



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

LIIGPINGETE UURIMINE 330 kV ÕHULIINI LÜHISTE KORRAL PSCAD MUDELI
ABIL

OVERVOLTAGES ANALYSIS OF 330 kV OVERHEAD LINE IN THE CASE OF SHORT
CIRCUITS USING PSCAD MODEL

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Holger Kroon

Üliõpilaskood: 132146AAVM

Juhendajad: Ülo Treufeldt, vanemlektor

Uku Salumäe, insener

Tallinn, 2018

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.

“.....” 201.....

Autor:
/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees
/ nimi ja allkiri /

Lõputöö kokkuvõte

<i>Autor:</i> Holger Kroon	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> Liigpingete uurimine 330 kV õhuliini lühiste korral PSCAD mudeli abil	
<i>Kuupäev:</i> 23.05.2018	95 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Energeetika teaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Õppetool:</i> Energiasüsteemide õppetool	
<i>Töö juhendaja(d):</i> Ülo Treufeldt, Uku Salumäe	
<i>Töö konsultant (konsultandid):</i> puuduvad	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Käesolev töö annab ülevaate lühisest tingitud lülitusliigpingetest 330 kV elektrivõrgus olemasoleva Elering AS 330/110 kV õhuliini näitel. Töös vaadeldakse lühiseid ja nendest tingitud lülitusliigingeid esmalt teoreetilise poole pealt ja seejärel teostakse katseid mudeliga töö praktilises osas. Samuti vaadeldakse töös kahekorruselise 330/110 kV õhuliinil indutseeritud liigpingeid väljalülitatud 110 kV õhuliini ahela näitel.</p> <p>Töö tulemustest selgub, et liigpingepiirikute valikul on väga oluline määrata elektrivõrgus tekkida võivate liigpingete suurused. Samuti tuleb liigpingepiirikute parameetrite määramisel arvestada liigpingepiiriku tööpõhimõtetega ning kasutatava tehnoloogiaga. Lisaks selgub käesolevas töös, et 330 kV õhuliini ahelas esinevad liigpinged indutseerivad samuti ohtlikuid kõrgeid pingeid 110 kV õhuliini ahelasse.</p> <p>Töö tulemusi on võimalik ära kasutada 330 kV ja 110 kV alajaamade seadmete valikul ning alajaama seadmete ja inimeste kaitsel liigpingete eest.</p>	
<i>Märksõnad:</i> lühis, lülitusliigpinge, metalloksiid liigpingepiirik, PSCAD, indutseeritud pinge	

Summary of the Thesis

<i>Author:</i> Holger Kroon	<i>Kind of the work:</i> Magster thesis
<i>Title:</i> Overvoltages Analysis of 330 kV Overhead Line in the Case of Short Circuits using PSCAD Model	
<i>Date:</i> 23.05.2018	<i>95 pages</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology <i>Faculty:</i> Faculty of Power Engineering <i>Department:</i> Department Power Engineering and Mechatronics <i>Chair:</i> <i>Chaire of Power Systems</i>	
<i>Tutor(s) of the work:</i> Ülo Treufeldt, Uku Salumäe <i>Consultant(s):</i> nil	
<i>Abstract:</i> This paper gives an overview of switching overvoltages conditioned by short circuits in the 330 kV power system using an existing Elering AS 330/110 kV overhead line as an example. In the theoretical part short circuits and switching overvoltages are studied. After in the second part of this paper modelling of these cases are studied. Additionally, induced overvoltages are modelled using blind 110 kV line as an example. The results of this paper show the need for precise groundwork in order to find out the right parameters for the surge arresters. Surge arrester working principles and technological nuances must be taken into account while choosing the right surge arrester. Furthermore, it was discovered that the switching overvoltages in the 330 kV line induce dangerously high voltages into 110 kV line as well. The results of this paper can be used for choosing equipment for 330 kV and 110 kV substations and for choosing the protection equipment for the substations and for the crew.	
<i>Key words:</i> short circuit, switching overvoltage, metal-oxide surge arrester, PSCAD, induced voltage	

Sisukord

Autorideklaratsioon	2
Lõputöö kokkuvõte	3
Summary of the Thesis	4
Lõputöö ülesanne	7
Teema põhjendus.....	7
Töö eesmärk	7
Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:.....	7
Lähteandmed	8
Uurimismeetodid.....	8
Graafiline osa	8
Töö struktuur	8
Kasutatud kirjanduse allikad	8
Lõputöö konsultandid.....	9
Töö etapid ja ajakava.....	9
Eessõna.....	10
Sissejuhatus	11
1 Lühise asukohtade ja liikide määratlemine.....	13
1.1 Rikked.....	13
1.2 Lühised	17
1.3 Liigpinged.....	18
1.4 Liigpingelaine peegeldumine	23
1.5 Liigpingepiirikute valimise teoreetilised alused.....	26
2 PSCAD-mudeli ja katsete kirjeldus	34
2.1 Kasutatud PSCAD-mudeli kirjeldus.....	34
2.2 Liini taaslülitamine ATL-ga koormatud liini näitel	37
2.3 PSCAD-mudeliga teostatav katsete kava	40
3 Lühiste ja lülitusliigpingete uurimine PSCAD-mudeliga	43

3.1	Lühiskatsed liigpingete väljaselgitamiseks	43
4	Liigpingepiirikute valik, modelleerimine ja mõju	46
4.1	Liigpingepiirikute valimine PSCAD-mudelisse	46
4.2	Liigpingepiirikute mõju hindamine	48
4.3	Jääklaine uurimine PSCAD-mudeliga	54
5	Indutseeritud liigpingete uurimine	57
5.1	Indutseeritud pinge matemaatiline mudel	57
5.2	Kahekorruselise õhuliini parameetrid	64
5.3	Indutseeritud pingete uurimine PSCAD-mudeliga	66
6	Kokkuvõte	76
7	Kasutatud kirjandus	79
8	Lisad	81
L.1	.....	82
L.2	.....	83
L.3	.....	84
L.4	.....	85
L.5	.....	86
L.6	.....	87
L.7	.....	88
L.8	.....	89
L.9	.....	90
L.10	.....	91
L.11	.....	92
L.12	.....	93
L.13	.....	94
L.14	.....	95

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema: *Liigpingete uurimine 330 kV õhuliini lühiste korral PSCAD mudeli abil*
Üliõpilane, üliõpilaskood: Holger Kroon, 132146AAVMM

Eriala: Elektroenergeetika

Lõputöö liik: *magistritöö*

Lõputöö juhendajad: Ülo Treufeldt, Uku Salumäe

Lõputöö ülesande kehtivusaeg: 31.12.2018

Lõputöö esitamise tähtaeg: 25.05.2018 15:00

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Teema põhjendus

Teema on aktuaalne kahekorruseliste 330/110 kV õhuliinide puhul. Teema on oluline seoses Eleringi AS poolt rajatava kahekorruselise õhuliini talitluse ja liinis esinevate lülitusliigpingetega. Lisaks Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis seni tehtud uuringutele uuritakse käesolevas töös lühiste poolt põhjustatud lülitusliigpingeid kahekorruselises õhuliinis, liigpingepiirikute mõju sellistele liigpingetele ja 330 kV ahelates esinevate liigpingete mõju 110 kV ahelates esinevatele pingetele. Sellega on käesolev uurimistöö Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis tehtud uurimistööde loogiline jätk.

Töö eesmärk

Töö eesmärk on uurida lühiste poolt põhjustatud lülitusliigpingeid ning nende suurust ja ohtlikkust kahekorruselises 330/110 kV õhuliinis?

Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

1. Kuidas mõjutavad lühised 330/110 kV õhuliini lülitusliigpingeid?
2. Kuidas saaks kasutada liigpingepiirikuid ja milline on nende mõju lülitusliigpingete piiramisel?
3. Millised on 330 kV ahela lülitusliigpingete poolt indutseeritud liigpinged 110 kV ahelas?

Lähteandmed

- Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis loodud PSCAD-mudel;
- Kahekorruselise õhuliini parameetrid ja võrgu ekvivalentide parameetrid;
- Vajadusel lisaandmed Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudist ja Elering AS-ist.

Uurimismeetodid

PSCAD-mudeli edasiarendamine ning selle mudeli põhjal erinevate lühiste mõju uurimine lülitusliigpingetele. Metoodika põhineb modelleerimisel PSCAD tarkvara praktilisel rakendamisel. Andmete ja tulemuste analüüsiks kasutatakse Excel-tabelarvutust.

Graafiline osa

Tekstijoonised põhiosas, lisana esitatakse PSCAD-mudelis loodud kahekorruselise liini ja võrgu skeemid.

Töö struktuur

- Sisukord;
- Lõputöö ülesanne;
- Eessõna;
- Sissejuhatus;
- Lühiste asukohtade ja liikide määratlemine;
- PSCAD-mudeli ja katsete kirjeldus;
- Lühiste ja lülitusliigpingete uurimine PSCAD-mudeliga;
- Liigpingepiirikute valik, modelleerimine ja mõju;
- Indutseeritud liigpingete uurimine;
- Kokkuvõte;
- Kasutatud kirjandus;
- Lisad;

Kasutatud kirjanduse allikad

- Raamatud;
- Teadusartiklid;
- Aruanded;

- Standardid;
- 1. Dimpy Sood, Ms. Reduction of Switching Over Voltages in H.V. Transmission Line. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 4, Issue 6, June-2013, 64, ISSN 2229-5518 IJSER ©, 2013 pp 64-68.
- 2. Lou van der Sluis. Transients in Power Systems. Delft University of Technology. John Wiley & Sons, LTD. 2002. 207 pp.
- 3. Treufeldt, Ü. Kõrgepingetehnika. Loengukonspekt. TTÜ elektroenergeetika instituut. 2016. 183 lk.
- 4. Евдокунин Г. А., Дмитриев М. В., Гольдштейн С. Г., Иваницкий Ю. М. Коммутации воздушных линий высокого напряжения и воздействия на выключатели. «Новости Электротехники», №3(51), 2008. 13 с.

Lõputöö konsultandid

Konsultandid selguvad vajadusel töö koostamise käigus.

Töö etapid ja ajakava

1. Kirjanduse ülevaade ja sissejuhatus teemasse
 - a. Tähtaeg 15.03.2018
2. PSCAD mudeli kirjeldus ning võimalused
 - a. Tähtaeg 23.03.2018
3. Lühiste asukohtade ja liikide määramine 330 kV liinil. Siirdeprotsesside ja liigpingete uurimine erinevate lühiste tekkimise ja väljalülitamise korral PSCAD-mudeliga
 - a. Tähtaeg 06.04.2018
4. Liigpingepiirikute valik ning võimalike asukohtade määramine. Liigpingepiirikute modelleerimine ning mõju uurimine PSCAD-mudeli abil.
 - a. Tähtaeg 13.04.2017
5. Kahekorruselise õhuliini 330 kV ahela liigpingete poolt indutseeritud liigpingete uurimine 110 kV ahelas arvestades vastastikuse induktiooniga.
 - a. Tähtaeg 27.04.2017
6. Tulemuste analüüs ja kokkuvõtte tehtud tööst
 - a. Tähtaeg 10.05.2017

Eessõna

Käesolev töö on koostatud Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika instituudis tehtud uurimustöö „Lülitusliigpinged õhuliinides“ loogilise jätkuna. Idee töö teostamiseks pakkus välja käesoleva lõputöö juhendaja härra Ülo Treufeldt.

Kuna käesoleva töö koostamisel kasutati praktilise poole pealt õhuliini mudelit, mis oli koostatud töö autori tööandja – Elering AS – õhuliini näitel ning parameetritega, siis oli käesoleva töö autoril hea ligipääs kõikidele andmetele, mis puudutavad seda õhuliini. Elering AS soovil selle liini täpne asukoht jäetakse käesolevas töös mainimata. Seega saab Elering AS kasutada saadud töö tulemusi rikete analüüsimisel ning rikestest tulenevate riskide hindamisel.

Töö põhilisteks teoreetilisteks alusteks on lühiseid ning liigpingeid käsitlevad raamatud, aruanded ning artiklid.

Töö autor soovib tänada juhendajaid härra Ülo Treufeldti ja härra Uku Salumäed töö koostamiseks vajalike andmete andmise ning konsulteerimise jaoks vajaliku aja leidmise eest.

Holger Kroon

(+372) 55 55 61 62

holgerkroon1990@gmail.com

Sissejuhatus

Käesolev töö on koostatud Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika ja mehatroonika instituudis loodud aruande „Lülitusliigpinged õhuliinides“ loogilise jätkuna. Nimelt käsitletakse käesolevas magistritöös nimetatud aruandes välja pakutud edasisi uurimissuundasid:

- lühiste mõju uurimine lülitusliigpingetele;
- liigpingepiirikute mõju uurimine;
- kahekorruselises liinis indutseeritavate pingete uurimine;

Nimetatud uurimisteemad on tähtsad elektrisüsteemi projekteerimise ja käidu seisukohalt. Projekteerimisel peab võtma arvesse liigpingeid, mis tekivad lülitamistel ning lühiste olukorras. Lühised ei mõjuta vaid lühisele lähedal asuvate elektriseadmete talitust. Lühistest tingitud häiringute vähendamiseks teostatakse lülitamisi ning nendel lülitamistel võivad tekkida lülitusliigpinged, mis kujutavad ohtu elektriseadmetele ja inimestele.

Käesoleva töö on üles ehitatud loogika alusel, mille kohaselt tutvustatakse esmalt lühiseid ja nendest tingitud liigpingeid. Seejärel selgitatakse liigpingeid piiravate seadmete (liigpingepiirikud) tööpõhimõtteid ning parameetrite valimise aluseid. Valitud liigpingepiirikutega teostatakse katseid eelpool nimetaud aruande jaoks loodud mudeliga, selgitamaks välja nende liigpingepiirikute mõju. Nimetatud mudel kirjeldab ühte Eesti põhivõrguettevõtja Elering AS-le kuuluvat kahekorruselist 330/110 kV õhuliini, mille tähistused on jäetud mainimata Elering AS soovil.

Töö kolmas ja neljas punkt on praktilise iseloomuga ning nendes punktides teostatakse erinevaid katseid mudeliga. Kolmandas punktis teostatakse katseid, selgitamaks välja liigpingepiirikute parameetrid. Töö neljandas osas hinnatakse katsete käigus välja valitud liigpingepiirikute mõju lühisest tingitud liigpingete vähendamisele. Liigpingepiirikute valimisel on oluline määrata võimalike liigpingete suurused võimalikult täpselt. Üle- või aladimensioneeritud liigpingepiirik ei pruugi toimida sellel eesmärgil, milleks see alajaama paigaldatakse ning võib kujutada ohtu elektrisüsteemi stabiilsusele ning seadmele, mida liigpingepiirik kaitsma peab.

Töö viiendas osas vaadeldakse 330 kV õhuliinil tekkinud lühise mõjul tekkinud lülitusliigpingete mõju samadel mastidel paiknevale 110 kV ahelale. Sellised kahekorruselised liinid on ökonoomsed maa kasutamise seisukohalt, kuid paralleelselt paigaldatud õhuliinid

mõjutavad üksteist läbi elektromagnetiliste nähtuste, mis tekivad nende liinide vahel. Seepärast on oluline mõista ning kirjeldada selliseid mõjusid vältimaks vigasid elektriliinide projekteerimisel, alajaama seadmete valikul ning teenindava personali koolitamisel ja kaitsmisel. Sarnaselt käesoleva töö kolmandale ja neljandale punktile kasutatakse ka viienda punkti puhul mudelit leidmaks indutseeritud liigpinged 110 kV õhuliinil olukorras, kus samadel mastidel kulgeva 330 kV õhuliinil tekib lühis.

Töö lisades on toodud töö käigus teostatud katsete tulemused graafikute kujul, mis on võetud otse töös kasutatavast mudelist. Kasutamise hõlbustamiseks on need lisad A3-formaadis.

Seega on käesoleva töö eesmärk edasi anda esile kerkivaid aspekte, millest ei saa mööda vaadata selliste kahekorruseliste õhuliinide projekteerimisel ja käitamisel.

1 Lühise asukohtade ja liikide määratlemine

Elektrisüsteemis toimuvad siirdeprotsessid järskude muutuste ehk häiringute tagajärjel. Häiring põhjustab süsteemi tasakaalutuses ja see omakorda käivitab siirdeprotsessi. Siirdeprotsessi tulemusel tekivad laineprotsessid ning elektromagnetilised ja -mehhaanilised nähtused, mis on omavahel tihedalt seotud. Kõige kiiremini kulgevad laineprotsessid, mis ohustavad elektrisüsteemi liigpingetega. Elektromagnetilised nähtused on laineprotsessidest aeglasemad. [1]

Häiringute puudumisel ei teki süsteemis siirdeprotsesse. Kuigi elektrisüsteemi lülitusi ei nimetata häiringuteks, siis sellest hoolimata tekivad seadmete normaalsel elektrivõrku ühendamisel või sealt lahti ühendamisel siirdeprotsessid. Selliseks toiminguks on näiteks uue elektrijaama pingestamine. Samuti kaasnevad selliste siirdeprotsesside tulemusel laineprotsessid. Erinevalt normaaltalituses teostavatest lülitamistest ei saa lühiseid ning lühiste käigus tekkinud automaatseid lülitusprotseduure ajastada nii, et nendega kaasnevad siirdeprotsessid elektrivõrgule ning selle seadmetele kõige vähem mõju avaldaks. Seega on lühised ettearvamatud ning suure mõjuga. Järgnevalt vaadeldaksegi erinevat tüüpi rikkeid ja nendest tulenevaid lühiseid.

1.1 Rikked

Järgnevalt vaadeldakse ja kirjeldatakse lühiseid lähtudes nende asukohtadest elektrisüsteemis. Äikesest põhjustatud lühiseid ning liigpingeid käesolevas töös ei käsitleta. Äikesest põhjustatud lühised ja liigpinged on ettearvamatult iseloomuga ning nende eest seadmete kaitsmine on lahendatud juba seadmete projekteerimise käigus.

Alajaamades võivad tekkida lühised erinevatel põhjustel [1]:

- seadmete rikked või väärtoimingud;
- inimlikud eksimused;
- liigkoormused;
- välgulöögid.

Käesolevas töös ei käsitleta alajaamas tekkida võivaid lühiseid, sest alajaamade puhul on tegu selgelt piiritletud asukohaga, kus võõrastel isikutel ligipääs puudub. Seal kasutatavad seadmed on kontrollitud ning seadmetele seatud kõrgete nõudmiste tõttu esineb väärtoimingud harva. Inimlikud eksimuste vältimiseks koolitatakse regulaarselt käiduspetsialiste ning dispetsereid. Välgulöögid sagedus sõltub ilmastikust ning on seetõttu pikas ajahorisondis ettearvamatult

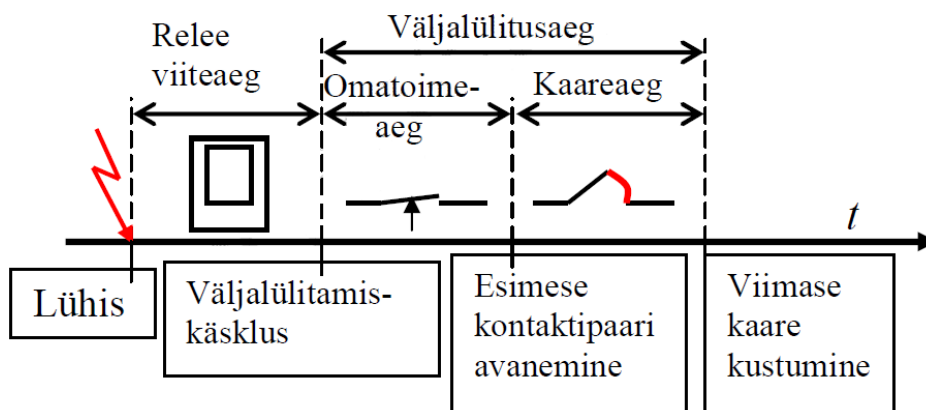
iseloomuga. Alajaama rajatud piksekaitseadmed aitavad vähendada välgulöökidest tingitud liigpingeid. Selleks projekteeritaks alajaama piksekaitse süsteem vastavalt standardile EVS-EN 61936-1. Käesolevas töös käsitletakse liigpingepiirikuid, mis paiknevad alajaamas kaitstavate seadmete (valdavalt jõutrafo ees), sest just seal omab liigpingepiirik kõige rohkem mõju. [2]

Alajaamadesse koonduvad kokku erinevates suundades rajatud õhu- ja kaabelliinid. Seal jaotatakse kõrgema pingega õhuliinidega ülekantav elektrienergia madalama pingega elektrienergiaks, mis edastatakse edasi lõpptarbijale. Lisaks liinide sisestusele on alajaamades ka trafod, millede sisse ja välja lülitamiseks kasutatakse võimsuslülituid.

Võimsuslülitid on alajaama seade, mida kasutatakse võimsuste lülitamiseks. Normaalkordades peab võimsuslülitid olema võimeline taluma suurt elektrilist koormust ning lülitama sisse ja välja erinevaid kõrgepingeseadmeid. Lühiste korral peab see seade olema võimeline kiire lülitamisega kaitsma seadmeid, mida sellega kokku on ühendatud: alajaama latiseksioonid, liinid ja trafod. Võimsuslülitid peab olema võimeline võrgust eraldama lühisest haaratud elektrisüsteemi elementi nii, et mõju teistele elektrisüsteemi elementidele oleks minimaalne. Seetõttu peab võimsuslülitid olema võimeline lülitama suuri võimsusi ja voolusid, mis ei ole omased elektrisüsteemi normaaltalitusele. [1] [3]

Võimsuslülitil võivad esineda järgmised rikked [4]:

- mehaanilised;
- elektrilised;
- isolatsiooni rikked.

