltages.

The theoretical part of the paper described the auxiliary voltage systems in use in substations. Both AC and DC systems were described, their build and requirements were covered. The auxiliary voltage requirements for some specific substation equipment were also covered. This enabled to decide what to cover in the practical part of the paper and it also allowed for a better analysis of the results.

The practical part of this paper covered the measurements in one distribution network substation to map out the quality of auxiliary voltage in one substation. The aim was set to measure in both distribution network and transmission network substations. The measurements in a transmission network substation was not conducted because an agreement could not be reached with the operator of the network, so the measurement part of this paper was limited to distribution network substation.

An aim was set to create a test method for studying the effect of supply voltage on secondary equipment and to use it. A simulation was created in a power grid simulation system *RSCAD*. This simulation program allowed to create a short circuit on a power line and to send the resulting secondary measurement values through *Omicron* into the relay device. The program also allowed to set the auxiliary voltage used to supply the relay device. The simulation therefore was used to measure the operation of the relay to the short circuit conditions under different supply voltages.

The measurements were made with three different relay protection terminals. In two terminals the distance protection function was studied for both phase to phase and phase to ground faults. One terminal did not have the distance protection function. The overcurrent protection was studied on all three relay devices. In addition to the three relay protection terminals two trip relays were also studied. The aim was to create a comparison between different parts of the trip circuit to determine the most sensitive part of the circuit that could be the first to stop operating.

The results of the experiments showed that all relays operated without faults in their allowed supply voltage range. When the supply voltage dropped out of that range one relay terminal was recorded to operate falsely two times. Once the faster zone activated instead of the slower zone at 60 V supply voltage. Also at 60 V current protection activated once in a for a current where it should not have. The terminals with nominal auxiliary voltage of 110 V operated until the supply voltage dropped to 48-46 V. The terminal with nominal auxiliary voltage of 220 V operated until the supply voltage dropped below 80 V. The experiments also showed some correlation between the location of the short circuit on the line and the time of trip delay: bigger delay was recorded close to the limit between to zones.

The experiments with the trip relays showed that the relays operated evenly in their nominal supply voltage range. It was measured that the 110 V relay stopped tripping at 72 V and the 220 V relay stopped tripping at 151 V. When comparing these results with the measured operating voltages of circuit breaker trip coil (Table 2.3) which were between 40-60 V for a 110 V system and 80 v for a 220 V system, it can be concluded that the first element in a trip circuit to stop operating is the trip relay. After that the circuit breaker coil fails and the last element of the trip circuit to fail is the relay terminal.

To summarize, the results of the experiments show that the decrease of supply voltage does not have a noticeable effect on the tripping function of the terminals. In the nominal supply voltage range no faulty operations were recorded and a correlation between the drop of supply voltage and the anomalies recorded during the experiments could not be established.