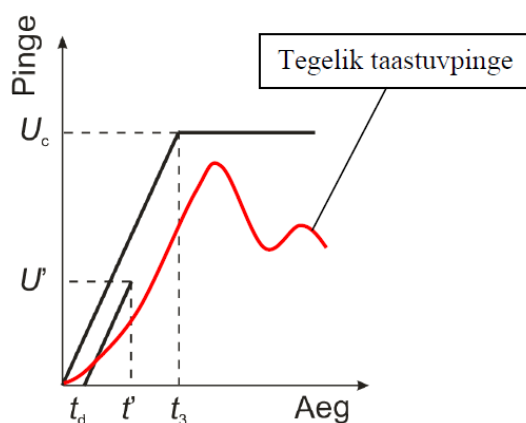


Joonis 1.1 Lülitamise viiteaegade skeem lühise näitel [2]

Võimsuslülitid puhul on kõige tähtsam selle mehhaanilise seadme lülitamise viiteaeg (vt joonis 1.1). Võimsuslülitid projekteerimisel on arvestatud seadme lülituskiirusega nii, et iga lülitid kolmest poolusest (faasilülitid) lülituks õiges järjekorras ning õigeaegselt. 110 kV ja kõrgematel

pingetele juhitakse võimsuslülititeid pooluste kaupa ehk faas lülitatakse sisse siis, kui vool läbib null-hetke. Lühise tuvastanud juhtimisseade (näiteks releekaitse seade) annab lülitile signaali alajaamas liin või trafo ülejäänud süsteemist eraldada. Ühefaasiliste lühiste korral lahutatakse võimsuslülitiga vaid lühisest haaratud faas, säilitamaks sünkronismi. Nagu näha üleval toodud jooniselt (vt joonis 1.1), siis koosneb väljalülitamise aega kahest komponendist: omatoimeaeg ja kaareaeg. [2]

Võimsuslülitite taluvuse taastuvpingele määrab elektrilise tugevuse taastumine kontaktide vahel. Taastuvpinged sõltuvad võrgu parameetritest ja konfiguratsioonist. 110 kV ja kõrgema pingega võrkudes on tavapärane, et taastuvpinge tõus on taastuvpinge siirdeprotsessi alguseosas kiirem kui selle järgnevas osas. Seepärast kasutatakse 110 kV ja kõrgemal pingel neljaparametrisi piirkõveraid (parameetrid U_1 ja t_1 ning U_c ja t_2). Keskpinge-lülitite puhul kasutatakse kaheparametrisi piirkõveraid (parameetrid U_c ja t_3) (vt joonis 1.2). Võimsuslülitile põikkondensaatori lisamine aeglustab taastuvpinge siirdeprotsessi veelgi protsessi alguseosas, sellele vastavad nihutatud karakteristikud (t_d , U' ja t'). [2]



Joonis 1.2 Võimsuslülitite taastuvpinge piirkõver 110 kV ja kõrgemal pingel võimsuslülitite jaoks [2]

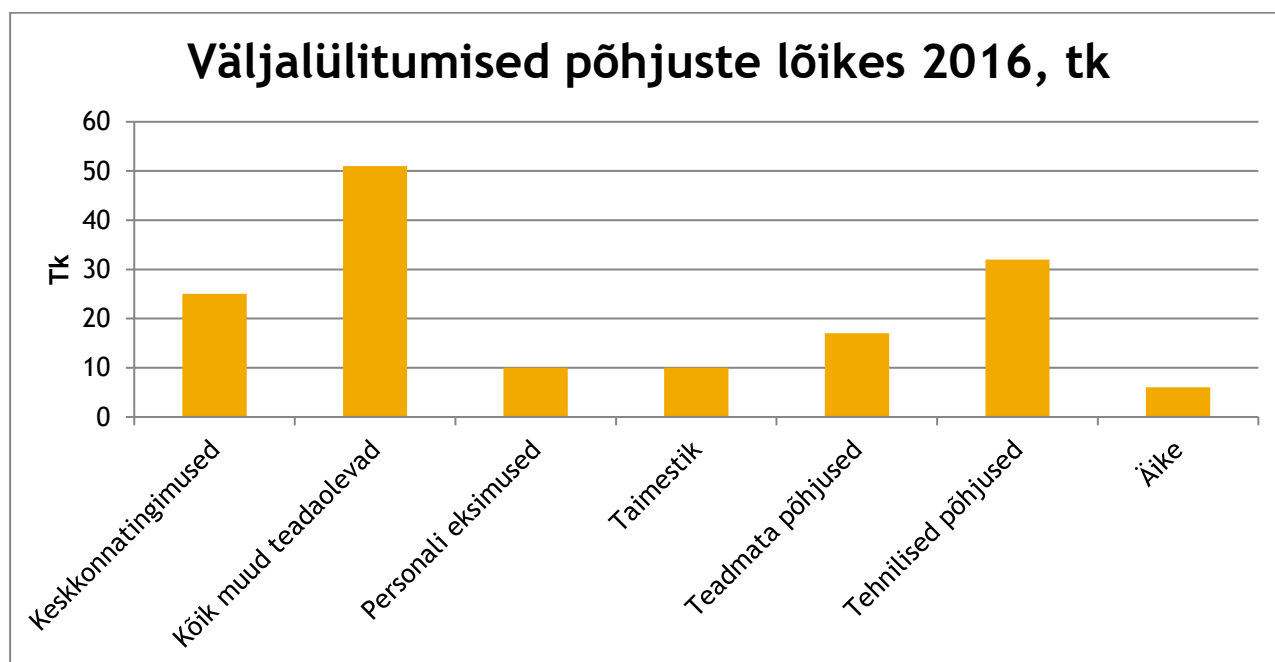
Võimsuslülitite suudab lühisvoolu töökindlalt välja lülitada, kui tegelik taastuvpinge (vt joonis 1.2, punane joon) jääb igas punktis madalamale normeeritud taastuvpinge kõverast. [2]

Käesoleva töö punktis 3.1 on kirjeldatud võimsuslülitite klemmidel tekkinud pingete muutused lühise ajal.

Sagedasti võivad lühised esineda õhuliinidel, sest just õhuliinid on need elektrisüsteemi elemendid, mis paiknevad erinevate tingimustega kohtades (lagedatel põldudel, tihedates

metsades, soodes jne) ning sellest tingituna võivad erinevad loodusjõud ning inimtegevus häirida elektriliinide tööd.

Kesk- ja kõrgepingevõrkudes tuleb kõige enam ette ühefaasilisi lühiseid sagedusega 65%. Kahefaasilisi maalühiseid umbes 20% ja kolmefaasilisi lühiseid kõigest 5% lühisejuhtumitest. Ühefaasiliste lühiste põhjustajaks on linnud, loomad ning taimestik. 2016.¹ aastal esines Eleringi võrgus ühefaasilisi lühiseid 20 korda ehk 20% kõikidest väljalülitamistest (vt joonis 1.3). Ühefaasiliste lühiste puhul kasutatakse taaslülitamist ning see on enamikel juhtudel edukas. [1] [5]



Joonis 1.3 Põhivõrgu väljalülitamiste statistika aastal 2016 [5]

Lühisvoolu suurus sõltub lisaks lühise asukohale ja iseloomule lisaks veel ka elektrisüsteemi talitusskeemist ja lühisele eelnenud seisundimuutujatest. Nende järgi eristatakse suurimat ja väiksemat lühisvoolu: suurimat lühisvoolu kasutatakse seadmete parameetrite dimensioneerimisel ja väiksemat lühisvoolu kasutatakse releekaitseseadmete sätete määramisel. Lühisevoolude arvutamine on tähtis elektrisüsteemi planeerimise- ja

¹ Käesoleva magistritöö koostamise ajal ei olnud Varustuskindluse Aruande 2018 raport veel avalik.

juhtimisülesannete lahendamisel ning elektrisüsteemi seadmete projekteerimisel nagu näiteks [1]:

- elektrivõrgu konfiguratsiooni valikul;
- klientide töötingimuste selgitamisel avariolukordades;
- elektrivõrgu aparatuuri ja elektrijuhtide valikul;
- kaitseseadmete valikul ja sätete määramisel;
- neutraali maanduste asukoha ja takistuse määramisel;
- kaarekustustuspoolide asukoha ja parameetrite valikul;
- kaitsemaanduste projekteerimisel ja kontrollimisel;
- sünkroonmasinate väljakustutusseadmete parameetrite määramisel;
- sünkroonmasinate ergutusüsteemide valikul ja sätete määramisel;
- avariolukordade analüüsil.

1.2 Lühised

Lühis on olematu või väikese takistusega plaanimata ühendus vooluahelas kahe või enama normaalselt erineva potentsiaaliga punkti vahel. Erandina võivad lühised olla ka ettekavatsetud (õhuliinide jäite sulatamine, mõõtmised, katkestused). Lühise tagajärjel väheneb järsult elektri ahela takistus, millega kaasneb voolu tunduv ja ohtlik suurenemine ning pinge märgatav alanemine. Eriti suur on voolu ja pinge muutumine lühisekoha lähedal. [1]

Pinge alanemine häirib oluliselt tarbijaid. Suur vool võib aga põhjustada elektrijuhtide liigkuumenemist ja tekitada juhtide vahel ohtlikult suuri mehhaanilisi jõudusid. Liigkuumenemine viib riknenud isolatsioonini, mehhaanilise vastupidavuse vähenemiseni ning liigkuumenenud seade võib süttida ning seetõttu kujutada ohtu tervisele ja varale. Lühisvoolude elektromehaanilised jõud võivad elektriseadme purustada. [1]

Lühise liigid

Lühiseid liigitatakse metalseteks ehk jääklühisteks ja kaarlühisteks. Jääklühisel on faasidevaheline või faas-maa vaheline takistus lühisekohas null. Kaarlühise puhul lisandub lühisekoha takistusele ka elektrikaare takistus. Seega on kaarlühise takistus suurem kui jääklühisel. [1]

Jäiklühised liigitatakse haaratud faaside alusel järgmiselt [1]:

- kolmefaasilised $F^{(3)}$;
- kahefaasilised $F^{(2)}$;
- ühefaasilised $F^{(1)}$ ja
- kahefaasilised maalühised $F^{(1,1)}$.

Kõik eelloetletud lühised (va kolmefaasiline $F^{(3)}$) on asümmeetrilised ehk lühisepunktis nullpotentsiaali ei teki. [1]

Asümmeetrilised on kahe- ja ühefaasilised lühised ning kahe-faasilised maalühised. Asümmeetrilised lühised haaravad vaid osa faase ja muudavad kolmefaasilise süsteemilühise kohas asümmeetriliseks. Lühisekohas tekivad asümmeetrilised voolud ja pinged muudavad asümmeetriliseks ka ülejäänud süsteemi talituse. [1]

Käesoleva töö praktilises osas (vt p 3.1) teostatakse erinevat liiki lühiseid, et välja selgitada kõige rohkem alajaamade seadmeid häirivad lühise olukorrad.

Kolmefaasiline lühis on selline lühis, kus kõik kolm faasi on võrdsetel tingimustel lühistatud maaga ning tekkinud lühis on seega sümmeetriline. Peale lühise tekkimist jaguneb elektriabel kaheks osaks: elektrisüsteemiga ühendatud osa ning ilma toitetä osaks. Ilma toitetä osa säilitab voolu vaid lühikest aega liini induktiivsuste L eelnevalt kogutud energia arvelt. Elektrisüsteemiga ühendatud elektriabehela osas tekkivad siirdeprotsessid on kirjeldatud mittehomoqeensete diferentsiaalvõrranditega. Nagu sümmeetrilise süsteemi, siis ka sümmeetrilise lühise korral on voolude summa igal ajahetkel null. Lühise hetkel toimub voolu perioodilise komponendi amplituudi hüppeline suurenemine lühise-eelselt väärtuselt I_m lühiseväärtuseni I_{km} . Kuna induktiivses ahelas ei saa vool hüppeliselt muutuda, siis kompenseeritakse perioodilise komponendi hüpe aperioidilise komponendiga. Arvutuslikuks loetakse võimalikku hüpet I_{km} , mis tekib tühijooksul töötanud ahela lühistamisel voolu amplituudväärtuse hetkel. Sel juhul võrdub ka aperioidilise komponendi algväärtus lühisvoolu perioodilise komponendi amplituudiga $i_{a0}=I_{km}$. [1]

1.3 Liigpinged

Lisaks lühisetele on elektrisüsteemi stabiilisuse seisukohalt tähtsad ka liigpinged. Liigpingeteks nimetatakse pingeid, mille väärtus ületab isolatsioonidel ettenähud maksimaalset pinget.

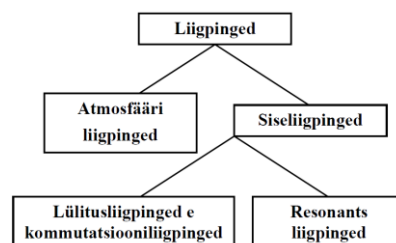
Liigpinged jagatakse kolme rühma põhjuste alusel järgmiselt [2]:

1. atmosfäärilised liigpinged e välguliigpinged
 - kestus alla 1 ms;
 - energiasisaldus väike;
 - amplituudväärtus väga kõrge.
2. lülitusliigpinged ehk kommutatsiooni liigpinged
 - kestuse pikkus enamasti millisekundites;
 - plaanilised ja avariilised lülitused;
 - lühised;
 - juhtme katkemised;
 - suure energiasisaldusega;
3. resonantsliigpinged
 - ferresonants;
 - isoleeritud või resonantsmaandatud neutraaliga võrgus ühefaasiline maalühis;
 - sagedus süsteemi sagedusega sarnane (nt 50 Hz) või selle lähedane;
 - kestus võib kesta tunde;
 - suure energiasisaldusega.

Liigpinged tekivad näiteks peale lühist liinil, mille tulemusena langeb pinge väga madalale. Liini taaspingestamisel võib liigpinge impulss ohustada seadmete isolatsiooni. Isolatsioonidel ettenähtud pinge U_m on tavaliselt suurima lubatava kestevpinge U_{lub} maksimaalväärtus [6]:

- faasi ja maa vahelisele isolatsioonile $U_m = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_{lub}$ (1.1)
- faasi ja maa vahelisele isolatsioonile $U_m = \sqrt{2} U_{lub}$ (1.2)

Liigpinged jagunevad atmosfääri liigpingeteks (näiteks äike) ja siseliigpingeteks, mis tekivad elektrisüsteemi siseselt (vt joonis 1.4).



Joonis 1.4 Liigpingete liigitus [6]

Käesolevas töös vaadeldakse ainult siseliigpingetest lülitusliigpingeid, mille määravad omadused on järgmised [6]:

- võrreldes atmosfääriliste liigpingetega väiksem amplituud;
- võrreldes atmosfääriliste liigpingetega pikem kestus;
- enamasti võnkuv impulss.

Siseliigpingetest resonantsliigpinged tekivad elektrisüsteemi installeeritud mahtvuslike ja induktiivsete seadmete vahel tekkivate võnkeprotsesside tõttu. Normaaltalitusel võnkeprotsessid mõju elektrisüsteemile ei avalda, kuid võivad avaldada mõju süsteemis toimunud järskude protsesside mõjul (lülitamised, lühised, katkestused) ja ebanormaalsed harmoonikud elektrisüsteemis võivad esile kutsuda mahtvustesse salvestunud elektrienergia ja induktiivsustesse salvestunud magneetilise energia omavahelis võnkumisi. [6]

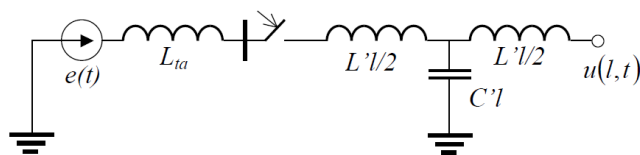
Lülitusliigpingete põhjused võivad olla järgmised [6]:

- liini ja trafode sisselülitamine;
- liinide taaspingestamine automaatse taaslülituse automaatika (ATL) abil;
- koormamata liini väljalülitamine;
- koormamata trafo väljalülitamine;
- ebapüsiv kaar-maaühendus.

Resonantsliigpingete põhjused võivad olla järgmised [6]:

- resonants võrgusageduslikul sagedusel (50 Hz);
- kõrgemate harmoonikute resonants;
- ferresonants;
- madalharmoonikute resonants.

Liini sisselülitamisel alajaamas tekib pingelainete peegeldumise tõttu suurim pinge liini alguses (lühisest kõige kaugemal, vt joonis 1.5). Koormamata liini puhul tekivad samuti suurimad pinged liini alguses siis, kui sisselülitamine toimub elektromotoorjõu amplituud väärtuse juures: vabaharmoonikute amplituud on suurim liini sisselülitamise korral kui pinge nurk on 90° või 270° . [6]



Joonis 1.5 Liini sisselülitamise skeem [6]

Skeemil (vt joonis 1.5) toodud elektromotoorjõud avaldub valemiga [6]:

$$e(t) = E_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1.3)$$

kus

E_m – toitepinge amplituudväärtus;

ω - võrgusagedus;

φ – pingesisselülitamise nurk;

Joonis 1.5 toodud tähised:

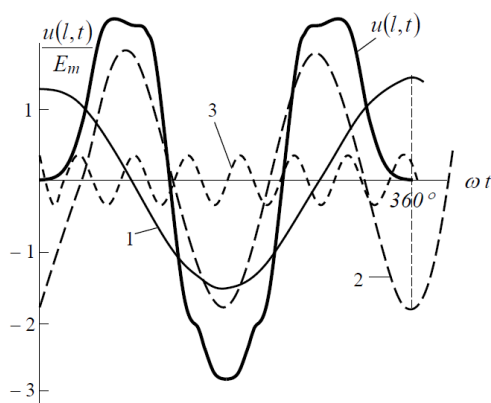
L_{ta} - toiteallika induktiivsus;

L' – liini kilomeetri induktiivsus;

l – liini pikkus;

$u(l,t)$ – pinge liini lõpus.

Liini lõpus tekkiva pingea $u(l,t)$ ja selle peamised komponendid on kirjeldatud all toodud pingea graafikult (vt joonis 1.6).



Joonis 1.6 Koormamata liini lõpus tekkiva pingea komponendid [7]

Joonis 1.6 toodud numbrite tähistused on järgmised:

1- pingea sundkomponent;

- 2- vabavõnkumiste 1. järku harmoonik;
- 3- vabavõnkumiste 2. järku harmoonik.

Nagu näha ülal toodu graafikult (vt joonis 1.6), siis pinge sundkomponent on väiksema amplituud väärtusega kui liini alguses² tekkiva pinge amplituud. Liini alguses tekkiva pinge amplituudi teevad suureks liini lõpus summeeruvad peegelduvad pingelained. Liini alguses tekkiv kõrgem pinge langeb liini lõpus ekvivalentsele mahutuvusele C_{ekv} ning avaldub järgmise valemiga [7] :

$$u(l, t) = u_s + u_{v1} = E_m \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega^2} \left[\sin(\omega t + \varphi) - \sqrt{\sin^2 \varphi + \left(\frac{\omega}{\omega_1} \cos \varphi \right)^2} e^{-\delta t} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \right]$$

(1.4),

kus

E_m – toitepinge (elektromotoorjõu) amplituudväärtus;

ω – võrgusagedus;

ω_1 – vabavõnkumiste esimese harmooniku sagedus;

φ – pinge nurk liini sisselülitamise hetkel;

φ_1 – vabavõnkumiste faasinurk;

δ – sumbumistegur.

Valemist (1.4) jäeldub, et liini alguses (lühisest kõige kaugemal) kujunev peegelduslainete summaarne maksimaalne pinge sõltub liini sisselülitamisel olevast pinge nurgast ning vabavõnkumiste esimese harmooniku sagedusest. Need parameetrid määravad ära vabavõnkumiste amplituudi suuruse A , mis avaldub valemiga [7]:

$$A = E_m \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega^2} \sqrt{\sin^2 \varphi + \left(\frac{\omega}{\omega_1} \cos \varphi \right)^2} \quad (1.5)$$

Realistlike ülekandeliinide puhul on vabavõnkumiste sagedus ω_1 (põhiharmoonik) suurem võrgusagedusest ω (50 Hz). Valemi (1.5) järgi tekivad kõive suuremad vabavõnkumiste

² Kirjandusallikas [7] on nimetatud lühise juures olevat liini osa liini alguseks ja lühisest kõige kaugemat osa liini lõpuks. Käesolevas töös kasutatakse liini alguse ja lõpu nimetamisel vastupidist määratlust.

amplituudid (A) siis kui sisselülitamisnurkad φ on 90° või 270° lähedal. Lisaks võrgusagedusest suurema sagedusega põhiharmoonikule esinevad reaalsel liinidel ka vabavõnkumiste kõrgemad harmoonikud, mille sageduse kasvades amplituudid vähenevad. Sellest hoolimata võivad ka väikese amplituudida vabavõnkumiste harmoonikud liini alguses pinge amplituutväärtust mõnevõrra tõsta. Vabavõnkumiste kõrgemate harmoonikute mõju sõltub nende harmoonikute sumbumiskiirusest liinis, mida hinnatakse 45% võrra kahanemist ühe võrgusagedusliku ($\omega = 50$ Hz) täisperioodi jooksul ($T = 0,02$ s). [7]

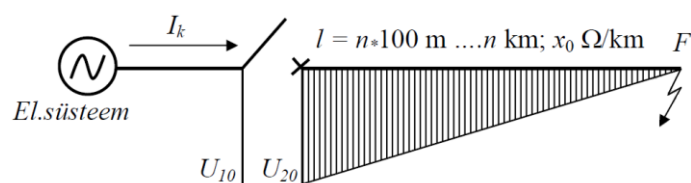
Liini sisselülitamisel tekkiva liigpinge hindamiseks kasutatakse löögitegurit K , mis näitab vabavõnkumiste põhiharmooniku sageduse ja võrgusageduse suhet, Löögitegur K avaldub valemiga [7]:

$$K = \frac{\omega_1}{\omega} \quad (1.6)$$

Valemist (1.6)(1.6)(1.6) avaldub, et mida lähemal on vabavõnkumiste löögitegur toiteallika sagedusele, seda väiksem on löögitegur. Löögitegur on kõige suurem ($K=3$), kui sisselülitamisnurk $\varphi=90^\circ$, sest siis ei lange vabavõnkumiste põhiharmooniku ja toiteallika sageduse maksimumid kokku.

1.4 Liigpingelaine peegeldumine

Liini väljalülitamisel jääb liniebaühtlaselt jaotunud jääklaeng, mille ühtlustumise protsess tekitab liinis pinge kulglaineid. Pinge kulglainete liikumist ja peegeldumist on hea kirjeldada lähilühiste näitel. Käesolevas töös käsitletud lühised ei ole lähilühised kuid sellegi poolest sobib kirjandusallikas [2] kirjeldatud lähilühiste punktis kirjeldatud liigpingelainete kirjeldus ka pikas liinis tekkinud liigpingelainete kirjeldamiseks.



Joonis 1.7 Lähilühiste korral tekkiv laeng liinis [2]

Jäiklühise (kõik käesolevas töö raames teostatud katsed) korral liini lõpus on pinge null ja lüliti kontaktidel on pinge, mille määrab ära lühisvool ja liini takistus. Lüliti suletud kontaktidele avaldub pinge tippväärtus valemiga [2]:

$$U_0 = U_{10} = U_{20} = \sqrt{2} I_k x_l \quad (1.7)$$

kus

U_0 – pinge võimsuslüliti kontaktide vahel;

U_{10} – pinge võimsuslüliti elektrivõrgu poolses otsas;

U_{20} – pinge liini võimsuslüliti poolses otsas;

I_k – lühisool;

x_l – liini reaktiivtakistus;

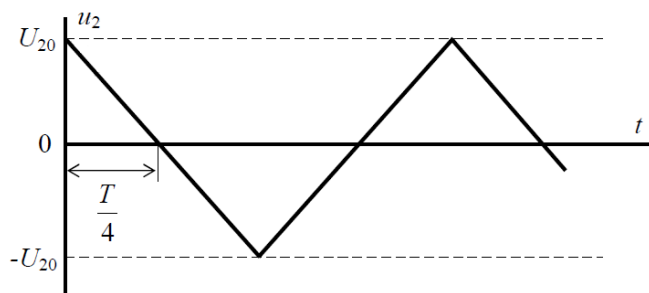
Pärast võimsuslüliti väljalülitamist (kaare kustumist) jaguneb süsteem kahte ossa, milles toimuvad protsessid teineteisest ei sõltu [2]:

1. Elektrisüsteemi poolses osas (liini algus) toimub pinge taastumine vastavalt elektrisüsteemi parameetritest tingitud seaduspärasustele.
2. Liinipoolses osas on piki liini ebaühtlaselt jaotunud elektrilaeng, mis on suurim lüliti kontakti lähedused (liini algus) ja null lühisekohas (vt joonis 1.7).

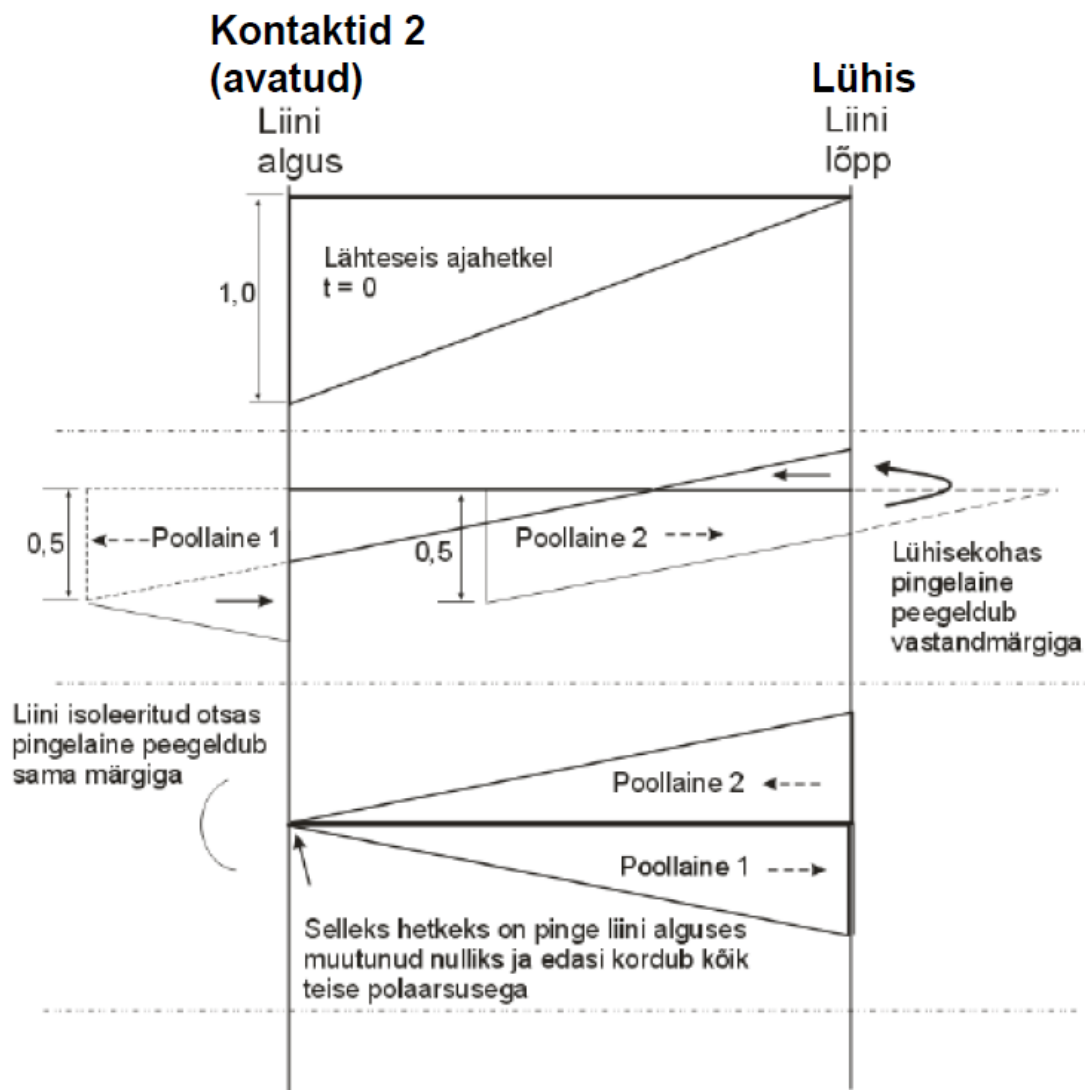
Liinis olev ebaühtlaselt jaotunud laeng püüab jaotuda liinis ühtlaselt, mille tulemusel tekivad kulglained. Vastavalt elektromagnetiliste lainete liinis levimise teooriale koosnevad kulglained kahest komponendist – kahes poollainest, millest kummagi tippväärtus on pool pinge esialgsest väärtusest. [2]

Poollained liiguvad vastupidistes suundades: päri- ja vastassuunaline poollaine. Laengute ümberpaiknemine (liikumine) põhjustab juhi ümber magnetvälja ja juhise voolu. Kulglaine peegeldub lühisekohast (liini lõpust) tagasi vastandmärgiga (lainetakistus $Z_l=0$) ja liini avatud otsast (algusest) sama märgiga ($Z_l=\infty$). [2]

Joonis 1.9 kirjeldab kulglaine levimise protsessi välja lülitatud liinis. Kulglaine peegeldumisprotsessi tulemusel tekib liini alguse võimsuslüliti liinipoolsetel kontaktidel (liini algus, vt joonis 1.9) hammaspinge, mis suurendab oluliselt transient-taastuvpinge kasvukiirust ja on ohtlik lülitile (vt joonis 1.8). [2]



Joonis 1.8 Hammaspinge kuju võimsuslüli kontaktidel [2]



Joonis 1.9 Kulglaine peegeldumise protsess [2]

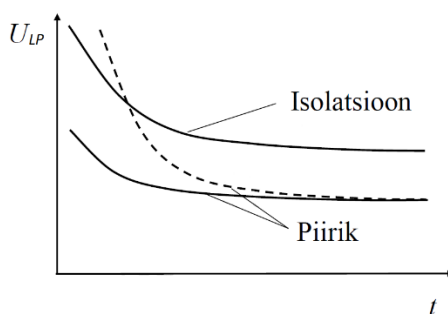
Käesolevas töös kasutati modelleerimisel PSCAD-mudelis esitatud 330 kV õhuliini ning lähtudes üleval toodud joonisel (vt joonis 1.9) esitatud kulglaine liikumist, siis katsete 1, 3 ja 5 korral on selleks liini alguseks alajaam E ja liini lõpuks alajaam A. Katsete 2, 4 ja 6 käigus on liini alguseks alajaam A ja liini lõpuks alajaam E. Nimetatud katsete liigpingepiirikutega varustatud variantide puhul kehtib sama analoog.

Käesolevas töös teostati katsed ühe ja kolmefaasilise lühisega. Kuna katsed olid mudeliga, siis virtuaalse võimsuslüliti puhul ei pea arvestama sellega, et reaalse võimsuslüliti korral on asümmeetriline lülitamine (ühefaasiline lühis kogu liini väljalülitamisega) ohtlikum kui sümmeetrilise lühise väljalülitamine. Nimelt siis jääb pärast kaare kustumist lahknevate kontaktide vahele kaare jälg, mis soodustab kaare taassüttimist kontaktide vahel. Liini asümmeetrilisel sisselülitamisel (lühis või asümmeetriline koormus) kaarejälge ei esine. [4]

1.5 Liigpingepiirikute valimise teoreetilised alused

Liigpingepiirikud on seadmed, mis kaitsevad elektrisüsteemi seadmeid liigpingete eest. Liigpinged on kõik pinged, mis ületavad lubatavat kestev-faaspinge amplituudi U_{max} . [2]

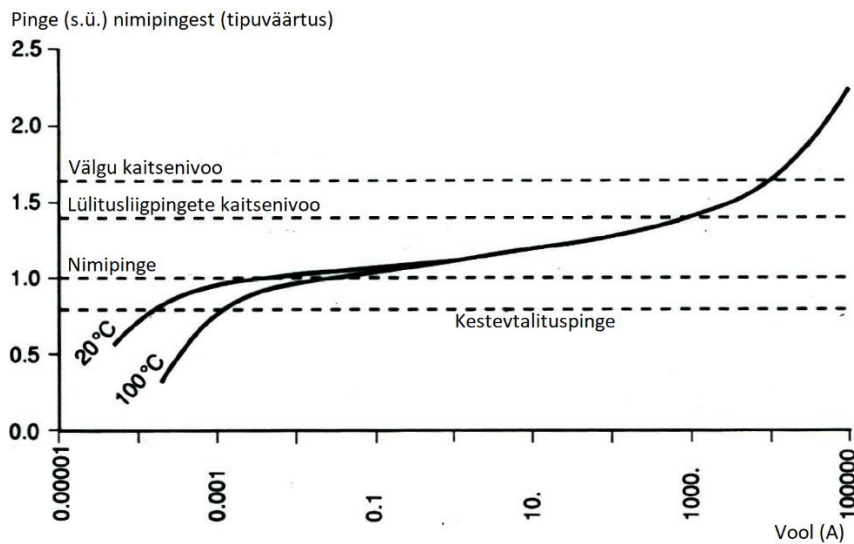
Liigpingepiiriku tööpõhimõte seisneb selles, et liigpingepiirik peab rakenduma isolatsiooni läbilöögipingest madalamal pingel. Liigpingepiiriku tööd iseloomustav volt-sekund-karakteristik (vt joonis 1.10), millel on kujutatud elektriseadmed isolatsiooni maksimaalne pinge ning liigpingepiiriku toimimise pinge. Mida kauem liigpinge kestab, seda suuremat ohtu kujutab see elektriseadmetele. Kui liigpingepiiriku volt-sekund karakteristik (vt joonis 1.10, katkendlik joon) tõuseb isolatsiooni läbilöögipingest varem, siis tekib oht, et seadme isolatsioon rikneb tekkiva läbilöögi tõttu. Joonis 1.12 kirjeldab liigpingepiiriku valimise protseduuri. [2]



Joonis 1.10 Liigpingepiiriku toimimise iseloomustav volt-sekund karakteristik [2]

Liigpingepiirikute põhitüübid on järgmised [2]:

- kaitsesüdamikud;
- ventiillahendid – uusi ventiillahendeid enam ei paigaldata;
- metalloksiid liigpingepiirikud.



Joonis 1.11 Metalloksiid liigpingepiiriku volt-amper karakteristik [2]

Metalloksiid liigpingepiiriku karakteristik sõltub ka liigpingepiiriku temperatuurist (vt joonis 1.11), eriti märgatavalt normaalsete pingete korral. Liigpingepiiriku nimipinge on pinge, mille juures kindlaksmääratud katsetingimustes liigpingepiiriku temperatuur ei ületa etteantud väärtust. Liigpingepiiriku nimipinge võetakse natuke kõrgem elektrivõrgu nimipingest. Temperatuuri kasvades liigpingepiiriku takistus väheneb ja vool kasvab. [2]

Ajutiste liigpingete (TOV – *Temporary over voltage*) korral ohustab liigpingepiirikuid soojuslik läbilöök. Välgu impulssvool põhjustab liigpingepiirikule peaaegu adiabaatilise kuumenemise ehk esialgu jääb kogu energia liigpingepiirikusse ja temperatuur tõuseb, seepärast on liigpingepiiriku soojusliku stabiilsuse seisukohalt oluline liigpingepiiriku soojusneeldumisvõime. Liigpingepiiriku vastupidavust ajutistele liigpingetele (U_{TOV}) iseloomustab liigpinge taluvustegur k_{TOV} . [2]

Liigpinge määramiseks kasutatakse suurust: liigpinge kordsus k . Liigpinge kordsus leitakse järgmise valemiga [2]:

$$k = \frac{U_{LP}}{U_{max}} \quad (1.8)$$

kus

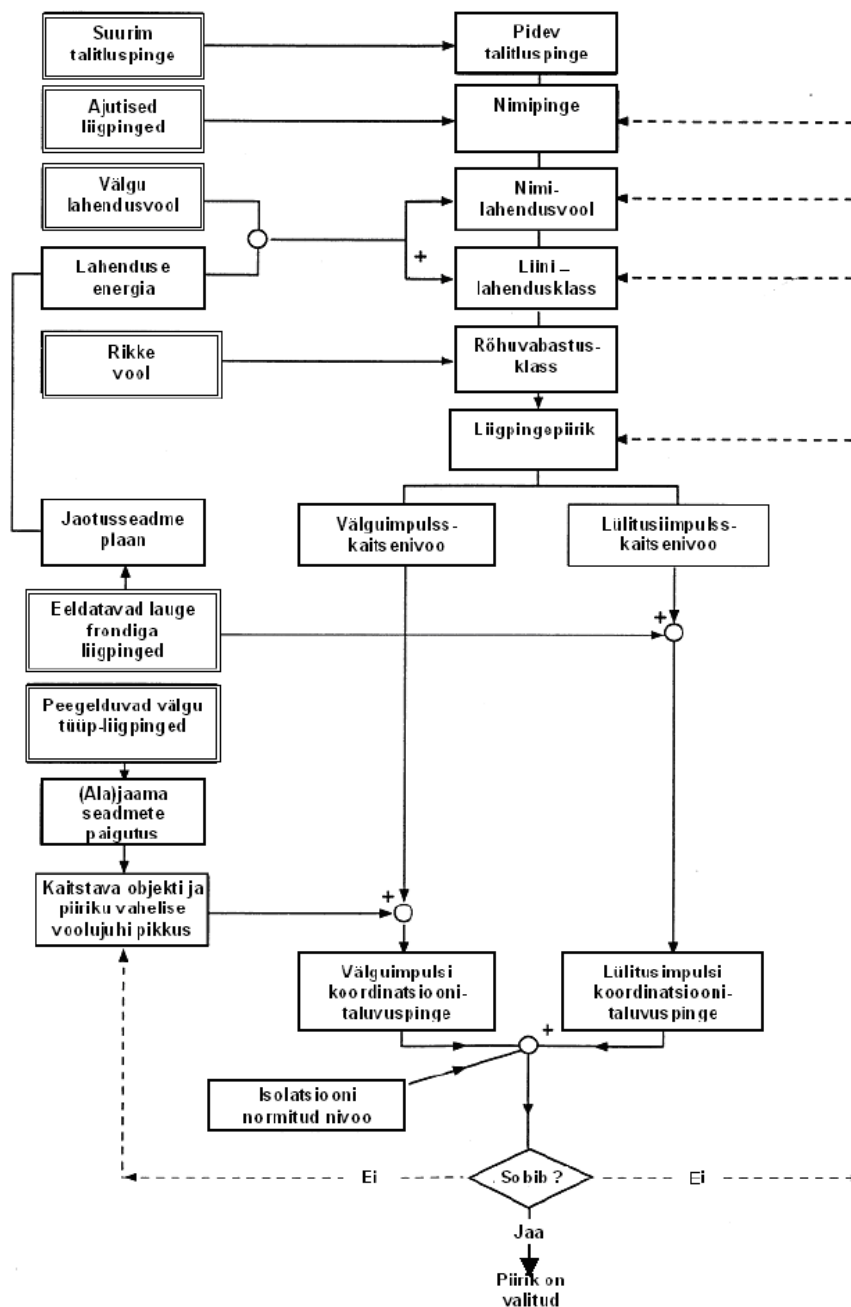
k – liigpinge kordsus, mida püütakse hoida vahemikus $k \leq 1,82$;

U_{LP} – liigpinge tippväärtus;

U_{max} – kestev-faasipinge amplituudväärtus;

Seadme suurim lubatav kestevpinge leitakse järgmise valemiga U_{SL} [2]:

$$U_{max} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_{SL} \rightarrow U_{SL} = \frac{U_{max}\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \quad (1.9).$$



Joonis 1.12 Liigpingepiiriku valimise protseduur [2]

Liigpinge kordsuse hoidmine sobilikes piirides läheb kasutatava pingeklassi kasvades kallimaks, sest kõrgema pingel peab hoidma väiksemat liigpingekordsust. Näiteks jaotusvõrgus võib arvestuslik liigpingekordsus k_{arv} ulatuda kuni 3,5-ni, sest madalama liigpingekordsuse saavutamine muutub majanduslikult ebaotstarbekaks. [2]

Liigpingepiiriku valikul lähtutakse standardis EVS-EN 60099-4 toodud meetodikast, mis käsitleb vahemiketa metalloksiid-liigpingepiiriku valikut vahelduvvoolusüsteemidele. [2]

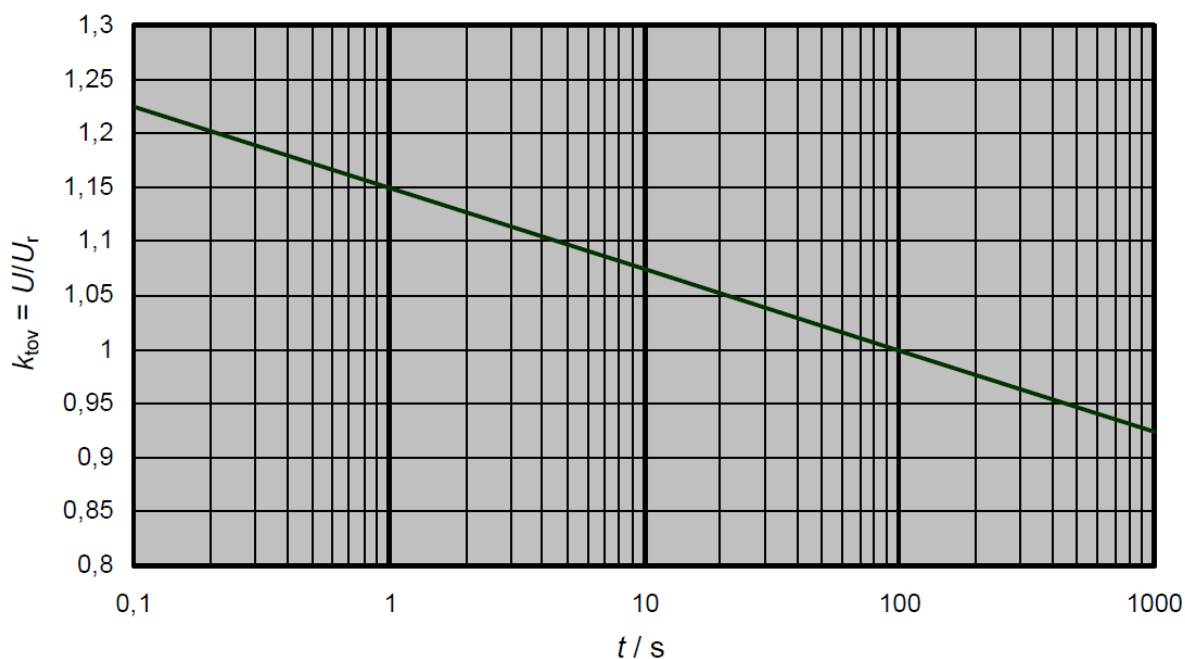
Kestvतालituspinge U_{cmin} on pinge millele liigpingepiirik projekteeritakse töötama nii, et selle isolatsioon kannataks pingeid, mis kaasnevad välgulöökidega ja lülitusprotsessidega. Kestvतालituspinge U_c valitakse jäikmaandatud neutraaliga 330 kV võrgus vastavalt valemile [8] [2] [9]:

$$U_{cmin} \geq 1,05 \frac{U_n}{\sqrt{3}} \quad (1.10)$$

kus

- U_{cmin} – kestvतालituspinge
- U_n – võrgu nimipinge

Metalloksiid liigpingepiiriku nimipinge U_r valik. Esimeses lähenduses valitakse nimipinge nii, et see oleks vähemalt 1,25 korda suurem kui kestvतालituspinge ehk $U_{r1} \geq 1,25 U_{cmin}$. Nimipinge on võrgusageduslik pinge, mida rakendatakse talitussuutlikkuskatsel 10 s vältel ja mille juures liigpingepiiriku temperatuur ei ületa etteantud väärtust. Nimipinge täpsustamisel tuleb arvestada ajutiste liigpingetega U_{TOV} ja nende võimalike kestvusaegadega. Selleks kasutatakse liigpingepiirikute käsiraamatutes esitatud taluvusteguri graafikuid (*power-frequency voltage versus time U-t-characteristic*). Üks selline SIEMENS AG käsiraamatus graafik (vt joonis 1.13) on esitatud all. [2] [10]



Joonis 1.13 Ajutise liigpinge taluvustegur metalloksiid-piirikule [10]

Üleval toodud graafikul (vt joonis 1.13) toodud alusel leitakse liigpingepiirikule teine võimalik liigpingepiiriku nimipinge U_{r2} vastavalt valemile [2]:

$$U_{r2} \geq \frac{U_{TOV}}{k_{TOV}} \quad (1.11)$$

kus

U_{r2} – liigpingepiiriku teine võimalik nimipinge taluvusteguri järgi;

U_{TOV} – ajutine liigpinge;

k_{TOV} – taluvustegur.

Esimeses lähenduses leitud liigpingepiiriku nimipinge U_{r1} ja vastavalt valemile (1.8) ja taluvusteguri graafikule (vt joonis 1.13) leitud teisele võimaliku nimipinge U_{r2} vahel tehakse valik vastavalt sellele, et kumb leitud nimipingetest on suurem. [2]

Kui suurem on U_{r2} , siis arvutatakse ümber ka kestevaltuspinge U_C , sest nii on kindlustatud liigpingepiiriku töö ka ajutiste liigpingete korral. U_C leitakse vastavalt valemile [2]:

$$U_C = \frac{U_{r2}}{1,25} \quad (1.12)$$

kus

U_C – liigpingepiiriku kestevaltuspinge;

U_{r2} – liigpingepiiriku jaoks valitud nimipinge.

Nimilahendusvoolu kasutatakse liigpingepiirikute liigitamiseks. Nimilahendusvool on liigpingepiiriku kaitekarakteristikut ja energianeeldumisvõimet iseloomustav parameeter, mis on erinevatel kaitseivoodel erinev [2]:

- välgu-impulss kaitseivoo on suurim jääkpinge nimilahendusvoolu juures. Sellist seadet kasutatakse järsu frondiga liigpingete eest elektriseadmete kaitsel.
- lülitusimpulss-kaitseivoo on suurim jääkpinge sätestatud lülitusimpussvoolu juures. Selliseid seadmeid kasutatakse lauge laine frondiga liigpingete eest elektriseadmete kaitsel.

Vastavalt standardile [9] valitakse nimilahendusvool nimipinge järgi (vt Tabel 1.1).