The aim of this thesis was set to include the effect of different properties of the supply voltage, for example the DC ground or the AC component. This work did not include this because of the large scope of the experiments. The effect of different supply voltage properties can be researched in further papers. For example it is possible to look into the operation of other equipment, including communication systems. One other topic could be the effect of auxiliary voltage sags on secondary equipment and the possible restart time of relays after a voltage sag.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] M. J. Thompson ja D. Wilson, „Auxiliary DC Control Power System Design for Substations,” 27 Märts 2007. [Võrgumaterjal]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4201117>.
- [2] B. H. Colin Bayliss, Transmission and Distribution Electrical Engineering, Oxford: Newnes, 2011.
- [3] Elering AS, „601 Requirements for AC auxiliary system,” Elering AS, Tallinn, 2020.
- [4] S. T. S. S. Miroslav Mesić, „DISTURBANCE IN THE POWER SYSTEM CAUSED BY AUXILIARY DC INSTALLATION FAILURE OF SWITCHYARD,” September 2008. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.researchgate.net/publication/312471634_DISTURBANCE_IN_THE_POWER_SYSTEM_CAUSED_BY_AUXILIARY_DC_INSTALLATION_FAILURE_OF_SWITCHYARD. [Kasutatud 28 September 2021].
- [5] Elering AS, „640 DC auxiliary power systems,” Elering AS, Tallinn, 2019.
- [6] IEEE, „IEEE 946 Recommended Practice for the Design of DC Power Systems for Stationary Applications,” IEEE, 2020.
- [7] IEC, „IEC 61000-4-11:2020 RLV,” 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/66487>. [Kasutatud 05 november 2021].
- [8] B. F. D. S. Satish Rajagopalan, „Power Quality Disturbances Within DC Data Centers,” Electric Power Research Institute, Knoxville, 2010.
- [9] IEC, „IEC 61000-4-4:2012 RLV,” 2012. [Võrgumaterjal]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/22271>. [Kasutatud 5 november 2021].
- [10] IEC, „IEC 61000-4-5:2014+AMD1:2017 CSV,” 2014. [Võrgumaterjal]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/61166>. [Kasutatud 5 november 2021].
- [11] IEC, „IEC 61000-4-6:2013,” 2013. [Võrgumaterjal]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/4224>. [Kasutatud 5 november 2021].
- [12] ABB, „620 series Technical Manual,” 2016.
- [13] TOSHIBA, „Instruction manual Bay Control IED with/without Protection GR200 series (GRL200),” 2021.
- [14] SIEMENS, „SIPROTEC 5 Protection, Control, Automation, Monitoring, Power Quality – Basic Catalog • Edition 7,” 2020.
- [15] Elering, „402 General requirements for relay protection and system automation,” Elering, Tallinn, 2020.
- [16] T. S. B. A. N. E. K. O. J. R. Craig Wester, „THE ROLE OF THE SCADA RTU IN TODAY’S SUBSTATION,” 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7102199>. [Kasutatud 27 november 2021].
- [17] OMICRON, „CMC 356 Brochure,” OMICRON, 2022.
- [18] RTDS, „RSCAD: Real-Time Simulation Software Package,” 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://knowledge.rtds.com/hc/en-us/articles/360046352893-RSCAD-Real-Time-Simulation-Software-Package>. [Kasutatud 5 mai 2022].
- [19] ARTECHE, „INSTANTANEOUS AUXILIARY RELAYS,” ARTECHE.

LISAD

Lisa 1 Kaitserelee 1 faas-faas lühise katsetulemused, lühise lahutusaeg, ms

Lühise asukoht liinil	Relee toitepinge, V															
	110	105	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35
100%	292,8	293,1	288,2	284,2	284,1	289,8	282,2	282,6	292,8	290,3	291,8	288,9	282,8	290,7	-	-
95%	284,5	293,6	295,0	293,4	291,0	283,5	285,9	299,5	282,8	282,2	281,7	297,0	287,7	299,1	-	-
90%	277,9	291,1	282,6	282,4	288,1	291,7	282,4	293,4	296,4	290,0	279,9	286,7	277,9	292,3	-	-
89%	57,3	40,1	44,1	51,1	54,0	60,2	49,3	53,7	46,8	40,5	60,6	56,9	58,7	43,3	-	-
88%	51,6	35,5	45,9	38,5	34,8	52,9	44,8	36,1	36,9	41,6	45,7	53,4	51,7	35,5	-	-
85%	27,9	42,8	36,3	31,1	25,5	43,4	32,3	40,7	28,4	25,8	30,5	40,3	35,7	32,6	-	-
80%	43,6	35,0	43,1	35,9	38,6	38,9	32,7	39,0	27,2	40,1	39,2	36,5	44,5	27,8	-	-
75%	38,4	39,8	38,2	37,8	27,4	24,9	25,7	27,0	35,0	38,8	27,0	34,4	43,5	37,3	-	-
70%	43,7	43,1	43,3	40,6	33,3	26,9	45,7	42,8	34,4	37,1	46,2	44,9	45,9	42,0	-	-
65%	25,7	39,7	25,5	36,8	29,3	41,1	31,1	31,9	39,5	25,6	33,5	42,5	28,5	42,8	-	-
60%	36,4	28,0	25,0	30,5	35,9	30,5	34,4	27,6	29,2	36,8	31,6	26,1	28,2	22,6	-	-
55%	27,9	23,6	24,3	26,9	35,1	26,2	37,3	34,5	38,1	42,1	38,3	29,3	39,3	32,0	-	-
50%	31,0	40,0	22,7	27,5	35,9	38,3	36,1	33,8	39,0	37,9	31,9	43,2	43,0	36,5	-	-
45%	23,4	38,9	29,0	35,5	23,8	42,0	34,5	32,5	29,7	39,2	42,2	28,9	28,7	32,7	-	-
40%	21,1	32,8	26,6	35,5	29,7	34,2	20,2	20,5	35,6	28,8	30,2	20,5	27,2	37,7	-	-
35%	27,2	32,0	24,9	40,8	26,5	37,5	24,3	22,1	26,4	41,0	39,5	30,0	39,8	38,1	-	-
30%	27,2	33,9	24,8	30,0	35,1	28,4	32,4	28,8	30,5	30,6	38,3	40,7	20,1	40,3	-	-
25%	27,7	41,6	36,0	30,0	35,7	33,1	40,7	36,7	25,5	37,0	37,0	25,4	39,7	40,2	-	-
20%	32,6	32,7	39,0	35,8	23,9	23,9	24,7	31,2	40,3	39,9	42,1	29,6	42,2	29,3	-	-
15%	22,4	28,5	28,0	22,0	24,0	19,9	39,6	22,3	34,9	29,0	22,2	21,6	30,8	36,2	-	-
10%	27,2	25,6	37,3	38,4	31,3	30,3	24,1	22,2	28,9	40,7	39,0	30,7	24,5	28,0	-	-
5%	36,5	30,2	34,1	20,7	21,6	31,4	35,0	25,3	26,7	28,9	31,2	28,7	38,3	24,3	-	-
0%	28,7	25,7	32,6	34,9	39,6	39,6	26,2	38,2	29,7	32,1	38,8	38,7	39,9	38,7	-	-