Tabel 1.1 Nimilahendusvoolud vastavalt standardile EVS-EN 60099-4

1,5 kA	2,5 kA	5 kA	10 kA	20 kA
määratlemata	$U_r \leq 36 \text{ kV}$	$U_r \leq 132 \text{ kV}$	$3 \text{ kV} \leq U_r \leq 360 \text{ kV}$	$360 \text{ kV} < U_r \leq 756 \text{ kV}$

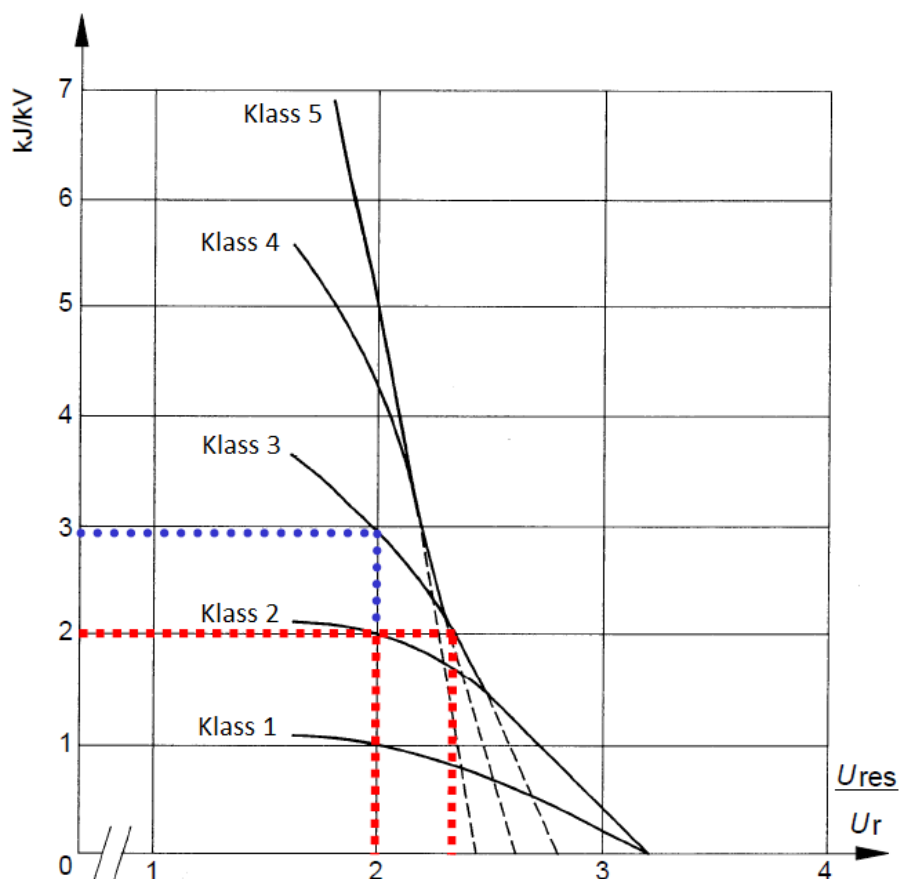
Tabelis (vt tabel 1.1) esitatud nimilahendusvoolud ei määra otseselt liigpingepiiriku tööparameetreid. Näiteks 10 kA nimivooluga liigpingepiirik on võimeline juhtima voolusid, mis on sellest suuremad (näiteks äike) ilma et liigpingepiirik rikneks. Tegelik eesmärk on liigpingepiiriku nimilahendusvoolu leidmisel hoopis testimise eesmärgil, sõltuvalt liigpingepiiriku klassist. Jaotusvõrkudes kasutatakse peamiselt 5 kA ja 10 kA nimilahendusvooluga liigpingepiirikuid. [10]

Liinilahendusklass on vajalik määrata liigpingepiiriku valimisel. Üks viis liigpingepiiriku energiakoguste juhtimise mõistmiseks on standardis EVS-EN 60099-4 toodud mõiste liinilahendusklass. Kuna tegu on mõistega, mis otseselt ei ole võrdelises seoses liigpingepiiriku energiakoguste juhtimise võimega, siis palju liigpingepiirikute tootjad esitavad liinilahendusklassi leidmiseks oma tabelid ja graafikud. Standardi järgi leitakse liinilahendusklass, kasutades selleks tabelit ning graafikut. [10]

Tabel 1.2 Liinilahendusklass vastavalt standardile EVS-EN 60099-4 [9]

Liinilahendusklass	Liigpingepiiriku näivtakistus liinil, Ω	Liigpingelaine- frondi näiv kestus, μs	Liigpingepiiriku laadumispinge U_L , kV
1	$4,9 \cdot U_R$	2000	$3,2 \cdot U_R$
2	$2,4 \cdot U_R$	2000	$3,2 \cdot U_R$
3	$1,3 \cdot U_R$	2400	$2,8 \cdot U_R$
4	$0,8 \cdot U_R$	2800	$2,6 \cdot U_R$
5	$0,5 \cdot U_R$	3200	$2,4 \cdot U_R$

Mida suurem on pinge laine jääkpinge U_{res} , seda vähem on liigpingepiirik võimeline laine energiat maha suunama liini tühjaks laadumise hetkel, sest liin laadub jääkpingest tühjaks aeglasemalt kui U_{res} on kõrge. [10]



Joonis 1.14 Liigpingepiiriku energiakoguse juhtimise võime sõltuvalt lülitusliigpinge fronti suuruselt [9]

Liigpingepiiriku kaitsenivoo valik

Liigpingepiiriku kaitsenivoo valitakse enamasti välguimpulsi kaitsenivoona. See tähendab, et kaitsenivoo valitakse nimivoolu korral esineva jääkpinge alusel. Vastavalt isolatsiooni koordineerimise põhimõtetele kasutatakse varutegurit $k_{varu}=1,15$. Varutegur võtab arvesse välguimpulssi ning talvuspõnget ning on nende kahe suuruse suhe eeldatavasse välguliigpingesse seadme klemmidel. [2]

Liigpingepiiriku paigutamise põhimõtted

Liigpingepiirik tuleb paigaldada kaitstavale seadmele nii lähedale kui võimalik, soovitatavalt seadme ja lüliti (näiteks võimsuslüliti) vahele. Liigpingepiirik tuleb ühendada alajaama maanduskontuuriga võimalikult lühikest teed pidi. Trafo kaitsmisel ühendatakse trafo maandus samasse punkti, kuhu ühendatakse liigpingepiirik. Võimalusel ühendatakse sellesse punkti ka talitusmaandus.

Käesolevas peatükis anti ülevaade riketest, seejärel riketest tingitud lühistest ning liigpingetest. Alajaama seadmeid ei pruugi alati ohustada lühised suured voolud vaid hoopis lühise asukohast kaugemal liini otsas (liini alguses) tekkivad lülitusliigpinged ning peegeldunud pingelained. Lülitusliigpinged on lühikese kestvusega kuid suure energiasisaldusega. Lülitusliigpingete eest kaitsmiseks kasutatakse liigpingepiirikuid, mis muutuvad juhtivaks olukorras, kus nendele langenud pinge on ligikaudu poolteis korda suurem kui kestevatlituspinge. Seejärel juhtivaks muutunud liigpingepiirik suunab liigpingelaine energia maha.

2 PSCAD-mudeli ja katsete kirjeldus

PSCAD (*Power System Computer Aided Design*) on tarkvara, mis on EMTDC (elektromagnetiliste transientide simulatsiooni mootori) graafiline moodul. PSCAD-tarkvara võimaldab kasutajal luua skeeme elektrisüsteemist, neid skeeme modelleerida ning kompileerida kõik ühes graafilises kasutuskeskkonnas. Kasutaja saab kompileerimise kestel jälgida ja koguda kõiki koostatud elektrisüsteemi kohta käivat infot: pinged, voolud, sagedused jne. PSCAD-tarkvarasse on juba sisestatud elektrisüsteemi passiv- ja aktiivelemendid, mida saab kasutada mudelite koostamisel. [11]

PSCAD tarkvara kasutatakse mitmetes eluvaldkondades: elektri insenerid, tootjad, konsultandid, militaar ja akadeemilised asutused. Seda kasutatakse peamiselt elektrisüsteemide planeerimisel, opereerimisel, hanke dokumentatsioonide koostamisel, pakkumuste tegemisel jne. [11]

2.1 Kasutatud PSCAD-mudeli kirjeldus

Käesolevas töös kasutati TTÜ Elektroenergeetika ja mehatroonika instituudis loodud aruande „Lülitusliigpinged õhuliinides“ [4] jaoks loodud 330 kV õhuliini PSCAD-mudelit (edaspidi kirjeldatud kui „mudel“). See mudel loodi eesmärgiga uurida nimetatud aruande jaoks lülitusliigpingeid mitmekorruselisel õhuliinil, kus üheks ahelaks on 330 kV õhuliin ja teiseks ahelaks on 110 kV õhuliin. Raportis kirjeldati liigpingete protsesse 330 kV liinil ning nende mõju 110 kV liinile. Selleks analüüsiti liigpingeid kolmel erineval pingestmel: 330, 110 ja 0,4 kV. Samuti võeti liigpingete uurimisel arvesse reaktiivvõimsuse kompenseerimisseadmete mõju liigpingete kujunemisele 330 kV liini taaslülitamise käigus.

Käesolevas töös kasutatakse juba eelnevalt nimetatud aruande [4] jaoks loodud PSCAD-mudelit ja uuritakse samuti liigpingeid, kuid töö erineb eespool nimetatud tööst järgmiste uurimiseesmärkide poolest:

- lühiste poolt põhjustatud lülitusliigpingete uurimine kahekorruselises õhuliinis;
- liigpingepiirikute mõju tekkinud liigpingetele;
- 330 kV ahelates esinevate liigpingete mõju 110 kV ahelates esinevatele liigpingetele.

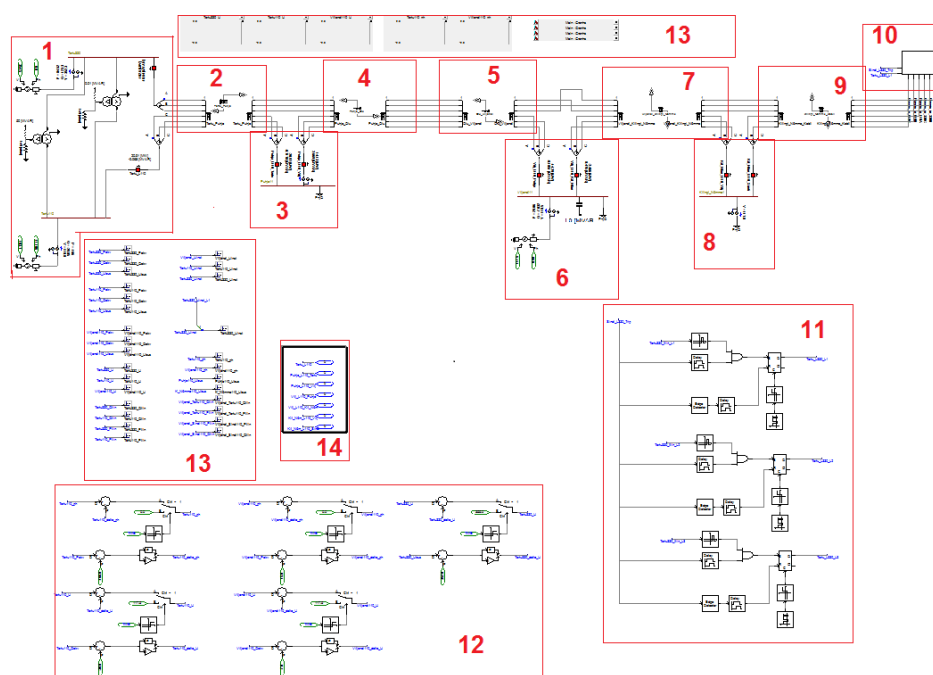
Sellega on käesolev uurimustöö eelnevalt nimetatud aruande [4] loogiliseks jätkuks. Selleks kasutatuase ära juba loodud mudelit uurimaks sama teema (liigpinged) teist tahku.

Tabel 2.1 Alajaamade vahelised kaugused

	Kaugus eelnevaga, km	Kaugus A-st, km
A	0,0	0,0
B	24,1	24,1
C	21,6	45,7
D	25,8	47,4
E	43,6	69,4
F	46,6	90,3

Tabel 2.1 kirjeldab alajaamade vahelisi kaugusi. Käesolevas töös käsitletakse lühise kaugusena alajaamast A või E nende alajaamade asukohti. Seega kui lühis toimub alajaama A juures, siis see lühis on alajaamast B 24,1 km kaugusel.

Järgnevalt tutvustatakse käesolevas töös kasutatud mudelit ning selle elemente (vt joonis 2.1).

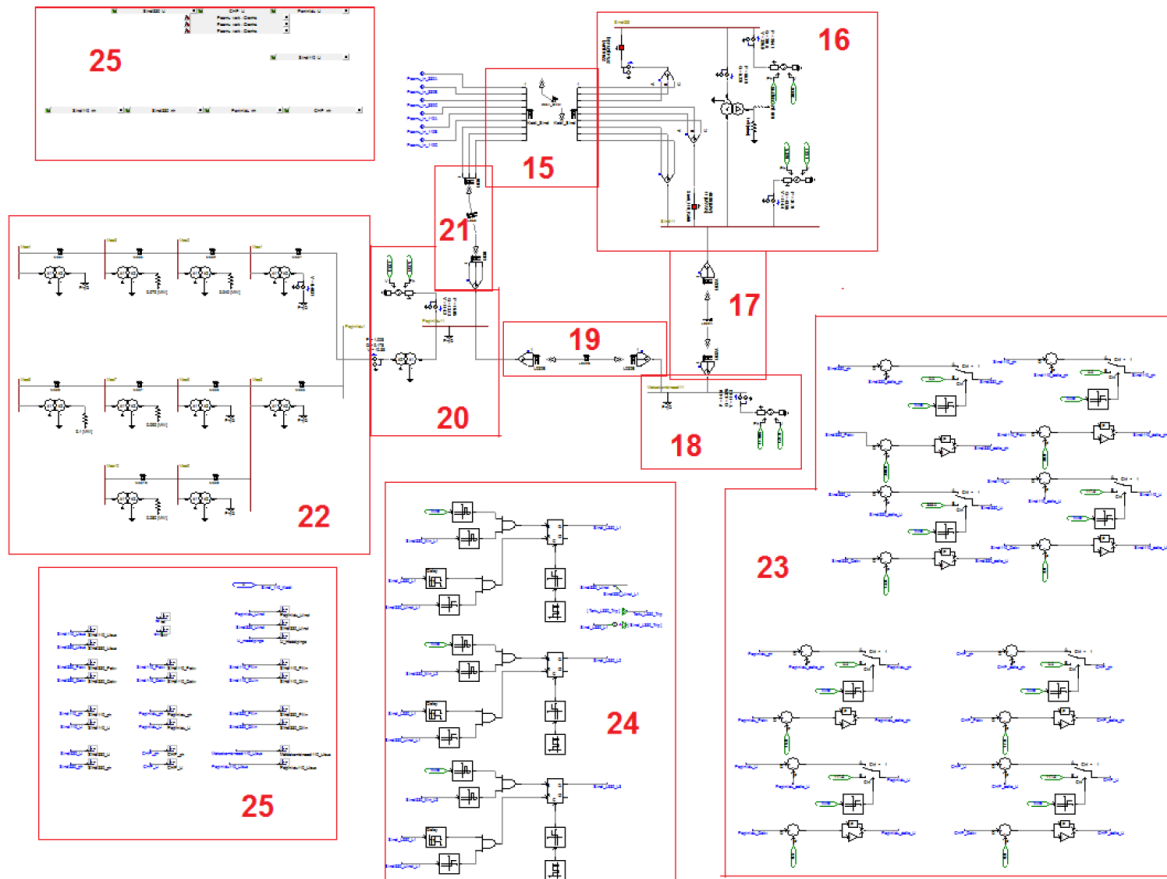


Joonis 2.1 PSCAD-mudeli esimene osa [4]

Joonisel (vt joonis 2.1) kujutatud mudel on loodud võttes arvesse reaalseid elektriliine, mida opereerib Eesti süsteemioperaator Elering AS. Joonistel 2.1 ja 2.2 esitatud nummerdatud plokid sisu on järgmine:

1. 330/110 kV alajaama A on ühendatud kaks 330/110/20 kV 200 MVA trafot. Alajaama 330 kV lattidele on ühendatud 50 MVAr reaktor;
2. mitmekorruselise 330/110 kV õhuliini lõik 1;
3. 110 kV alajaam B, kuhu on ühendatud tarbija võimsusega $1,96+j0,56$ MW;
4. mitmekorruselise 330/110 kV õhuliini lõik 2;
5. mitmekorruselise 330/110 kV õhuliini lõik 3;

6. 110 kV alajaam C, kuhu on ühendatud tarbija võimsusega 13,16+j3,6 MW;
7. mitmekorruselise 330/110 kV õhuliini lõik 4;
8. 110 kV alajaam D, kuhu on ühendatud tarbija võimsusega 2,98+j1,45 MW;
9. mitmekorruselise 330/110 kV õhuliini lõik 5;
10. PSCAD mudeli teine osa, mis on täpsemalt kirjeldatud alloleval joonisel (vt joonis 2.2).



Joonis 2.2 PSCAD-mudeli teine osa [4]

11. 330 kV liiniahela taaslülitamise algoritm alajaamast A väljuvale 330 kV õhuliini ahelale.
12. elektrivõrgu ekvivalentide juhtimise algoritmid, mis juhivad ekvivalentsetest võrkudest antavat aktiiv- ja reaktiivvõimsusvoogu;
13. mudeli graafiliste väljundite sisendid;
14. 110 kV võrgu võimsuslülitite asendid, mis ei ole juhitud 330 kV taaslülitamise loogikast;
15. mitmekorruselise 330/110 kV õhuliini lõik 6;
16. 330/110 kV alajaama E on ühendatud kaks 330/110/20 kV 200 MVA trafot. Alajaama 330 kV lattidele on ühendatud 50 MVAr reaktor. Samuti on alajaama D ühendatud 330 kV ja 110 kV elektrivõrgu ekvivalendid;

17. ühekorruseline 110 kV õhuliini lõik 7;
18. 110 kV alajaam F, kuhu on ühendatud tarbija võimsusega $3,5+j0,6$ MW, samuti on alajaama ühendatud 110 kV elektrivõrgu ekvivalendid;
19. ühekorruseline 110 kV õhuliini lõik 8;
20. 110/10 kV alajaam G, kuhu on ühendatud trafo võimsusega 6,3 MVA, tarbija võimsusega $20,7+j3,0$ MW, samuti on alajaama ühendatud 110 kV elektrivõrgu ekvivalendid;
21. ühekorruseline 110 kV õhuliini lõik 9;
22. 10 kV jaotusvõrk, mis saab toite 10 kV alajaama F jaotusseadmest ning millega toidetakse 10 kV õhuliinide kaudu, läbi 10/0,4 kV trafode madalpingetarbijaid;
23. 330 kV ja 110 kV võrguekvivalentide juhtimise algoritmid;
24. 330 kV liiniahela taaslülitamise algoritm alajaamast E väljuvale 330 kV õhuliini ahelale.
25. mudeli graafiliste komponentide osa, kus on pingete, võimsuste ja voolude signaalid ning nende graafilised väljundid.

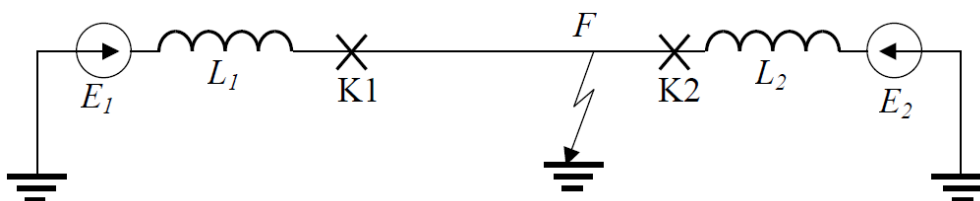
2.2 Liini taaslülitamine ATL-ga koormatud liini näitel

Liini automaatne taaslülitus (ATL) kasutatakse liinide taaspingestamist peale lühist. ATL-i eesmärk seisneb sagedasti esineva elektrikaare kustumises liini lühiajalisel väljalülitamisel ja kaare uuesti mitesüttimises liini taaslülitamisel. [6]

Suur osa õhuliinide lühistest pole seotud isolatsiooni riketega ning kaovad, kui lühikeseks ajaks liin välja lülitada. ATL edukuse tõenäosus on esimesel, teisel ja kolmandal lülitamisel vastavalt 60-80%, 10-15% ja 2-3%. [12]

ATL on edukas just sellistel juhtudel, kui liinil tekkinud lühise põhjustaja on kaob, näiteks langenud puuoks kukub peale lühise tekitamist maapinnale.

ATL-i toimimist iseloomustab allolev joonis (vt joonis 2.3), kus on kirjeldatud lühise tekkimist kahepoolse toitega liini puhul. Joonisel on K1 ja K2 liini otsas paiknevad võimsuslülitid. [6]

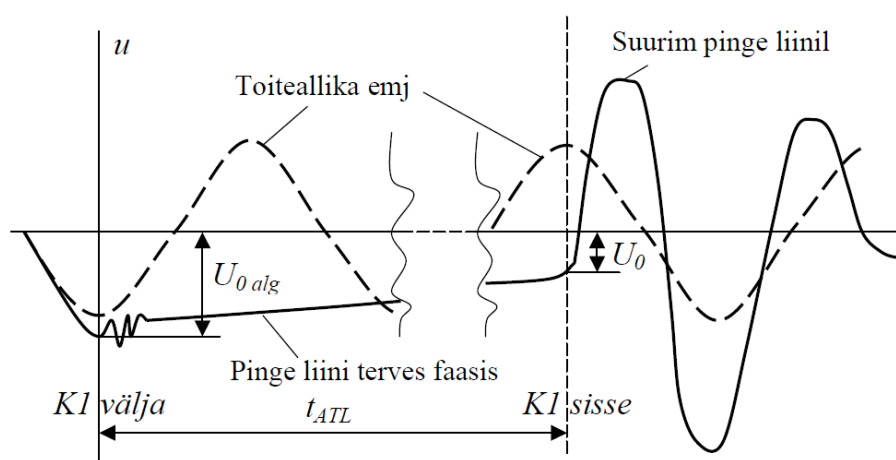


Joonis 2.3 Lühis kahepoolse toitega liinil [6]

ATL käik joonise (vt joonis 2.3) näitel kujuneb järgmiselt [6]:

1. lühisele kõige lähedamal asuv lüliti K2 lülitatakse releekaitse poolt tulnud signaali toimel välja. Kaar lühise kohas säilib;
2. lühisele järgmine kõige kaugem lüliti K1 lülitub välja ja katkestab lühisekohas voolava mahtuvusliku voolu nullväärtushetkel ehk kui pinge on lühisekohas maksimaalne;
3. lühisest haaratud faasi jääklaeng voolab liini välja lülitamisel kaare kaudu kiiresti maha ning pinge kahaneb nulliks;
4. lühisest mitte haaratud faaside jääklaeng voolab maha läbi oomiliste põikjuhtivuste (isolaatoritel olev lekkevool) aeglaselt ja näiteks kuiva ilma korral on 0,4 s möödumisel tervete faaside pinge 60-70% esialgsest pingest;
5. peale lühikest voolupausi, mille ATL tekitab lülitatakse liini võimsuslülitid tagurpidi sisse: esmalt K1 ja kui releekaitseadmed lühist enam ei tuvasta, siis ka K2.

ATL-i poolt koordineeritud taaslülitamisel tekivad lülitus-liigpinged kõige suuremalt lühisest mitte haaratud faasides, sest nendes faasides võib olla veel jääkpinge ning sellel lisanduvad lüliti K1 lülitamisel pingeallikate sundkomponent ja liini lülitamise siirdeprotsessil tekkivad kõrgemad harmoonikud (vt p 1.3 ja vt joonis 2.4). [6]



Joonis 2.4 Lühise poolt mitte-haaratud faaside pinge ATL puhul [6]

Lühisest mittehaaratud faasides tekkivad liigpinge suurus sõltub otseselt sisselülitamise hetkest (vt joonis 2.4). 0-180° allika pinge nurga puhul on toiteallika elektromotoorjõu (emj.) ja tervete faaside jääkpinge (U_0) vastas märgiga ning tekkivad liigpinged on suuremad kui toiteallika nurga 180-360° korral. [6]

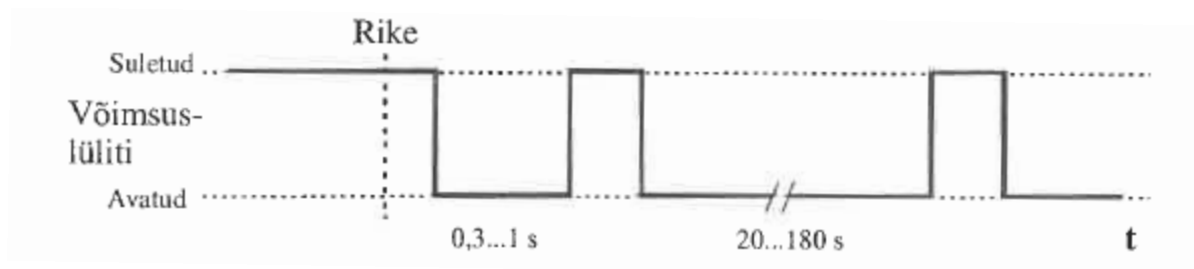
Nagu näha jooniselt (vt joonis 2.4), siis peale edukat ATL-i hakkavad lühisest mitte haaratud faaside pinge võnkuma sumbuvalt ümber toiteallika elektromotoorjõu (sundkomponendi)

väärtuse kuni kõrgemate harmoonikute (mis tekivad lülitamise siirdeprotsessil) poolt põhjustatud võnkumiste täieliku sumbumiseni. [6]

Käesoleva töö punktis 1.1 märgiti, et õhuliinidel on kõige sagedamini esinevaks lühiseks ühefaasiline lühis. Mööduvad lühised on lühised, mille puhul lühise esile kutsunud objekt põhjustab lühise vaid ühel korral. Süsteemi stabiilsuse hoidmiseks kasutatakse sellistes olukordades liini taaslülitamist. Seda taaslülitamist koordineerib ATL. Ühefaasiliste lühiste puhul lülitatakse välja vaid see faas, mis on lühisest haaratud. [2]

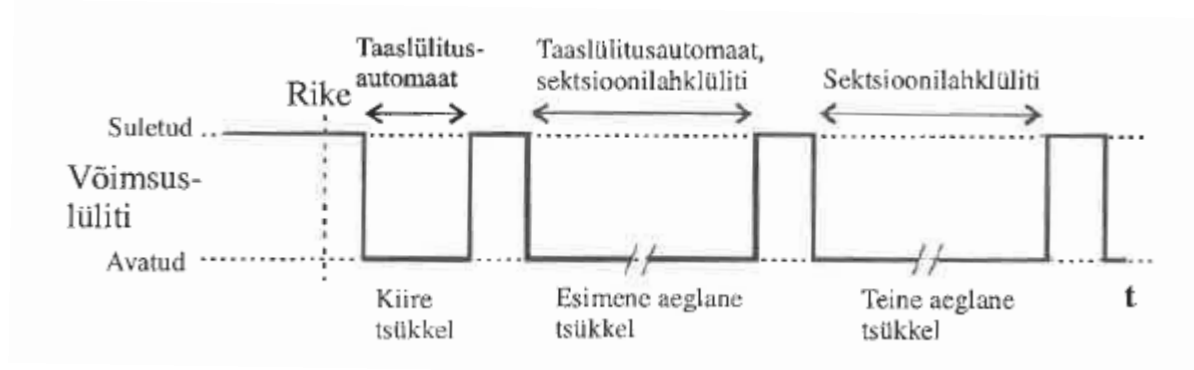
ATL taaslülitamise tehnikad on järgmised. [13]

Alajaama poolset taaslülitamisel on võimalik kaks tsüklit – esmane taaslülitamine toimub peale 0,3-1 sekundilist pausi, lühise püsimisel teine taaslülitamine tehakse peale 20-180 sekundilist pausi, kolmanda taaslülitamise teostab dispetšer veendudes ennem lülitamise ohutuses. [13]



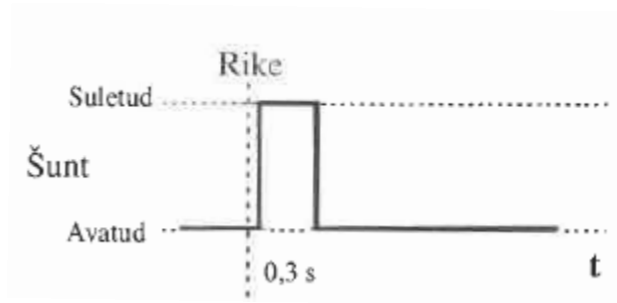
Joonis 2.5 Alajaama poolse taaslülitamise tehnika [13]

Taaslülitamine seksioneerimisega järgneb teisele lülituspausile veel üks kestev väljalülitamine, mille ajal lülitatakse välja mõni seksiooni lahklüüti. Sellisel juhul taaspingestatakse vaid osa tarbijatest. Sellist ATL tehnikat kasutatakse olukordades, kus on täpselt teada, et rike asub vaadeldavatel seksioonilüüti taga. [13]



Joonis 2.6 Seksioneerimisega taaslülitamise tehnika [13]

Taaslülitamist šundiga kasutatakse maandamata neutraaliga võrgus. Maaühenduse korral lülitatakse esmalt lühikeseks ajaks sisse nn šuntvõimsuslüliti, mis ühendab rikkis faasi maaga. Kui selle tulemusena maaühendus kaob, siis taastub normaalolukord ilma tarbijate toite katkestuseta. Vastasel juhul järgneb tavaline taaslülitamine sektsioneerimisega või ilma. [13]



Joonis 2.7 Šundiga taaslülitamise tehnika [13]

2.3 PSCAD-mudeliga teostatav katsete kava

Käesoleva töö raames kasutatav mudel on olemasolev mudel, mida tutvustati eelmises punktis (vt p 2.1) ning käesolevas töös modifitseeritakse seda mudelit nii, et sellega oleks võimalik uurida liigpingepiirikute mõju liigpingete puhul ning indutseeritud pingete tekkimist 110 kV liinil. Selleks paigaldatakse liigpingepiirikute paigaldamise kohta pinge mõõtmise seadmed ning samuti paigaldatakse 110 kV alajaamas (alajaam C ja D, vt joonis 2.1) pinge mõõtmise seadmed. Nii liigpingete uurimiseks, liigpingepiirikute parameetrite määramiseks kui ka indutseeritud pingete uurimiseks teostatakse katsed vastavalt järgmisele kavale:

- A. Kolmefaasiline lühis maaga 330 kV õhuliinil liini täielikul välja lülitamisel, eduka ATL-iga;
 - a. Alajaama A lähistel (katse 1);
 - b. Alajaama E lähistel (katse 2);
- B. Ühefaasiline lühis 330 kV õhuliinil liini täielikul välja lülitamisel, eduka ATL-iga;
 - a. Alajaama A lähistel (katse 3);
 - b. Alajaama E lähistel (katse 4);
- C. Ühefaasiline lühis 330 kV õhuliinil vaid lühisest haaratud faasi välja lülitamisel, eduka ATL-iga;
 - a. Alajaama A lähistel (katse 5);
 - b. Alajaama E lähistel (katse 6);

Liigpingepiirikute mõju selgitamiseks teostatakse kõik nimetatud katsed kahel erineval korral: liigpingepiirikuteta ja paigaldatud liigpingepiirikutega. Paigaldatud liigpingepiirikutega teostavad katsed on identsed liigpinge liigpingepiirikuteta katsetele ning nende tähistamisel kasutatakse järgmist tähistust: 5“ (sama nagu katse 5, aga paigaldatud liigpingepiirikuga):

- D. Kolmefaasiline lühis maaga 330 kV õhuliinil liini täielikul välja lülitamisel, eduka ATL-iga;
 - a. Alajaama A lähistel (katse 1“);
 - b. Alajaama E lähistel (katse 2“);
- E. Ühefaasiline lühis 330 kV õhuliinil liini täielikul välja lülitamisel, eduka ATL-iga;
 - a. Alajaama A lähistel (katse 3“);
 - b. Alajaama E lähistel (katse 4“);
- F. Ühefaasiline lühis 330 kV õhuliinil vaid lühisest haaratud faasi välja lülitamisel, eduka ATL-iga;
 - a. Alajaama A lähistel (katse 5“);
 - b. Alajaama E lähistel (katse 6“);

110 kV õhuliini indutseeritud pingete uurimiseks teostati katsed 1, 3 ja 5, sest need katsed on piisavad selgitamiseks 330 kV õhuliini poolt indutseeritud pinge suurust alajaamades C ja D. Liigpingepiirikutega katsete kordamine pole vajalik, sest liigpingepiirikud paigaldati käesoleva töö raames mudelis ainult 330 kV liini otsadesse, mitte 110 kV liini otsadesse.

Eduka ATL tsüklist näitel (vt p 2.2) teostati kõik katsed järgmise ajakava järgi:

1. kogu simulatsioon kestab 2 sekundit.
2. lühis lülitatakse simulatsiooni ajahetkel 0,5 s
3. lühisele kõige lähem võimsuslülitit lülitatakse simulatsiooni ajahetkel 0,7 s ja kõige kaugem võimsuslülitit lülitab simulatsiooni ajahetkel 0,9 s
4. toimub ATL esimene paus simulatsiooni ajahetkest 0,9 s – 1,3 s, lühis kaob ajahetkel $t=1,0$ s;
5. toimub esimene kõige kaugema võimsuslülitit taaslülitamine simulatsiooni ajahetkel 1,3 s, lühis on kadunud.

Toimub lühisele kõige lähema võimsuslülitit lülitamine ajahetkel 1,5 s.

Eelnevalt kirjeldatud katsed PSCAD-mudeliga on käesoleva töö praktiline osa. Ehk osa, kus vaadeldakse Eesti elektrisüsteemi operaatori Elering AS ühe 330 kV õhuliini näitel

elektrivõrku. Sellel elektriliinil teostatakse lühised ning saadud tulemuste alusel teostatakse liigpingepiirikute parameetrite määramised, nende liigpingepiirikute mõju hindamine ning töö viimases punktis (vt p 5) vaadeldakse selle sama 330 kV õhuliini näitel liigpingete indutseerimist samadel mastidel paiknevale 110 kV õhuliinile.

3 Lühiste ja lülitusliigpingete uurimine PSCAD-mudeliga

Järgnevalt kirjeldatakse PSACD-mudeliga teostatud katseid, mis on vajalikud liigpingepiirike parameetrite valikuks ja nende mõju hindamiseks.

3.1 Lühiskatsed liigpingete väljaselgitamiseks

Esmalt selgitatakse punktis 2 kasutatava mudeliga välja ajutised liigpinged ning nende kestvus kohas, kuhu planeeritakse paigaldada liigpingepiirikud. Selleks mõõdetakse faasipingeid trafo ees, peale võimsuslülitit. Liigpingepiirik peab kaitsma trafot liigpingete eest.

Liigpinge maksimaalsete väärtuste leidmiseks teostati kuus erinevat katset vastavalt käesoleva töö punktis 2.2 esitatud katsete kava alusel: katsed 1-6.

Tabel kirjeldab katsete käigus mõõdetud faasipingete maksimaalväärtuseid trafo ees. Kõige suurema väärtusega liigpingeteks alajaamas A ja E osutuvad katsete põhjal järgmised pinged:

- Alajaamas A $U_{ktov}=447,84$ kV
- Alajaamas E $U_{ktov}=473,56$ kV.

Tabel 3.1 Faasipingete minimaalsed ja maksimaalväärtused erinevatel katsetel

Katse nr	U_{tov} alajaamas A, kV				U_{tov} alajaamas E, kV			
	Minimaalselt		Maksimaalsel		Minimaalselt		Maksimaalsel	
	<i>kV</i>	U_{tov}/U_{norm}	<i>kV</i>	U_{tov}/U_{norm}	<i>kV</i>	U_{tov}/U_{norm}	<i>kV</i>	U_{tov}/U_{norm}
1	-307,82	1,14	292,95	1,09	-473,56	1,76	423,41	1,57
2	-447,84	1,66	392,72	1,46	-296	1,10	306,8	1,14
3	-310,74	1,15	318,19	1,18	-422,46	1,57	402,83	1,50
4	-363,74	1,35	369,54	1,37	-337,36	1,25	306,78	1,14
5	-310,74	1,15	318,19	1,18	-301,31	1,12	314,4	1,17
6	-338,21	1,26	328,95	1,22	-337,36	1,25	305,24	1,13

All esitatud tabelites (vt tabel 3.2, Tabel 3.3 ja tabel 3.4) on toodud katsete käigus võimsuslülitite juures tekkinud voolude suurused. Selleks paigaldati PSCAD-mudelisse ampermeetrid võimsuslülitite ette, liini poole. Järgnevalt vaadeldakse vaid kolme katset: 1, 3 ja 5, sest nendest katsetest saadud tulemused saab teha üldistusi ka olukorrale, kui lühis toimub alajaama E lähistel. Katsete 1, 3 ja 5 käigus käsitletakse kõiki kolme erinevat lühise olukorda.

Tabel 3.2 *Voolud faasides alajaamas A, katse 1*

Alajaam A							
Voolud	Normaalolukorras	$t=0,5$	$t=0,7$	$t=0,9$	$t=$ enne sisselülitamist	$t=1,3$	$t=1,5$
Faas A	560	27920	-16450	0	0	0	620
Faas B	600	21430	16610	0	0	0	-1046
Faas C	559	-23000	16690	0	0	0	1035
Alajaam E							
Faas A	620,5	6537,61	-3592,11	-3592,11	0	480,56	624,25
Faas B	-670,7	-5597,18	-4276,89	-4276,89	0	1189,14	1083,47
Faas C	639,98	-5205,15	-3824,21	-3824,21	0	-	-1075,54

Katse 1 käigus toimus kolmefaasiline lühis 330 kV õhuliinil alajaama A juures. Kõige suuremad voolud liinil tekivad olukorras, kus ajahetkel $t=0,5$ s toimub lühis liinil. Siis kerkivad voolud liinil kuni 27,9 kA-ni. Liini taaspingestamisel on voolude väärtused normaalolukorra piires ning selliseid kõrgeid muutusi nagu pingete puhul ei esine. Kogu simulatsiooni kahesekundiline protsess on liini voolude vaates kirjeldatud lisas L.2 (alajaam A) ja lisas L.3 (alajaam E). Ainult alajaamas E on lisaks lühise hetkel tekkinud suurele voolu tõusule näha voolu tõusu ka liini ühepoolisel sisselülitamisel alajaamas E: vool tõuseb üle 1000 A põhjusel, et liinis on sees jääklaeng, mis ei jõudnud liinist lühise käigus maha voolata.

Tabel 3.3 *Voolud faasides alajaama A juures, katse 3*

Alajaam A							
Vool	Normaalolukorras	$t=0,5$	$t=0,7$	$t=0,9$	$t=$ enne sisselülitamist	$t=1,3$	$t=1,5$
Faas A	560	26080	15269	0	0	0	635,4
Faas B	600	-207,94	656,74	0	0	0	-1058,7
Faas C	559	875,58	-354,75	0	0	0	1059,4
Alajaam E							
Faas A	620,5	5800,14	3541,32	0	0	280,8	660,08
Faas B	-670,7	-1022,1	-183,16	0	0	-713,52	1088,57
Faas C	639,98	-650,77	191,68	0	0	-1260,41	-1079,3

Katse 3 puhul tekitati alajaama A juures ühefaasiline lühis 330 kV õhuliinil. Selle tulemusel lülitati välja kogu 330 kV õhuliin. Sellise ühefaasilise lühise puhul tõusis vool üle 26 kA lühisest haaratud faasis ning teistes faasides ei ületanud faasi voolud 900 A-it. Võrreldes alajaama A-ga tõusis seevastu alajaamas E vool lühisest haaratud faasis vähem – kuni 6 kA kuid kuna alajaamas E lülitati lühis lõplikult välja, siis kestis kõrge vool 4,5 kA kuni lühise täieliku eraldamiseni ajahetkel $t=0,9$ s. Nagu katse 1 puhulgi tõusis liini ühepoolisel sisselülitamisel ajahetkel $t=1,3$ s vool alajaamas E üle 1,2 kA. Kogu simulatsiooni käigus toimunud faasivoolude muutused on toodud lisas L.4 (alajaam A) ja L.5 (alajaam E).

Tabel 3.4 Voolud faasides alajaama A juures, katse 5

Alajaam A							
Vool	Normaalolukorras	$t=0,5$	$t=0,7$	$t=0,9$	$t=$ enne sisselülitamist	$t=1,3$	$t=1,5$
Faas A	560	26069	0	0	0	0	620,25
Faas B	600	1003,3	658,28	637	637	637	673,97
Faas C	559	644,1	735,94	576,6	576,6	576,6	-635,21
Alajaam E							
Faas A	620,5	5799,95	3581,37	0	0	205,63	650,67
Faas B	-670,7	231,72	369,55	659,4	659,4	667,74	685,49
Faas C	639,98	169,68	713,58	-601,76	-601,76	-600,56	-642,15

Katse 5 käigus toimus sarnaselt katsele 3 – 330 kV õhuliinil tekkis ühefaasiline lühis, kuid katse 5 käigus lülitati vaid lühisest haaratud faas välja. Kõige suurem vool tekkis lühise tekkimisel ($t=0,5$ s), sest siis vähenes lühisekohas pinge lühisest haaratud faasis ning suurenes vool üle 26 kA. Võrreldes katse 3 tulemustega suuri erinevusi alajaamas A faasivooludes ei esinenud vaid lühisest haaratud faasi väljalülitamine aitas säilitada normaalsest koormusest tingitud voolu tervetes faasides. Samasugune stabiliseeriv efekt tekkis äiult lühisest haaratud faasi väljalülitamisel ka alajaamas E, kus võrreldes katsega 3 ei toimunud enam suurt voolu tõusu liini taaspingestamisel ajahetkel $t=1,3$ s. Kogu simulatsiooni kirjeldavad faasivoolud on esitatud lisas L.6 (alajaam A) ja lisas L.7 (alajaam E).

Nagu näha teostatud katsetest, siis kõige suuremad lülitusliigpinged esinevad katsete käigus just selles alajaamas, mis on lühisest kõige kaugemal ehk siis alajaamas, milles paiknev võimsuslüliti lülitab lühise elektrisüsteemist lõplikult välja. Katse 1 puhul on selleks alajaam E ja katse 2 puhul on selleks alajaam A. Nimetatud liigpingete suurusi saab ära kasutada liigpingepiirikute suuruse määramisel alajaama A ja alajaama E jaoks. Liigpingepiirikute valik teostatakse järgmises punktis, punkt 4.

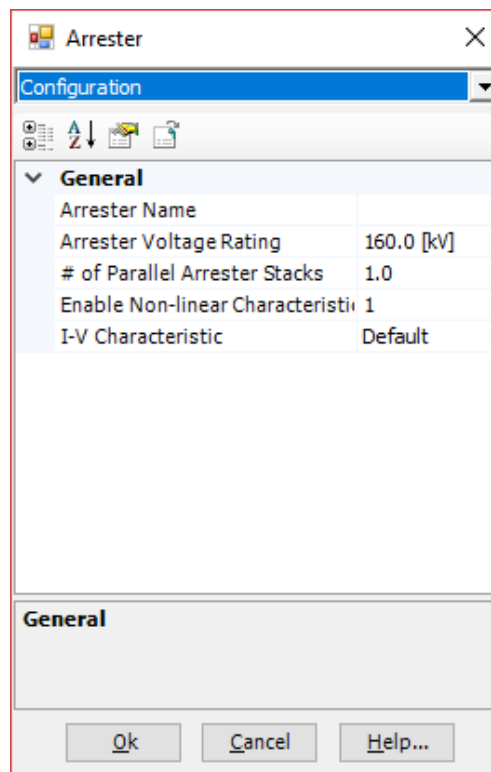
4 Liigpingepiirikute valik, modelleerimine ja mõju

Vastavalt käesoleva töö punktis 3.1 leitud liigpingetele leitakse järgmises punktis õige suurusega liigpingepiirikud. Peale liigpingepiirikute dimensioneerimist sisestatakse need punktis 2.1 kirjeldatud PSCAD-mudelisse ning teostatakse katsed vastavalt katsete kavale (vt p 2.3): katsed 1“–6“.

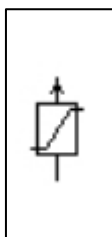
4.1 Liigpingepiirikute valimine PSCAD-mudelisse

Vastavalt allikale [2] kasutatakse kõrgepingevõrkudes liigpingepiirikutest peamiselt kaitsesädemikke ja metalloksiid liigpingepiirikuid. Need seadmed ei sobi kestvate ja ajutiste liigpingete piiramiseks, sest seda tüüpi liigpingete energiasisaldus on liiga suur. Nende liigpingepiirikute peamiseks kasutusala on alajaama seadmete kaitsemine välgu liigpingete eest. Metalloksiidpiirikuid võib allika [2] järgi kasutada lülitusliigpingete piiramiseks.

Mudelisse on võimalik lisada elemendina metalloksiid liigpingepiirik.



Joonis 4.1 Metalloksiid liigpingepiiriku konfigureerimise võimalused PSCAD-mudel



Joonis 4.2 Metalloksiid liigpingepiiriku kuju PSCAD-mudel

Mudel metalloksiid liigpingepiirik (*Metal Oxide Surge Arrestor*) on modelleeritud kui mitte-lineaarne takistus. Liigpingepiiriku puhul kasutatakse käesolevas töös ning mudelis vaikimisi liigpingepiirikule valitud (ASEA XAP-A) karakteristikuid (vt joonis 4.8). [14]

Käesolevas töö käigus uuritakse liigpingepiirikute mõju liigpingete piiramisel 330 kV õhuliini otstes. Selleks leitakse järgnevalt liigpingepiirikud, mis paigaldatakse punktis 2 kirjeldatud mudelisse. Järgnevalt leitakse liigpingepiiriku parameetrid, mis on vajalikud liigpingepiiriku määramiseks PSCAD-mudel

Liigpingepiiriku kestevtalituspinge U_{cmin} valik

Kestevtalituspinge valitakse vastavalt valemile (1.10) järgmiselt:

$$U_{cmin} = 1,05 \frac{U_n}{\sqrt{3}} = 1,05 \frac{330 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 200,05 \text{ kV}$$

Liigpingepiiriku nimipinge U_r valimine

Nimipinge valitakse esimeses lähenduses nii, et see oleks $U_{r1} \geq 1,25 U_{cmin}$ ehk $U_{r1} = 1,25 U_{cmin} = 1,25 \cdot 200,05 \text{ kV} = 250,06 \text{ kV}$.

Teises lähenduses valitakse liigpingepiiriku nimipinge U_{r2} vastavalt taluvustegurile k_{tov} , selleks kasutatakse valemit (1.11) järgmiselt: $U_{r2} \geq \frac{U_{TOV}}{k_{TOV}} \rightarrow U_{r2} = \frac{U_{TOV}}{k_{TOV}}$. Taluvustegur valitakse allika [10] alusel järgalt maandatud elektrisüsteemides $k_{tov} \geq 1,4$.

- Alajaamas A $U_{TOV}=447,84 \text{ kV}$, seega $U_{r2} = \frac{U_{TOV}}{k_{TOV}} = \frac{447,84 \text{ kV}}{1,4} = 319,89 \text{ kV}$
- Alajaamas E $U_{TOV}=473,56 \text{ kV}$, seega $U_{r2} = \frac{U_{TOV}}{k_{TOV}} = \frac{473,56 \text{ kV}}{1,4} = 338,26 \text{ kV}$

Liigpingepiirikute kestevतालituspinge U_C ümberarvutus

Saadud liigpingepiiriku nimipingetest U_{r1} ja U_{r2} valitakse välja kõige suurema väärtusega nimipinge. Mõlema alajaama puhul osutub selleks nimipinge U_{r2} . Seetõttu tuleb ümber arvutada liigpingepiirikute kestevतालituspinge U_C vastavalt valemile (1.12):

- Alajaamas A: $U_C = \frac{U_{r2}}{1,25} = \frac{319,89 \text{ kV}}{1,25} = 255,91 \text{ kV}$
- Alajaamas E: $U_C = \frac{U_{r2}}{1,25} = \frac{338,26 \text{ kV}}{1,25} = 270,61 \text{ kV}$

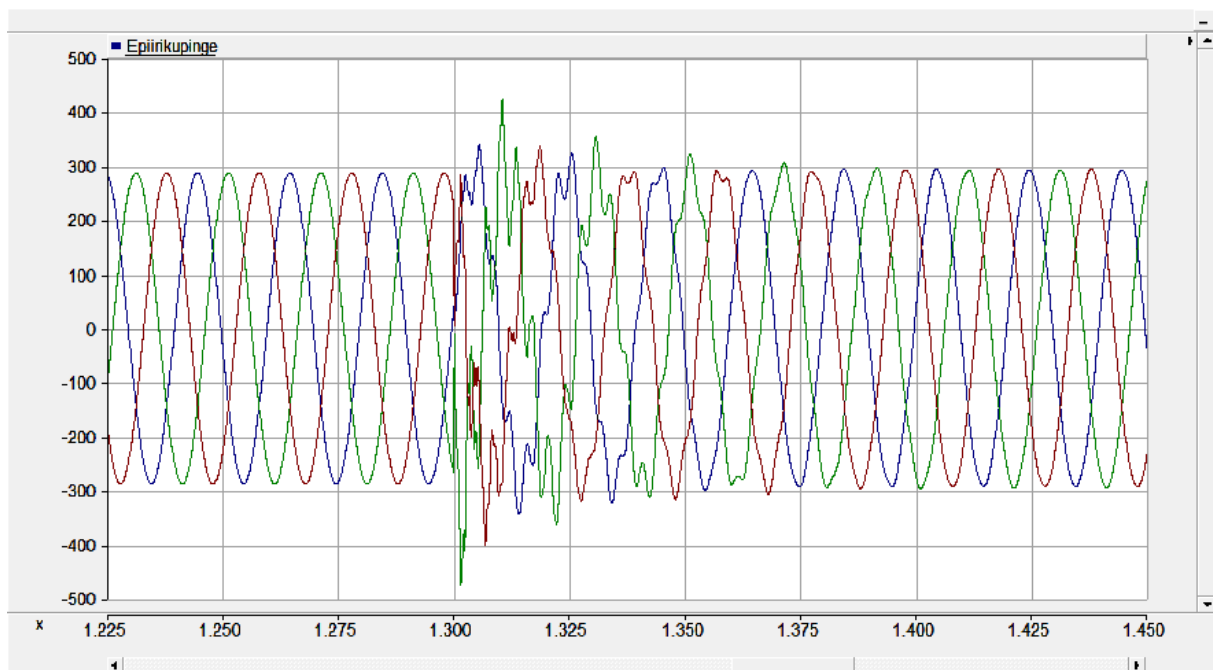
Leitud liigpingepiiriku nimipinged tulebki sisestada mudelis liigpingepiiriku vastava parameetri lahtrisse – *Arrester Voltage Rating*.