Lisa 2 Kaitserelee 1 faas-maa lühise katsetulemused, lühise lahutusaeg, ms

Lühise asukoht liinil	Relee toitepinge, V														
	110	105	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40
100%	277,4	288,9	279,2	290,0	279,8	274,4	291,8	286,9	292,7	285,3	291,0	275,2	285,0	292,7	-
95%	279,8	287,8	292,1	276,2	281,0	281,0	288,4	284,4	287,4	293,7	282,9	281,2	286,2	283,6	-
90%	281,9	279,2	280,8	273,8	283,0	277,3	273,4	292,2	292,7	282,4	279,2	291,0	281,7	290,2	-
85%	283,7	276,1	289,9	283,1	283,1	274,3	284,3	282,6	285,5	289,2	287,6	279,4	286,5	275,0	-
80%	285,7	282,5	283,4	283,1	279,7	279,9	278,7	281,9	284,4	291,5	282,2	274,0	278,5	274,7	-
75%	276,4	291,6	273,1	276,3	274,4	278,3	279,5	280,6	285,5	281,5	281,5	284,6	276,0	281,1	-
74%	289,7	293,9	275,6	293,7	275,1	279,9	289,8	293,4	274,9	287,5	279,2	280,4	292,5	280,4	-
73%	45,0	29,0	46,3	42,1	33,6	34,9	28,9	28,9	41,9	41,2	38,3	36,2	36,3	38,8	-
70%	35,9	34,3	36,2	39,7	35,1	28,8	29,9	35,9	25,4	26,7	41,4	39,8	33,7	34,1	-
65%	28,7	33,6	37,1	24,8	39,5	30,4	39,5	39,1	26,6	38,4	42,0	25,6	39,2	42,7	-
60%	40,9	27,6	26,1	33,8	41,3	43,6	28,0	32,9	44,7	32,1	44,5	33,3	31,2	33,2	-
55%	33,9	41,9	38,3	26,1	27,8	41,2	30,3	26,5	40,6	25,6	42,4	25,3	38,8	33,1	-
50%	25,6	28,7	23,9	40,0	34,1	25,5	23,9	24,9	34,7	25,1	33,4	27,4	42,1	38,5	-
45%	29,0	24,8	28,1	34,4	21,7	33,2	36,8	41,3	29,4	22,0	34,1	37,8	26,7	26,9	-
40%	22,0	36,2	35,0	24,5	22,1	30,9	30,7	25,8	31,8	29,0	22,0	33,9	30,1	33,9	-
35%	29,6	40,1	33,7	37,6	36,8	39,6	33,9	38,6	29,4	29,1	22,5	21,3	37,3	24,4	-
30%	25,5	26,3	28,9	29,1	41,5	25,9	26,5	29,0	41,0	35,9	39,1	30,3	29,3	32,1	-
25%	39,8	34,4	39,0	24,9	37,8	27,3	22,0	35,8	33,7	24,7	37,4	21,9	35,8	29,7	-
20%	29,8	34,6	28,3	38,2	32,5	23,6	37,3	32,6	29,7	22,8	23,8	33,9	25,5	36,9	-
15%	41,7	38,6	30,3	36,8	22,4	33,1	39,9	26,5	34,4	23,3	36,8	28,9	31,5	24,3	-
10%	34,8	32,9	26,9	22,4	35,9	24,5	34,7	29,9	21,6	32,9	29,6	38,1	30,1	23,6	-
5%	22,6	21,1	25,0	20,1	25,4	28,6	26,4	27,9	26,5	22,3	24,6	36,0	37,4	28,9	-
0%	28,9	19,6	30,0	32,7	28,5	35,8	23,7	35,7	26,1	27,8	25,4	34,7	24,2	20,0	-

Lisa 3 Kaitserelee 1 voolukaitse katsetulemused, lühise lahutusaeg, ms

Relee toitepinge, V	Lühisvool, kA					
	6,8 kA	7,2 kA	7,8 kA	8,2 kA	8,8 kA	9,4 kA
110	541,9	545,3	534,3	293,7	303,7	287,4
105	539,9	547,4	544,4	306,9	297,9	288,1
100	538,3	537,5	544,0	289,4	288,5	302,9
95	553,2	541,1	538,0	307,0	294,1	288,7
90	552,5	550,5	546,4	293,0	300,4	303,4
85	543,6	540,4	552,5	301,8	303,6	300,6
80	546,3	540,1	542,3	291,9	292,6	293,3
75	546,8	543,3	545,0	301,1	290,6	286,4
70	539,0	538,3	542,7	302,2	301,9	297,0
65	538,8	541,4	534,0	310,7	305,2	289,1
60	555,4	542,5	551,6	298,0	303,2	291,8
55	554,5	535,1	545,3	295,4	306,9	287,1
50	554,7	551,9	540,9	304,1	303,8	293,7
45	551,4	550,7	539,3	302,2	301,0	304,6
40	-	-	-	-	-	-

Lisa 4 Kaitserelee 2 voolukaitse katsetulemused, lühise lahutusaeg (ms)

Relee toitepinge, V	Lühisvool, kA					
	6,8 kA	7,2 kA	7,8 kA	8,2 kA	8,8 kA	9,4 kA
110	537,2	530,4	516,7	277,4	277,2	278,5
105	524,9	529,4	522,2	274,8	275,2	279,0
100	523,8	523,9	519,6	289,1	276,7	285,3
95	523,2	524,2	527,5	280,6	286,9	272,4
90	517,0	530,7	520,8	281,7	281,0	276,0
85	520,4	522,5	525,8	280,6	286,0	274,4
80	532,7	534,0	531,8	276,7	281,9	271,0
75	519,7	533,9	518,7	274,2	289,1	281,5
70	532,4	535,4	517,9	283,1	290,7	274,7
65	521,5	519,5	515,5	281,9	281,0	281,5
60	532,2	524,6	284,4	286,4	289,9	284,9
55	522,7	530,6	515,1	272,9	277,8	277,3
50	520,6	527,8	522,2	286,4	274,6	274,7
45	521,8	533,1	518,5	274,5	284,4	286,7
40	-	-	-	-	-	-

Lisa 5 Kaitseralee 3 distantskaitse faas-faas lühise katsetulemused, lühise lahutusaeg, (ms)