4.2 Liigpingepiirikute mõju hindamine

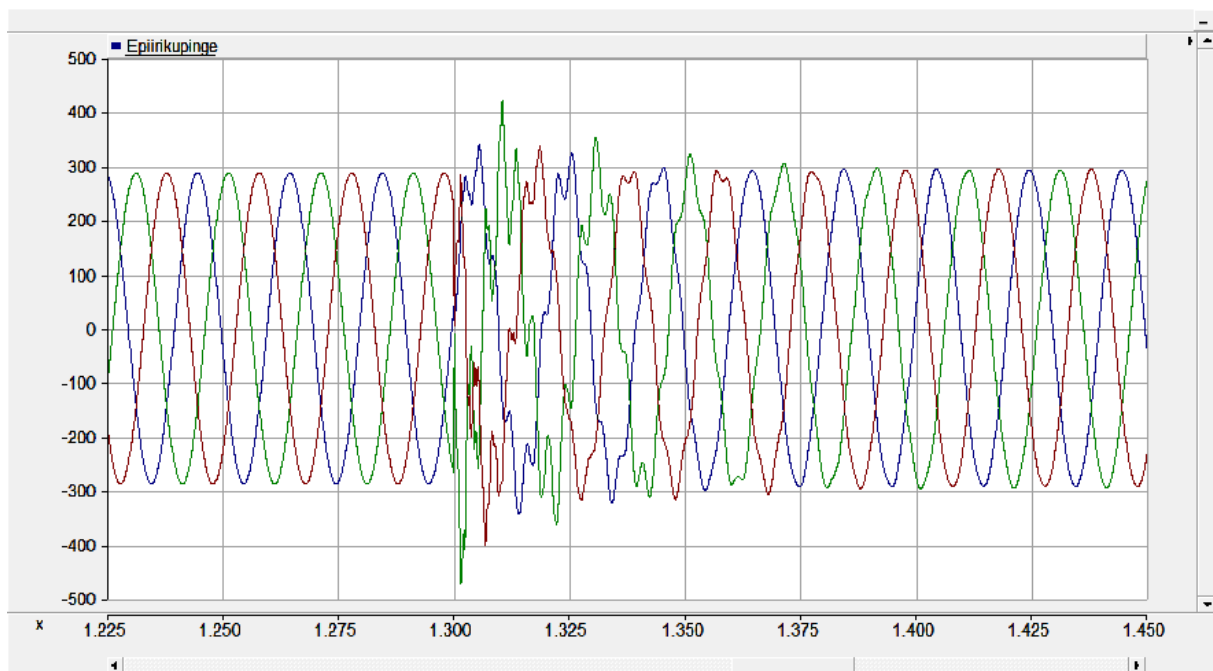
Käesoleva töö punktis 3.1 leitud pingepiirikute paigaldamise tulemusel toimunud liigpingete vähendamist käsitletakse selles punktis.

Kõige suuremad liigpingelained tekivad eelnevalt teostatud arvutuste kohaselt just alajaamas, mis asub lühisest kõige kaugemal (vt tabel 3.1). See on loogiline, sest kõige kaugemas alajaamas lülitatakse käesoleva töö raames teostatud simulatsioonide käigus ajahetkel $t=0,9 \text{ s}$ kogu liin välja. Liinil on väljalülitamise hetkel veel lühis.

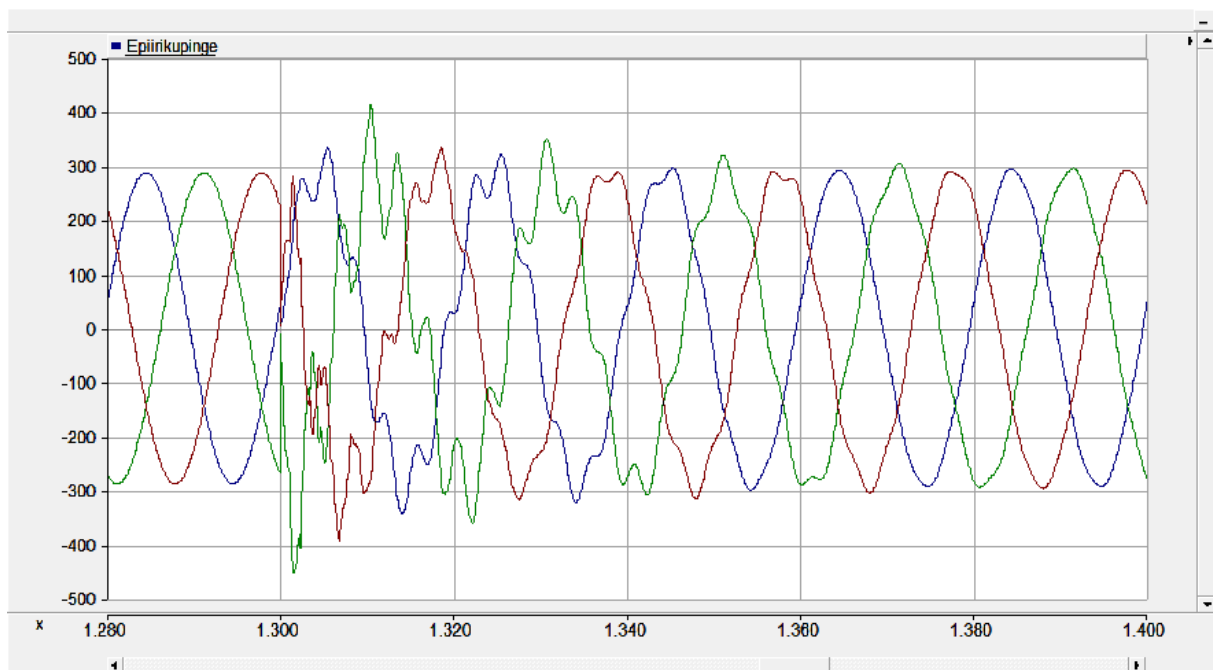
Vaadeldes alajaamas E ehk lühisest kõige kaugemal alajaamas faasipingeid trafo ees enne liigpingepiiriku paigaldamist (vt joonis 4.3) ja peale paigaldamist (vt joonis 4.4), siis on näha, et valitud liigpingepiirik ei vähenda oluliselt liigpingete tipuväärtuseid.



Joonis 4.3 Lügpinge suurus alajaamas E enne lügpingepiiriku paigaldamist ajahetkel $t=1,3$ s, kolmefaasiline 330 kV lühis alajaama A juures kogu liini välja lülitamisega



Joonis 4.4 Lügpinge suurus alajaamas E peale lügpingepiiriku paigaldamist ajahetkel $t=1,3$ s, kolmefaasiline 330 kV lühis alajaama A juures kogu liini välja lülitamisega, $k_{tov}=1,4$



Joonis 4.5 Liigpinge suurus alajaamas E peale liigpingepiiriku paigaldamist ajahetkel $t=1,3$ s, kolmefaasiline 330 kV lühis alajaama A juures kogu liini välja lülitamisega, $k_{tov}=1,8$

Liigpingete tipuväärtuste tõttu suurendatakse taluvustegurit $k_{tov}=1,8$ juurde ning teostatakse taas arvutused leidmaks liigpingepiirikute nimipingeid. Liigpingepiirikute uued nimipinged on järgmised:

- Alajaamas A $U_{r2} = \frac{U_{TOV}}{k_{TOV}} = \frac{447,84 \text{ kV}}{1,8} = 248,80 \text{ kV} \rightarrow 250,06 \text{ kV}$
- Alajaamas E $U_{r2} = \frac{U_{TOV}}{k_{TOV}} = \frac{473,56 \text{ kV}}{1,8} = 263,09 \text{ kV}$

Alajaamas A valitakse liigpingepiiriku nimipingeks U_{r1} , sest see on suurem, kui leitud U_{r2} ($U_{r1} > U_{r2} \rightarrow 250,06 > 248,80$ [kV]).

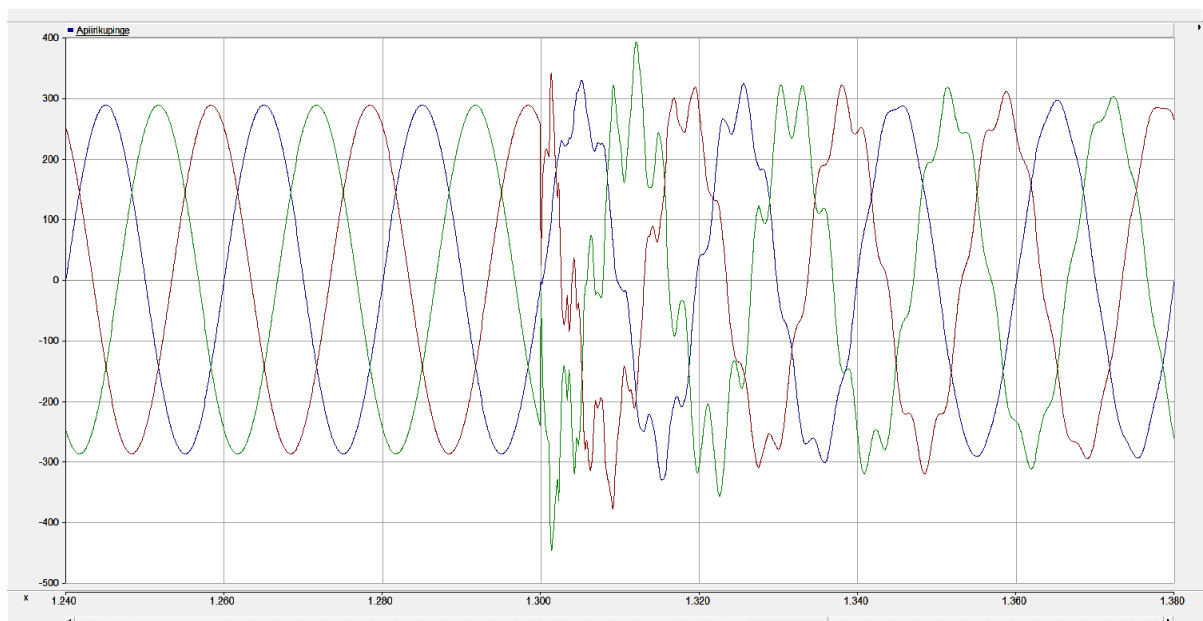
Joonis 4.5 kirjeldab faasipingeid trafo ees olukorras, kui liigpingepiirik on valitud teguri $k_{tov}=1,8$ järgi. Sellisel juhul vähenevad liigpingete tipuväärtused 473,56 kV pealt 452,12 kV peale. Seega vähendas liigpingepiirik alajaamas E kõige suuremat liigpingelainet 21,44 kV võrra.

Järgnevalt vaadeldakse liigpingepiirikute mõju alajaamas A.

Vastavalt kuue erineva katse (vt tabel 3.1) käigus mõõdetud tulemustele osutus kõige ekstreemsemaks juhtumiks alajaamas A katse nr 2, mille käigus 330 kV lühis toimus alajaama E lähedal ning mille tulemusel lülitati kogu liin välja. Sarnaselt katsele nr 1, kus kolmefaasiline

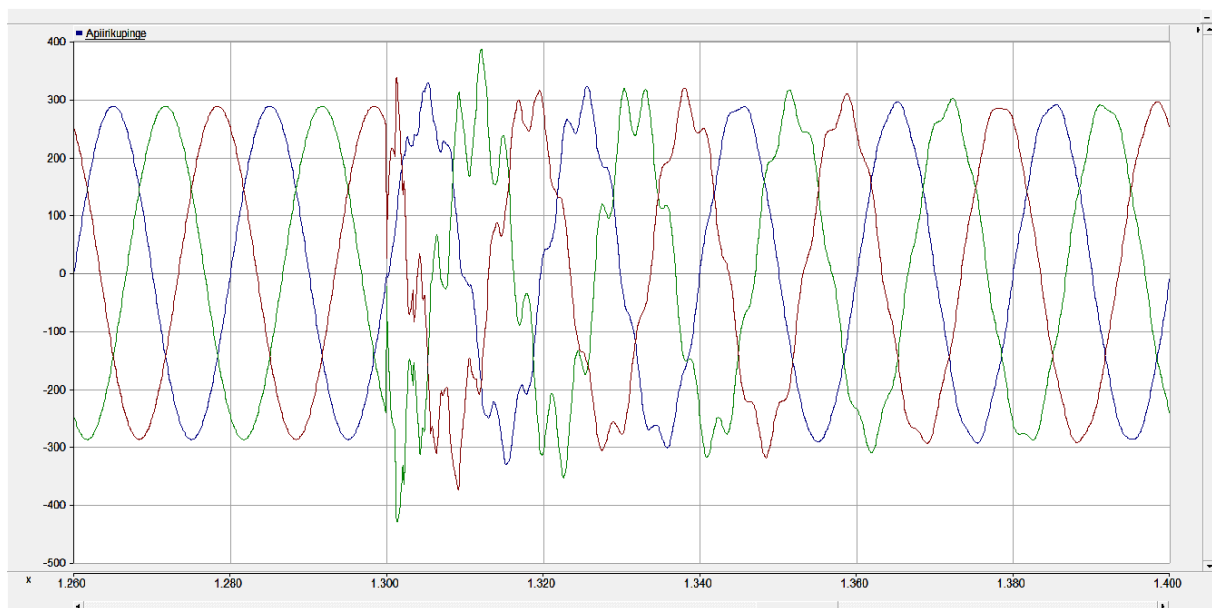
lühis toimus alajaama A lähedal, esinesid katse nr 2 puhul samuti kõige suuremad liigpinged alajaamas, mis lülitas liini elektrisüsteemist välja ehk lühise asukohale kõige kaugem alajaam (vt tabel 3.1).

Alajaamas E valitakse liigpingepiiriku nimipingeks $U_{r2}=263,09 \text{ kV}$ ning alajaamas A valitakse liigpingepiirik vastavalt käesoleva töö punktis 1.4 kirjeldatud metoodikale $U_{r1}= 250,06 \text{ kV}$, sest see suurus on kahe erineva valemiga (1.11) leitud liigpingepiiriku nimipingest kõige suurema väärtusega alajaamas A.



Joonis 4.6 Liigpinge suurus alajaamas A enne liigpingepiiriku paigaldamist ajahetkel $t=1,3 \text{ s}$, kolmefaasiline 330 kV lühis alajaama E juures kogu liini väljalülitamisega

Joonis 4.6 kujutab liigpingete suurusi trafo ees enne liigpingepiiriku paigaldamist alajaama A. Liigpinge tipuväärtused kerkivad kuni $447,84 \text{ kV}$. Joonis 4.7 kirjeldab liigpingete suurusi trafo ees peale liigpingepiiriku ($U_{r1}=250,06 \text{ kV}$) ning liigpinge tipuväärtused kerkivad kuni $428,89 \text{ kV}$.



Joonis 4.7 Liigpinge suurus alajaamas A peale liigpingepiiriku paigaldamist ajahetkel $t=1,3$ s, kolmefaasiline 330 kV lühis alajaama E juures kogu liini välja lülitamisega, $k_{tov}=1,8$

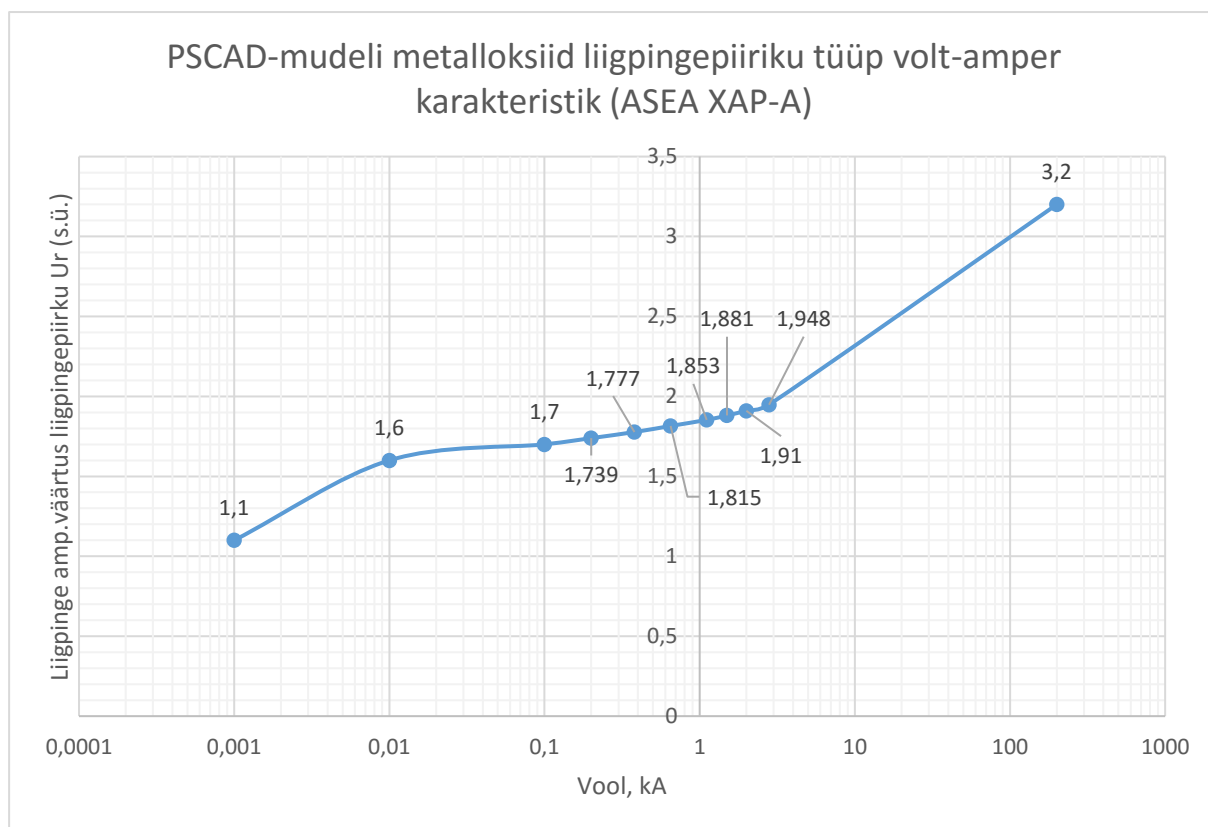
Eelpool toodud tulemused näitavad, et liigpingepiirik vähendas liigpingeid alajaamades järgmiselt:

- Alajaamas A: 18,95 kV;
- Alajaamas E: 21,44 kV.

Paarikümne kilovoldi võrra liigpingepiiriku mõju ei ole suur. Vaadeldes metalloksiid liigpingepiiriku iseloomuliku volt-amper karakteristikut (vt joonis 1.11), siis on näha, et liigpingepiirik laseb lülitusliigpingete puhul voolu läbi 1000 A alla pooleteisekordse liigpingepiiriku nimipinge. Ehk kui käesolevas töös mudelisse paigaldatud liigpingepiiriku tulemusel on liigpinge amplituudväärtuse 428,89 kV (vt joonis 4.7) korral rakendunud liigpingepiiriku nimipinge peab olema 260,05 kV, mis tähendab, et valitud liigpingepiiriku rakendamisel 1000 A juures on liigpinge amplituudväärtus $\frac{428,89 \text{ kV}}{260,05 \text{ kV}} = 1,65$ suurem liigpingepiiriku nimipingest.

Joonis 4.8 kirjeldab PSCAD-mudelis kasutatud metalloksiid liigpingepiiriku tüüpilist volt-amper karakteristikut. Sellelt järeldub, et 1,6 kordse liigpinge amplituudväärtuse korral liigpingepiiriku nimipingesse on liigpingepiirikut läbiva voolu suurus 0,001 kA. Seega on käesolevas töös PSCAD-mudeli tüüp liigpingepiiriku kasutamisel liigpinge amplituudväärtuse vähenemine liigpingepiiriku paigaldamisel ootuspärane, sest liigpingepiiriku vool ei kasva isegi

1 A-ni. Seega mudelis kasutatud liigpingepiirik talitab tekkinud liigpinge puhul nimipinge ning lülitusliigpingete kaitsenivoo vahemikus (vt joonis 1.11) nn normaaltalituse vahemikus.



Joonis 4.8 PSCAD-mudeli metalloksiid liigpingepiiriku (ASEA XAP-A) tüüp volt-amper karakteristik

Kõik liigpingepiirikuga teostatud katsete tulemused on kirjeldatud allolevas tabelis (vt Tabel 4.1). Tabeli ülesehitus on sama, mis ilma liigpingepiirikuteta katsetelgi (vt Tabel 3.1). Kõige suuremat mõju avaldasid liigpingepiirikud kolmefaasiliste lühiste korral lühisest kõige kaugemal alajaamas, vastavad pinge väärtused on kirjeldatud tumedalt (vt tabel 4.1).

Tabel 4.1 Faasipingete minimaalsed ja maksimaalsed väärtused erinevatel katsetel liigpingepiirikutega

Katse nr	U_{tov} alajaamas A, kV				U_{tov} alajaamas E, kV			
	Minimaalselt		Maksimaalsel		Minimaalselt		Maksimaalsel	
	kV	U_{tov}/U_{norm}	kV	U_{tov}/U_{norm}	kV	U_{tov}/U_{norm}	kV	U_{tov}/U_{norm}
1"	-289,46	1,07	292,5	1,09	-452,11	1,68	414,45	1,54
2"	-428,89	1,59	386,45	1,43	-291,75	1,08	306,8	1,14
3"	-310,72	1,15	318,16	1,18	-420,31	1,56	400,09	1,48
4"	-362,37	1,34	368,95	1,37	-336,86	1,25	306,76	1,14
5"	-310,72	1,15	318,16	1,18	-301,18	1,12	314,18	1,17
6"	-337,92	1,25	328,16	1,22	-336,85	1,25	304,99	1,13

Kokkuvõtteks saab järeldada, et liigpingepiiriku paigaldamisel on oluline välja selgitada liigpinge amplituudväärtus, sest selle alusel määratakse liigpingepiiriku nimipinge. Valesti valides võivad liigpingepiiriku poolt kaitstavad seadmed kahjustuda liigpinge tõttu. Mudeli kasutamisel liigpingepiiriku töö uurimisel on väga oluline välja selgitada kasutava metalloksiid liigpingepiiriku volt-amper karakteristik: liigpinge amplituudväärtused peavad olema kõrgemal lülitusliigpingete kaitsenivoost. Vastasel juhul ei juhi lülitusliigpingete puhul liigpinge voolu. Liigpingepiiriku üledimensioneerimine ei anna soovitud efekti ning aladimensioneerimine võib liigpingepiiriku rikkuda, sest liigpingepiirik kuumeneb tihti, mille tõttu liigpingepiirik amortiseerub kiiresti.