Lühise asukoht liinil	Relee toitepinge, V																	
	220	210	200	190	180	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80	79	78	75
100%	290,3	300,7	299,3	286,4	287,4	298,4	303,8	299,8	303,2	298,4	290,1	291,1	295,3	298,9	301,3	293,9	291,9	-
95%	291,1	292,6	296,3	295,4	290,0	302,4	304,7	295,9	287,0	306,4	294,0	303,1	306,1	297,7	303,8	303,1	300,9	-
90%	294,1	296,8	303,7	289,6	301,5	287,6	302,7	305,0	305,6	301,0	292,4	305,8	301,4	304,3	288,6	286,4	294,5	-
89%	79,7	69,6	66,9	76,5	78,4	78,3	80,9	78,4	69,2	62,1	68,3	70,7	79,1	79,3	77,4	76,5	70,5	-
88%	53,5	50,9	51,7	38,6	43,2	37,2	52,3	55,3	42,3	47,6	39,4	54,6	41,7	37,1	51,3	39,1	40,4	-
85%	52,9	37,6	54,2	45,5	54,7	56,3	44,2	40,9	39,8	53,2	42,2	45,1	42,4	47,6	42,8	43,7	43,6	-
80%	37,9	50,2	54,8	41,3	56,1	43,6	43,7	38,7	41,4	55,7	41,4	43,6	51,9	55,9	50,0	53,8	38,7	-
75%	52,9	49,2	46,0	46,3	52,0	41,6	48,7	55,2	47,2	49,4	46,4	39,3	43,8	41,8	40,2	49,4	46,9	-
70%	38,0	39,2	46,4	48,2	43,1	53,4	53,7	37,0	41,5	56,1	55,0	39,6	53,5	56,5	39,0	51,6	41,9	-
65%	39,8	37,5	51,1	43,2	54,3	47,1	38,6	41,2	39,8	46,5	55,1	56,4	38,1	42,4	50,0	50,0	42,1	-
60%	24,4	38,2	35,3	20,9	30,2	34,9	28,8	28,5	35,3	22,2	28,7	39,7	24,1	34,8	38,8	38,4	30,1	-
55%	34,7	38,7	20,7	34,5	33,4	25,7	25,6	19,8	21,3	39,2	38,3	21,2	26,3	38,4	27,6	35,1	34,0	-
50%	26,9	37,1	25,7	31,4	23,8	24,8	23,4	37,2	28,3	29,0	22,9	36,8	23,0	25,9	31,5	31,1	35,7	-
45%	19,9	38,0	29,3	30,9	31,1	24,7	29,0	32,8	22,5	30,2	20,2	38,8	38,6	24,1	21,9	20,2	32,8	-
40%	34,1	30,1	38,1	23,4	38,2	32,8	26,6	34,6	29,5	37,5	34,3	32,4	25,6	33,5	25,8	28,1	31,0	-
35%	23,9	32,2	34,9	29,7	19,6	27,6	24,5	35,9	36,0	34,7	21,0	25,4	36,5	39,3	27,4	32,0	37,4	-
30%	34,6	33,5	28,9	16,9	33,4	19,8	36,8	17,9	31,2	36,1	35,9	28,1	19,2	23,1	28,1	28,8	34,8	-
25%	27,7	16,9	18,8	21,4	30,1	17,9	23,6	24,0	27,9	29,1	25,5	17,8	36,1	19,6	27,4	36,8	31,0	-
20%	27,5	29,6	29,6	33,8	36,4	26,3	26,2	31,7	31,4	18,8	36,2	23,9	29,5	27,2	32,5	17,2	25,7	-
15%	33,7	42,6	24,0	24,1	47,7	30,3	25,4	57,5	33,8	28,3	54,7	30,6	27,3	24,0	56,5	36,0	59,1	-
10%	56,2	49,0	50,7	47,4	58,3	57,0	60,5	58,5	60,6	44,7	46,1	49,4	60,7	47,2	57,7	50,1	45,0	-
5%	42,0	50,2	51,3	45,1	55,0	54,1	60,4	53,9	60,3	55,5	44,1	43,6	58,8	42,0	43,4	54,5	62,0	-
0%	57,0	41,2	58,5	55,8	55,6	47,0	53,7	60,8	46,5	56,3	42,6	60,8	50,5	55,9	44,5	53,4	60,5	-

Lisa 6 Kaitseralee 3 distantskaitse faas-maa lühis katsetulemused, lühise lahutusaeg (ms)

Lühise asukoht liinil	Relee toitepinge, V																	
	220	210	200	190	180	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80	79	78	75
100%	300,1	314,4	297,7	311,0	308,0	314,9	311,5	307,1	298,6	305,7	301,3	291,4	297,9	314,4	304,2	306,4	300,1	-
98%	297,9	295,3	315,9	288,3	301,3	311,7	299,1	315,9	289,9	315,0	302,0	290,7	313,5	312,2	292,3	302,7	303,6	-
97%	74,8	49,6	74,9	37,9	47,7	64,5	57,2	78,6	62,0	75,8	63,9	47,1	81,8	71,9	80,7	45,0	41,0	-
95%	40,9	49,1	43,3	56,8	39,6	51,7	56,1	42,0	52,6	56,5	55,4	40,8	45,3	40,0	43,7	39,9	56,6	-
90%	44,1	47,7	51,5	46,1	56,0	44,7	51,4	52,2	53,8	38,5	40,7	47,9	54,6	49,0	51,4	46,1	47,5	-
85%	49,1	46,5	53,2	42,3	37,2	37,4	42,9	49,9	49,8	54,5	56,8	45,0	52,6	56,3	38,2	55,6	46,6	-
80%	52,6	43,0	51,3	42,3	38,0	49,3	45,5	39,4	53,4	46,9	43,1	56,5	55,9	54,0	53,6	45,4	45,5	-
75%	51,2	37,8	45,0	38,4	42,3	55,8	43,6	39,5	45,7	51,2	41,7	39,2	42,7	37,2	42,2	45,3	43,3	-
70%	48,9	46,5	42,7	50,4	39,5	55,4	49,4	40,6	44,9	50,1	42,2	43,3	45,2	44,7	54,6	53,5	43,0	-
65%	43,1	54,0	45,9	43,9	41,5	42,4	44,0	40,1	53,0	47,3	54,9	53,6	40,7	50,3	39,8	46,6	40,8	-
60%	28,4	33,9	31,4	38,8	26,6	31,6	27,5	33,2	25,9	21,4	28,0	24,6	23,9	40,0	32,7	22,3	37,5	-
55%	28,0	39,4	25,4	33,1	25,8	37,3	39,9	27,5	27,6	38,6	31,1	33,2	31,0	20,5	32,9	27,8	22,4	-
50%	25,6	23,5	31,1	32,1	36,0	39,1	27,0	21,9	35,9	27,8	22,4	29,6	31,0	25,1	21,0	32,5	29,3	-
45%	23,4	31,3	25,8	37,2	22,9	36,8	33,9	20,1	22,0	27,9	36,7	29,8	21,0	30,5	28,4	22,6	21,6	-
40%	23,6	32,9	29,8	33,0	38,7	24,9	22,7	26,2	33,3	39,4	22,2	21,4	27,4	26,3	21,6	35,9	35,6	-
35%	33,0	31,6	41,3	40,3	35,0	29,4	26,0	41,2	42,3	29,8	36,5	40,5	38,7	29,6	34,5	38,6	35,5	-
30%	33,3	38,4	43,2	38,1	31,3	27,2	41,7	41,5	31,1	27,6	32,6	27,2	42,2	33,4	27,4	26,9	26,1	-
25%	31,4	35,5	29,5	42,6	35,8	38,0	33,5	36,8	28,4	38,4	42,7	32,9	35,0	32,4	42,4	28,6	32,3	-
20%	41,0	32,9	24,9	37,9	38,7	36,4	33,1	33,9	38,7	37,0	33,0	27,9	23,9	40,7	34,7	37,3	24,6	-
15%	29,2	38,8	25,7	34,1	24,8	38,7	27,7	24,0	28,2	32,5	35,8	25,7	27,4	25,3	32,5	41,1	42,5	-
10%	86,7	90,3	23,2	104,0	80,3	27,6	19,3	21,1	35,2	100,6	82,0	24,7	98,6	31,3	29,7	36,0	18,4	-
5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Lisa 7 Kaitserelee 3 voolukaitse katsetulemused, lühise lahutusaeg (ms)

Relee toitepinge, V	Lühisvool, kA					
	6,8 kA	7,2 kA	7,8 kA	8,2 kA	8,8 kA	9,4 kA
220	529,3	532,9	302,7	293,6	303,6	303,0
210	537,8	546,5	291,7	299,8	294,5	296,1
200	528,5	528,9	289,3	287,2	303,4	291,2
190	542,9	536,9	314,8	300,9	286,7	304,0
180	551,3	532,7	296,2	301,8	304,5	292,3
170	527,5	538,7	298,8	298,8	299,1	296,8
160	542,1	526,2	294,3	305,3	291,5	298,2
150	533,1	534,5	302,4	289,1	303,4	289,9
140	539,5	535,0	294,9	302,1	300,0	291,2
130	546,1	526,8	290,3	286,7	297,9	299,5
120	537,4	529,3	299,7	287,1	303,6	296,2
110	545,9	545,6	302,0	290,7	288,7	289,4
100	537,1	530,6	294,6	292,3	302,7	301,3
90	533,9	533,5	294,2	295,7	299,2	286,3
80	532,8	526,6	288,7	303,6	293,5	292,1
70	538,8	540,0	304,1	305,9	305,9	303,2
60	526,2	528,6	290,3	303,4	288,1	291,8