4.3 Jääklaine uurimine PSCAD-mudeliga

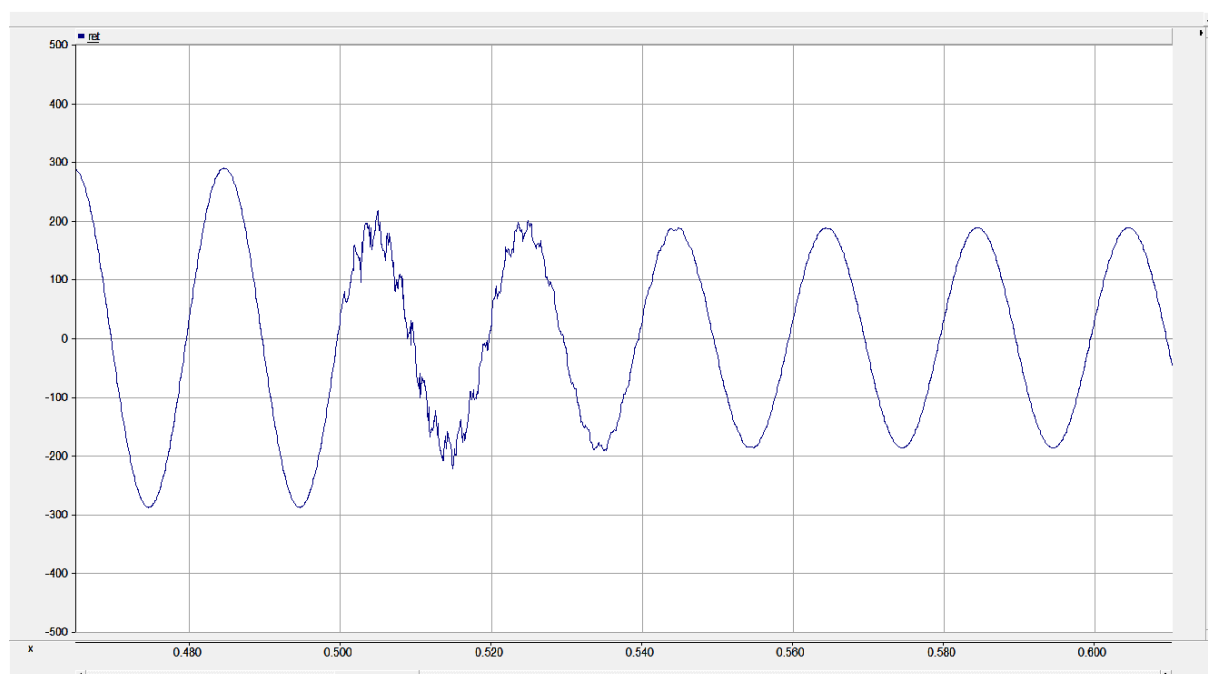
Nagu eelnevalt kirjeldatud mudeliga teostatud katsete tulemustes selgub, siis liigpingelaine avaldas kõige enam mõju just selles alajaamas, kus toimus lühise viimane väljalülitamine – lühisest kõige kaugem võimsuslüliti. Lühisele kõige lähemal asuv võimsuslüliti lülitas esimesena peale lühise tekkimist ning lühisele kõige kaugem võimsuslüliti lülitas liini lõplikult välja.

Tabel 4.2 kirjeldab alajaamas A ja E võimsuslüliti klemmide pinget tervetes faasides ja lühisest haaratud faasides.

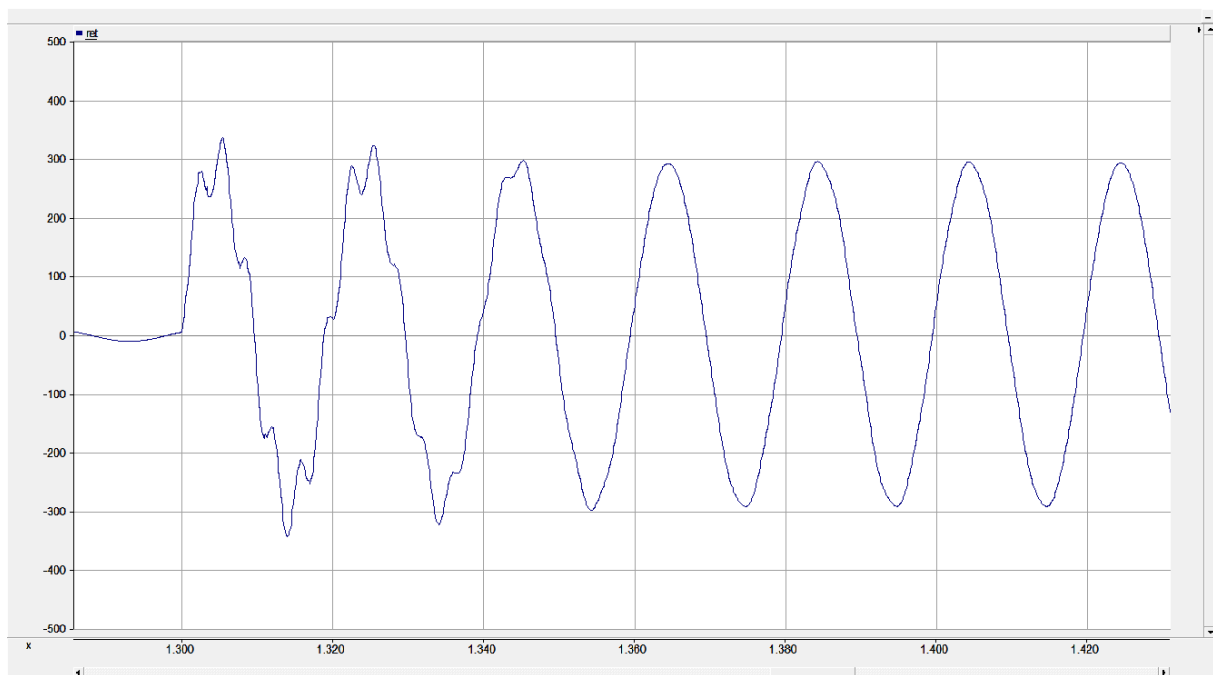
Tabel 4.2 Liini alguses ja lõpus esinevad liigpinged võimsuslülitil kontaktidel

	1"		2"		3"		4"		5"		6"	
	U _{VL} , kV		U _{VL} , kV		U _{VL} , kV		U _{VL} , kV		U _{VL} , kV		U _{VL} , kV	
	A	E	A	E	A	E	A	E	A	E	A	E
Min terve					-338,1	-166,7	-563,4	-569,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Max terve					644,6	652,3	596,0	587,5	0,0	0,0	0,0	0,0
Min lühis	-307,7	-482,9	-523,1	-367,2	-288,3	-372,7	-456,0	-357,7	-313,8	-364,9	-451,7	-356,8
Max lühis	344,6	465,3	476,8	332,0	289,2	444,6	368,4	289,1	289,3	443,4	349,2	295,6

Tabelis (vt tabel 4.2) on paaritu katse numbriga katsed sellised, kus liini alguseks on võimsuslülitil alajaamas E ning paarisarvulise katse numbriga katsed on sellised, kus liini alguses on alajaam A. Vastavate liini alguse (lühisest kõige kaugema) võimsuslülitite suurimad ja vähimad kontaktide vahelised pinged on tähistatud **bold**-formaadis. Sümmeetrilise kolmefaasilise lühise korral oli kõige suurem pinge kontaktide vahel siis, kui liini alguseks oli alajaam E. Mitte-sümmeetrilise lühise puhul oli kõige suurem kontaktide vaheline pinge liini alguses oleval võimsuslülitil. See on põhjendatav sellega, et pinge sundkomponent on väiksema amplituudväärtusega kui liini alguses tekkiva pinge amplituud. Liini alguses tekkiva pinge amplituudi ajab suureks summeeruvad peegelduvad pingelained (vt p 1.4).



Joonis 4.9 Faasi A faasipinge alajaamas E (liini algus) liinis tekkiva lühise hetkel ($t = 0,5$ s), katse 1“



Joonis 4.10 Faasi A faasipinge alajaamas E (liini algus) liini taaspingestamisel ajahetkel $t=1,3$ s, katse 1“

Joonis 4.9 kirjeldab olukorda, kus liinil tekib kolmefaasiline lühis maaga: siirdeprotsessist tekkinud kulglaine peegeldub liinis ning seetõttu tekib hammaspinge, mis hajub kolmanda perioodi alguseks. Sama olukord tekib ka liini lõplikul väljalülitamisel samas alajaamas (alajaam E ehk liini algus), kui kulglaine liini alguses peegeldub ning tekitab hammaspinge, mis hajub kolmanda täisperioodi alguseks.

Jääklaine peegeldumine liini lõpus kutsub esile hammaspinge tekkimise õhuliinis ning avaldab mõju liini alguses paiknevale võimsuslülitile. Katsed kinnitavad seda, et jääklaine peegeldumine 330 kV liinis tekib, kuid selle märkamiseks tuleb mudel seadistada piisavalt tiheda sammuga, et seda märgata. Käesolevas töös seadistati mudeli samm 5 μ s, et hammaspinge oleks pinge graafikutel eristatav.

5 Indutseeritud liigpingete uurimine

Kolmefaasilise liini igas juhtmes indutseeritakse mitte ainult endainduktsioon elektromotoorjõud, mis on tingitud vahelduvvoolust samas juhtmes, vaid ka vastastikuse induktsiooni elektromotoorjõud, mis on tingitud liini teiste juhtmete vooludest. [15]

Õhuliinid põhjustavad nende läheduses asuvatele objektidele järgmisi nähtusi [16]:

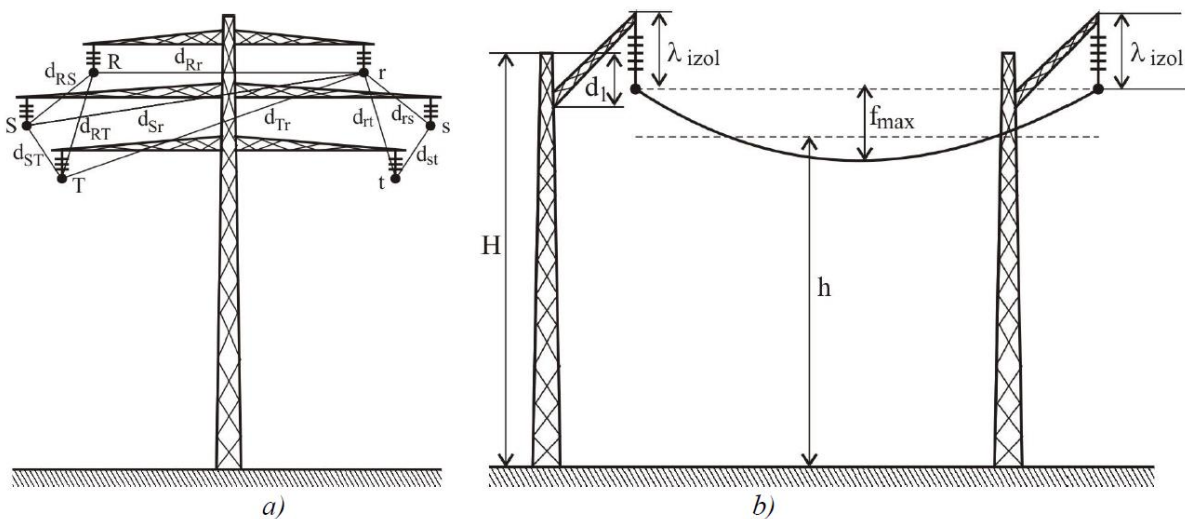
- elektrivälja mõjutused tekivad lähedal asuvate objektide ning pingestatud liini faasijuhtmete vahel läbi mahtuvuslike ühenduste;
- magnetvälja mõjutused tekivad pingestatud liini faasijuhtmete ja lähedal asuvate objektide vahel läbi induktiivsete ühenduste.

Järgnevalt vaadeldakse esmalt indutseeritud liigpingeid kirjandusallika [16] alusel, kus on kirjeldatud liigpingete matemaatiline mudel. Peale seda kirjeldatakse liigpingeid, mis tekkisid käesoleva töö punktis 2 kasutatud mudeli 110 kV liinil, kui sinna indutseeris pinge samadel mastidel paiknev 330 kV õhuliin.

5.1 Indutseeritud pinge matemaatiline mudel

Kirjandusallikas [16] kirjeldatud indutseeritud pingete mõõtmine viidi läbi Rumeenias 2006. aastal riigi edelaosas asuvate kaheaheelalise 220 kV õhuliinide puhul. Selleks teostati mõõtmised erinevatel 220 kV õhuliinidel ning võrreldi hiljem saadud tulemusi matemaatiliste mudelitega. Mõõtmised teostati nii, et üks 220 kV õhuliini ahel oli sisse lülitatud ja teine ahel oli välja lülitatud. Käesolevas töös teostatakse kõik mõõtmised vaid PSCAD-mudeliga.

Elektromagnetilise mõju avaldumist mõjutab elektriliini faasijuhtmete ja nende lähedal asuvate objektide omavahelised vahekaugused. Seega on matemaatiliste mudelite puhul ülioluline kasutada faasijuhtmete võimalikult täpset omavahelist geometriat. [16]



Joonis 5.1 Kõrgepingeliini geometria määramine [16]

Keskmine kaugus faasijuhtmete ja maa vahel on leitav valemiga [16]:

$$D_{CP} = 550 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (5.1)$$

kus:

ρ – on maa takistus;

f – liini nimisagedus.

Liinijuhtmete keskmine kõrgus maast leitakse valemiga [16]:

$$h_k = H - d_1 - \lambda_{izk} - \frac{2}{3} max_k \quad (5.2)$$

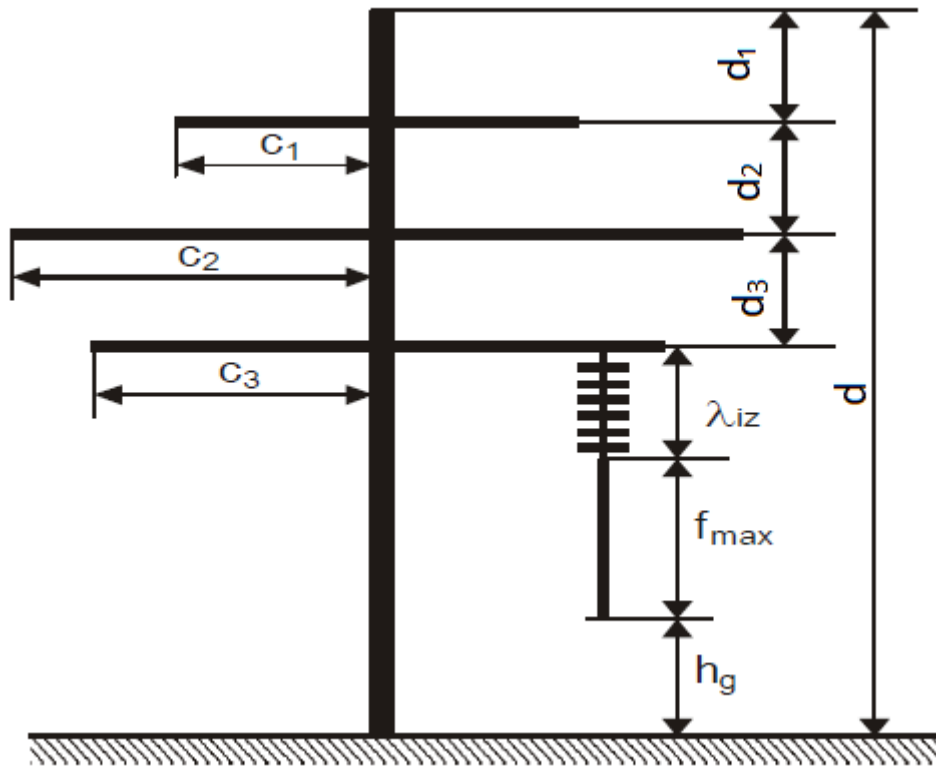
kus:

H – masti kõrgus;

d_1 – traaversi kaugus masti kõrgeimast kohast;

λ_{izk} – isolaatorketi pikkus;

f_{maxk} – faasijuhtme riipe visangu keskel.



Joonis 5.2 Vabalt seisva torumasti geometria [16]

Vertikaalsed ja horisontaalsed faasijuhtmete vahekaugused leitakse vastavalt nende paigutusele õhuliinil (vt joonis 5.2) järgmiste valemitega [16]:

$$\begin{cases} d_{RS} = d_{rs} = \sqrt{h_1^2 + (d_2 - d_1)^2} \\ d_{ST} = d_{st} = \sqrt{h_2^2 + (d_2 - d_3)^2} \\ d_{RT} = d_{rt} = \sqrt{(d_1 - d_2)^2 + (d_3 - d_1)^2} \end{cases} \quad (5.3)$$

kus:

d_{rs} , d_{st} , d_{rt} - faaside omavahelised kaugused;

d_1 , d_2 , d_3 - faasijuhtmete kõrgused;

h_1 , h_2 - isolaatorkettide pikkused.

Mahtvuslike ühenduste matemaatiline mudel

Kaheaheelalise õhuliini faasijuhtmete vahel tekivad pingestatud olekus kompleksed mahtvuslikud ühendused. Joonis 5.3 kirjeldab neid mahtvuslike ühendusi, mida saab arvutada järgmise valemiga [16]:

$$C_{ik} = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{d_{ik}}{r_0}} \quad (5.4)$$

kus

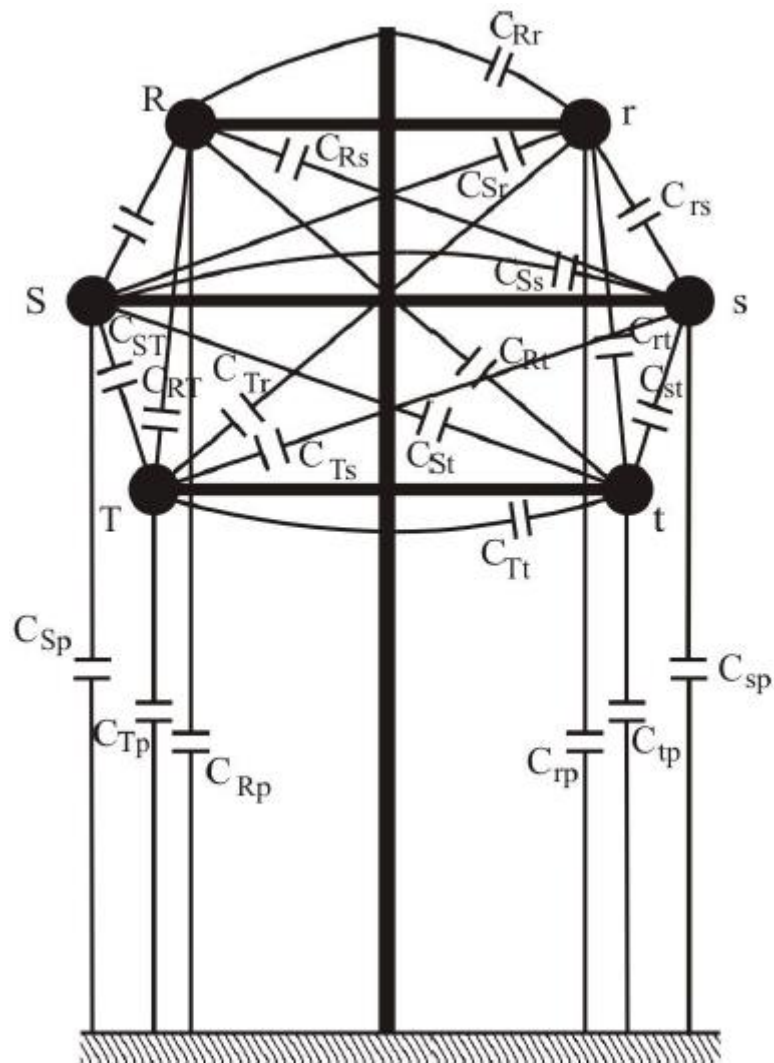
C_{ik} – vastav mahtuvus faasijuhtmete vahel;

d_{ik} – vastavate faasijuhtmete vaheline kaugus.

ε_0 – keskkonna dielektriline läbitavus;

r_0 – faasijuhtme raadius;

l – liini pikkus.

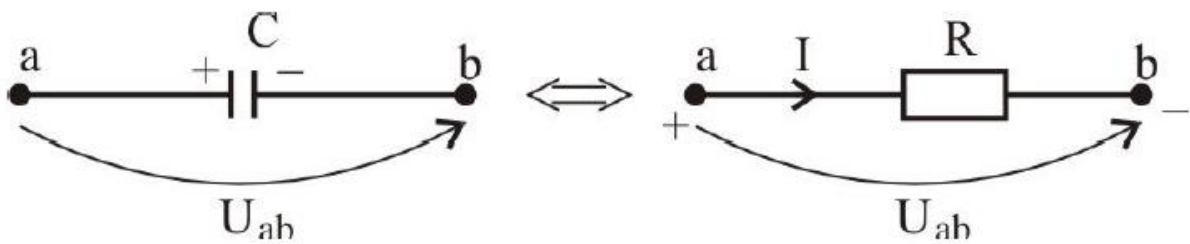


Joonis 5.3 Kaheahelalise õhuliini faasijuhtmete vahel tekkivad mahtvuslikud ühendused [16]

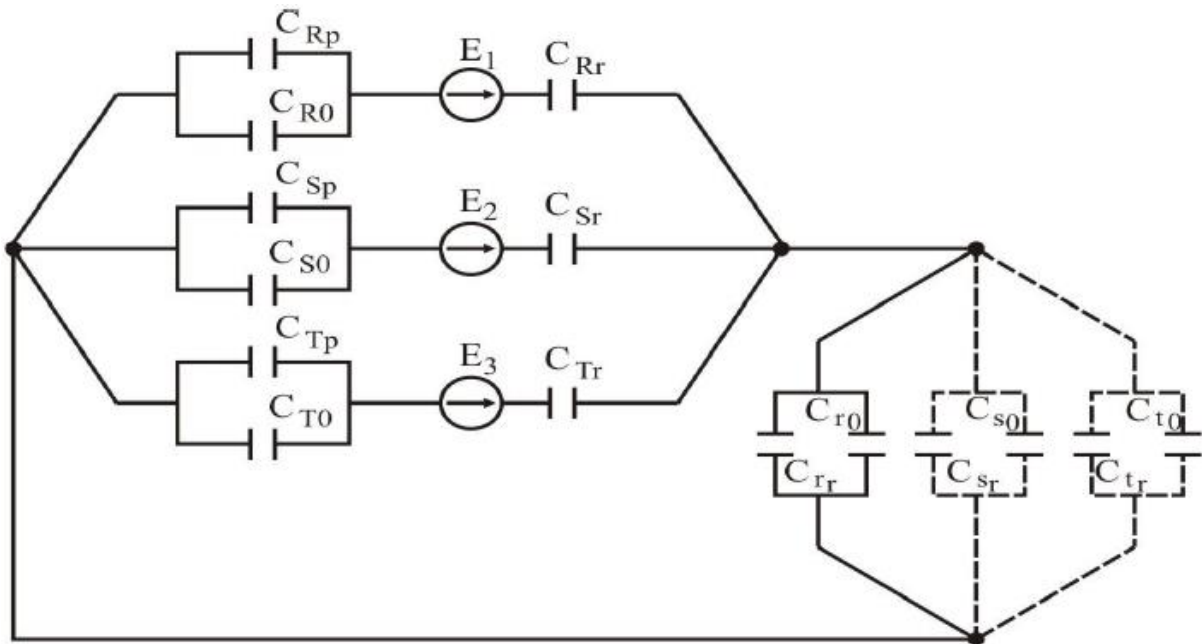
Faasijuhtmete ja maa vahelised mahtuvused leitakse valemiga [16]:

$$C_{pi} = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln\left(\frac{2h_i}{r_0}\right)} \quad (5.5)$$

Kõik need mahtuvused saab kirjeldada resulteeriva skeemiga, mis on kujutatud alloleval joonisel (vt joonis 5.5). Sellise skeemi lahendamise Kirchhoffi-seadustega on keeruline, sest teadmata on pinged, mille juures kondensaatorid on laetud. Skeemi lahendamiseks asendatakse kondensaatorid takistustega järgnevalt aktiivtakistustega [16]:



Joonis 5.4 Kondensaatorite asendamine takistustega [16]

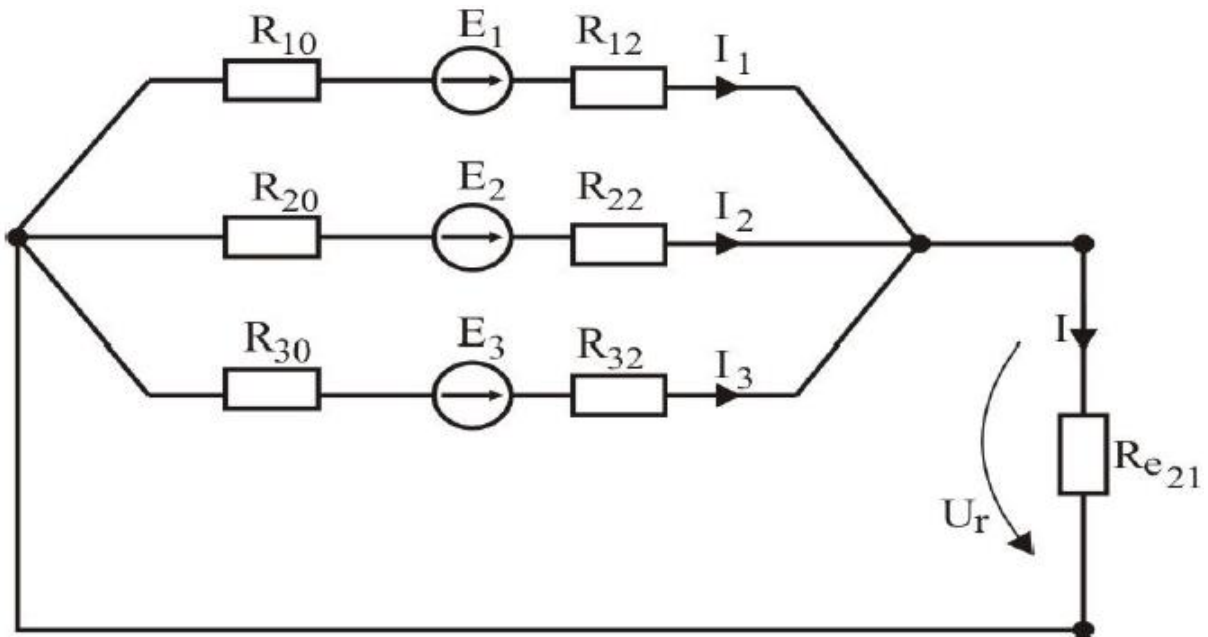


Joonis 5.5 Mahtuvuste skeem [16]

Kuna selline teisendamist saab teostada vaid alalisvooluahelate puhul, siis vahelduvvooluahela puhul jagati võrgusageduse üks periood 100 võrdseks osaks, millele leiti vastav diskreetne pinge igal ajahetkel (100 tk). Ehk kasutada saab järgmisi analooge: $I \equiv Q$ ja $R_{ei} \equiv \frac{1}{C_{io} + C_{ip}}$. [16]

Joonis 5.6 kirjeldab skeemi, milles on mahtuvused teisendatud aktiivtakistusteks. Elektromotoorjõud leitakse vastavalt Kirchhoffi reeglitele järgmiselt [16]:

$$\begin{cases} E_1 - E_2 = (R_{10} + R_{12}) \cdot I_1 - (R_{20} + R_{22}) \cdot I_2 \\ E_2 - E_3 = (R_{20} + R_{22}) \cdot I_2 - (R_{30} + R_{32}) \cdot I_3 \\ E_3 = (R_{30} + R_{32}) \cdot I_3 - R_e \cdot I \\ I_1 + I_2 + I_3 = I \end{cases} \quad (5.6)$$



Joonis 5.6 Teisendatud askeskeem kondensaatorite kujult aktiivtakistuste kujule [16]

Lahendades skeemi (vt joonis 5.6) valemitega (5.6) ning võttes arvesse analoogiaid, mis loodi selle vahelduvvoolu skeemi jaoks, siis on võimalik leida indutseeritud pinge iga faasijuhtme jaoks välja lülitatud õhuliinil. Näiteks valemile (5.7) vastavalt pinge mahtuvusel avaldub valemiga (5.8). Teostatud arvutused ning tegelikud mõõtmised kirjandusallika [16] järgi annavad aluse olla kindlad kirjeldatud matemaatilise mudeli täpsuses.

$$U_{fi} = R_{ei} \cdot I_i \quad (5.7)$$

Kus

U_{fi} – pinge takistil;

R_{ei} – takisti takistus;

I_i – vool takistil;

$$U_{fi} = \frac{Q_i}{C_{i0} + C_{pi}} \quad (5.8)$$

kus

Q_i – reaktiivvõimsus;

C_{i0} – mahtuvus askeskeemil;

C_{pi} – faasijuhtme ja maa vaheline mahtuvus.

Magnetiliste ühenduste matemaatiline mudel

Kui eelnevalt vaadeldi liinijuhtmete vahelisi mahtuvuslike ühenduste vahelisi seoseid, siis järgnevalt vaadeldaks ka elektriliinide magnetilisi ühendusi, mis tekivad nende elektriliinide induktiivsuste tõttu.

Induktiivne sidustatus tekitab elektriliinide vahel muutuva iseloomuga vahelduvvool, mis liikutes elektriliinis indutseerib elektromotoorjõu selle liiniga paralleelselt kulgevasse õhuliini juhtmesse. Matemaatiliselt kujutatakse neid voolusid järgmiselt [16]:

$$\begin{cases} i_A = \sqrt{2} \cdot I_{fA} \sin(\omega \cdot t + \varphi) \\ i_B = \sqrt{2} \cdot I_{fB} \sin\left(\omega \cdot t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_C = \sqrt{2} \cdot I_{fC} \sin\left(\omega \cdot t + \varphi - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (5.9)$$

kus

i_A, i_B, i_C – faasivoolud;

I_{fA}, I_{fB}, I_{fC} – faasivoolu efektiivväärtus.

Võrgumudelil leitakse induktiivsus järgmise valemiga [16]:

$$M_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi} = \int_0^l \frac{dl_1 dl_2}{\sqrt{(l_1 - l_2)^2 + d_{12}^2}} \quad (5.10)$$

kus:

l_1 ja l_2 – paralleelselt asuvate liinilõikude pikkused;

d_{12} – paralleelselt asuvate liinilõikude omavahelin vahekaugus.

Kasutades valemit (5.10), on võimalik kirjeldada elektromotoorjõud, mis tekivad välja lülitatud liinis järgmiselt [16]:

$$\begin{cases} U_A = -j \cdot \omega \cdot (i_A \cdot M_{Aa} + i_B \cdot M_{Ba} + i_C \cdot M_{Ca}) \\ U_B = -j \cdot \omega \cdot (i_A \cdot M_{Ab} + i_B \cdot M_{Bb} + i_C \cdot M_{Cb}) \\ U_C = -j \cdot \omega \cdot (i_A \cdot M_{Ac} + i_B \cdot M_{Bc} + i_C \cdot M_{Cc}) \end{cases} \quad (5.11)$$

kus

U_A, U_B, U_C – välja lülitatud liinis indutseeritud elektromotoorjõud;

i_a, i_B, i_C – faasivoolud pingestatud liinil;

M_{Xx} – faasijuhtmete vahelised induktiivsused.

Matemaatilise mudeli järelendus kirjandusallika [16] järgi

Mahtuvuslike ühenduste ja induktiivsete ühenduste uurimisel selgus, et kõige väiksem indutseeritud pinge tekib väljalülitatud liinis keskmisel faasijuhtmel. Kui õhuliini puhul on kasutatud transpositsiooni, siis on kõige suurem indutseeritud pinge tekib kõige ülemisel faasijuhtmel (vt joonis 5.1), sest siis on sellel faasijuhtme ja- maa vaheline takistus kõige suurem. [16]

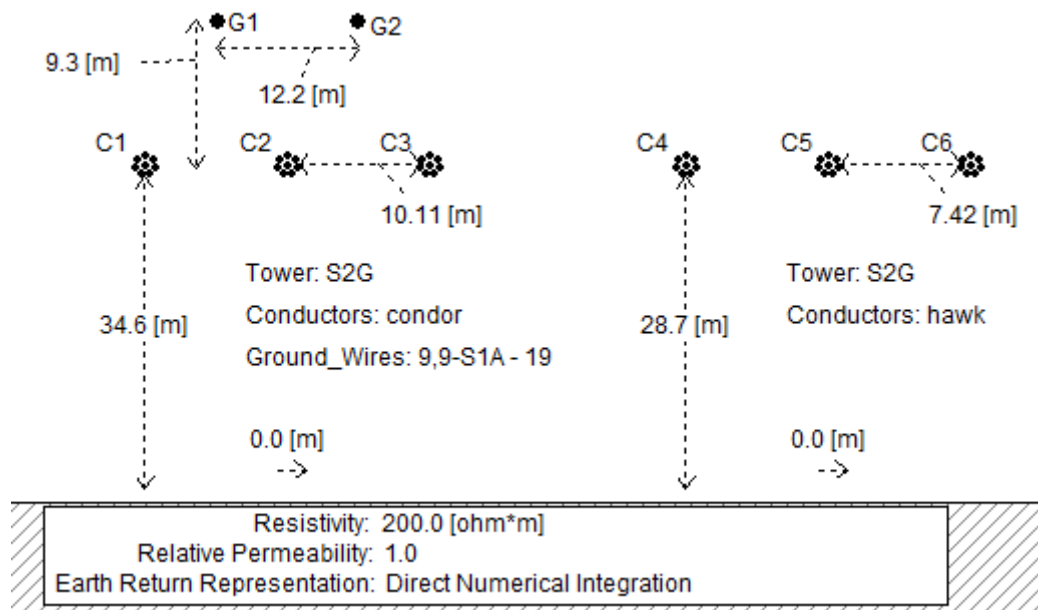
Mahtuvusliku ühenduse tõttu tekkinud indutseeritud pinge ei ole ohtliku suurusega ning õigesti maandades ei kujuta need pinged ohtu elektriliini teenindavale personalile, kuid läbi magnetiliste ühenduste indutseeritud pinged väljalülitatud liinil on juba ohtliku suurusega, mis nõuab juba teenindava personali täiendavat kaitsmist indutseeritud pinge eest. Näiteks personaalsete kaitseseadmete kasutamist suurendades inimese ja maa vahelist takistust. Kuna indutseeritud pinge suurus sõltub liini pikkusest, siis juba üle 20 km pikkustel lõikudel (kus on paralleelsed liinid) kasvab indutseeritud pinge lineaarselt koos paralleelse liiniosa pikkusega. [16]

5.2 Kahekorruselise õhuliini parameetrid

Käesolevas töös on üheks uuritavaks nähtuseks indutseeritud pinge, mis tekib kahekorruselisel liinil, kus on 330 kV ja 110 kV ahelad. Pingestatud liinid kutsuvad teises, paralleelselt kulgevas liinis esile indutseeritud pinge hoolimata sellest, kas teine õhuliin on pingestatud või mitte.

PSCAD-mudelis kasutatakse õhuliini parameetrite määramisel õhuliini mudelit, kus on määratud kõik vajalikud parameetrid nagu:

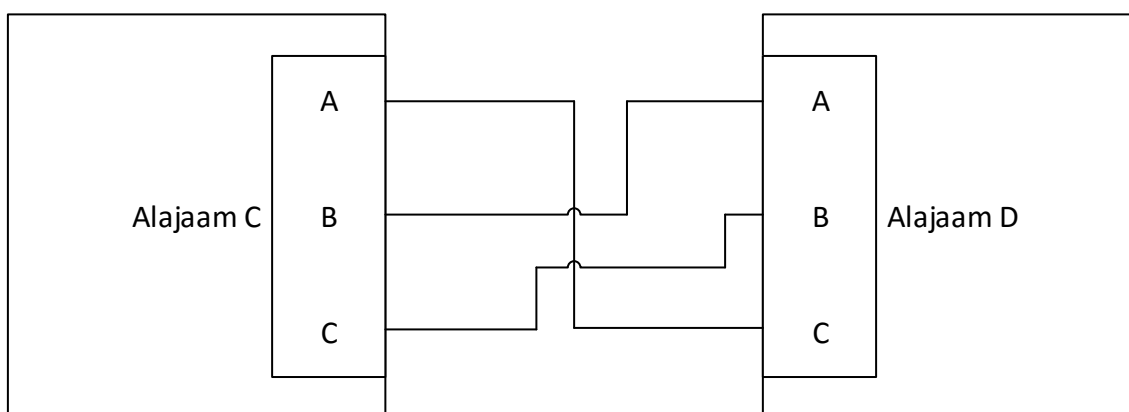
- 330 kV õhuliini faasijuhtmete omavaheline kaugus;
- 110 kV õhuliini faasijuhtmete omavaheline kaugus;
- 330 kV õhuliini faasijuhtmete kõrgus maapinnast;
- 110 kV õhuliini faasijuhtmete kõrgus maapinnast;
- 110 kV õhuliini asetus 330 kV õhuliiniga võrreldes;
- Piksekaitsetrosside (2 tk) paiknemine 330 kV faasijuhtmete suhtes;



Joonis 5.7 PSCAD-mudeli kahekorruseline liini parameetrid

Joonis 5.7 kujutab 330 kV ja 110 kV õhuliini ahela paiknemist. Tegu on parameetritega, mis on eeskujuks võetud Elering AS poolt kasutatava kahekorruselisel õhuliinil mastiga S2G (vt Lisa 1.1). Nimetatud parameetrid sisestati kõikidesse plokkidesse, kus oli kahe alajaama vahel kirjeldatud õhuliini vastava mudeliga PSCAD-is. Need plokid olid 2, 4, 5, 7, 9 ja 15 (vt joonis 2.1 ja joonis 2.2).

Käesolevas töös kasutatud mudelis kasutatakse sellel liinil transponeerimist, mille tulemusel ei klapi omavahel faaside värvid alajaamas C ja alajaamas D mõõdetud faasipingete puhul. Seetõttu peab arvestama sellise transponeerimisega:



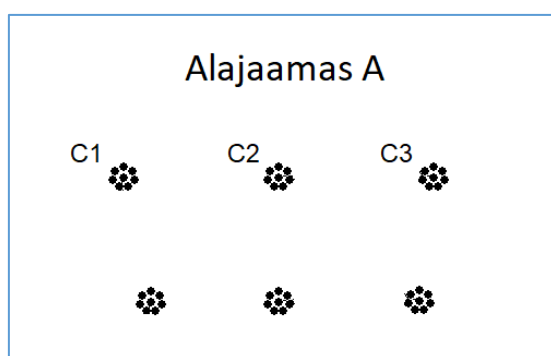
Joonis 5.8 Transpositsioon 110 kV liinil

Joonis 5.8 kujutab faasijuhtmete transpositsiooni 110 kV liinijuhtmel. Järgnevatel joonistel, kus kujutatakse 110 kV õhuliini faasipingeid alajaamades C ja D on mudelis kasutatud voltmeetrit

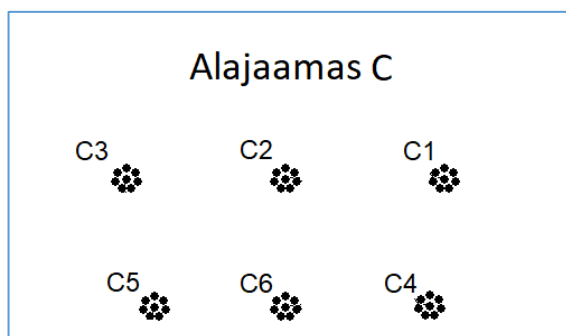
vastavas alajaamas võimsuslüliti juures ühejooneskeemi peal. See tähendab, et järgnevatel joonistel, kus kujutatakse 110 kv õhuliini faasipingeid on värvide loogika järgmine:

- faas a – sinine;
- faas b – roheline;
- faas c – punane.

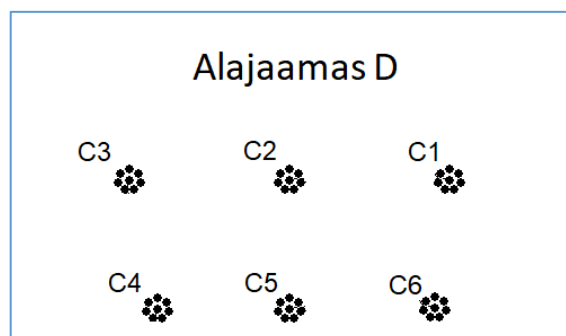
Samuti teostati transponeerimine 330 kV õhuliinil vahetult enne alajaama C portaale. Selle transponeerimise käigus vahetati ära omavahel äärmised faasid C1 ja C3 (vt joonis 5.10).



Joonis 5.9 Faasijuhtmete paigutus alajaama A juures



Joonis 5.10 Faasijuhtmete paigutus alajaama C juures



Joonis 5.11 Faasijuhtmete paigutus alajaama D juures

5.3 Indutseeritud pingete uurimine PSCAD-mudeliga

Kui lähtudes kirjandusallikas [16] toodud järeldustest, siis saab matemaatiliste mudelite põhjal saadud tulemusi hinnata usaldusväärseteks. Käesolevas töös uuritakse indutseeritud pingeid ainult PSCAD-mudeliga, mitte matemaatilise mudeliga.

Indutseeritud pingete uurimiseks käesolevas töös lülitatakse välja kuid jäetakse maandamata 110 kV õhuliin nr 4 (vt plokk 7, joonis 2.1) ja teostatakse käesoleva töö punktis 4.2 kirjeldatud katsed 1“, 3“ ja 5“ ehk kolme erineva iseloomuga lühise olukorras:

- Kolmefaasiline lühis 330 kV õhuliini faasijuhtmete ja maa vahel liini täieliku väljalülitamisega – katse 1“;
- Ühefaasiline lühis 330 kV õhuliini faasi A faasijuhtme ja maa vahel liini täieliku väljalülitamisega – katse 3“;
- Ühefaasiline lühis 330 kV õhuliini faasi A faasijuhtme ja maa vahel liini ühe faasi (lühisest haaratud) väljalülitamisega – katse 5“;

110 kV õhuliin nr 4 puhul on selle ühes otsas alajaam C ja teises otsas alajaam D. Alajaam C paikneb alajaamas A (mille lähistel lühised toimuvad)

Katsete tulemused on kirjeldatud allolevates tabelites (vt tabel 5.1, tabel 5.2 ja tabel 5.3) nii, et iga olulise ajahetke kohta on mõõdetud faasipinget kõigis kolmes faasis väljalülitatud 110 kV õhuliinil.

Katse 1“

Arvestama peab asjaoluga, et lisaks transpositsioonile 110 kV õhuliinil teostatakse ka transpositsioon 330 kV õhuliinil, mille käigus vahetavad äärmised faasijuhtmed omavahel kohad (C1→C3, vt joonis 5.10).

Tabel 5.1 Faasipinged 110 kV õhuliini mõlemas otsas katsel 1“

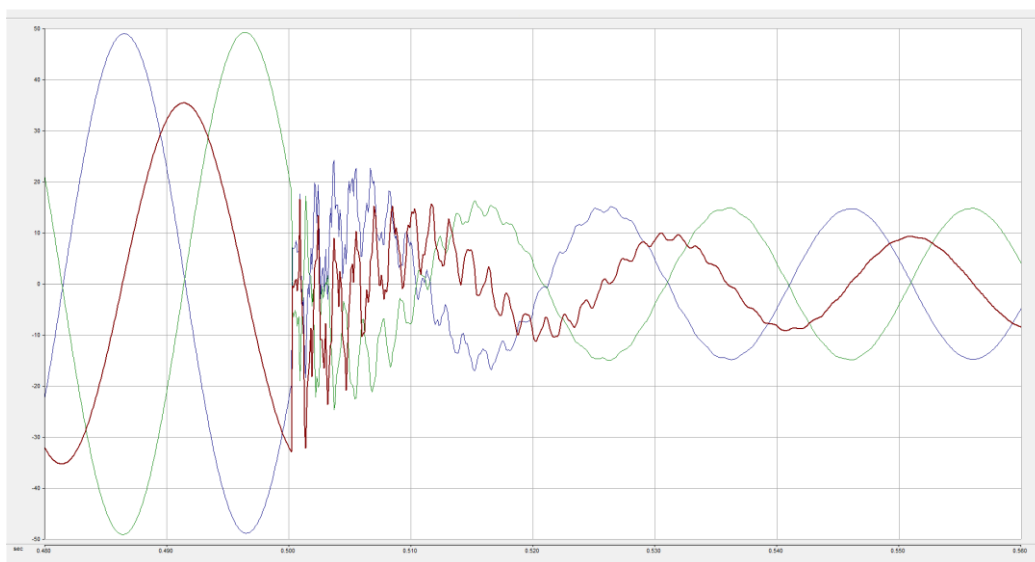
Alajaam C (Faas C on keskmine faas)							
Faasipinge	Normaalolukorras	t=0,5	t=0,7	t=0,9	t=enne sisselülitamist	t=1,3	t=1,5
Faas A	49,06	23,37	9,96	28,22	1,43	67,33	50,36
Faas B	48,87	-24,6	-17,1	24,81	-2,27	-64,24	50,16
Faas C	35,26	-30,92	-9,08	34,1	1,13	59,72	35,87
Alajaam D (Faas C on keskmine faas)							
Faas A	49,07	-33,07	-26,1	51,08	0	-61,5	-51,086
Faas B	35,14	-48,89	14,54	68,33	0	-62,3	35,48
Faas C	48,78	34,91	22,66	60,83	0	63,3	50,42

Kogu mudeliga teostatud simulatsiooni (kestusega = 2,0 s) käigus indutseeritud faasipinged on esitatud lisades L.8 ja L.9.

Tabel 5.1 kirjeldab katset 1“ tulemusi faasipingetena väljalülitatud 110 kV õhuliinil. Normaalolukorras osutub kõige väiksemaks indutseeritud pingeks faasipinge faasis C5 (vt

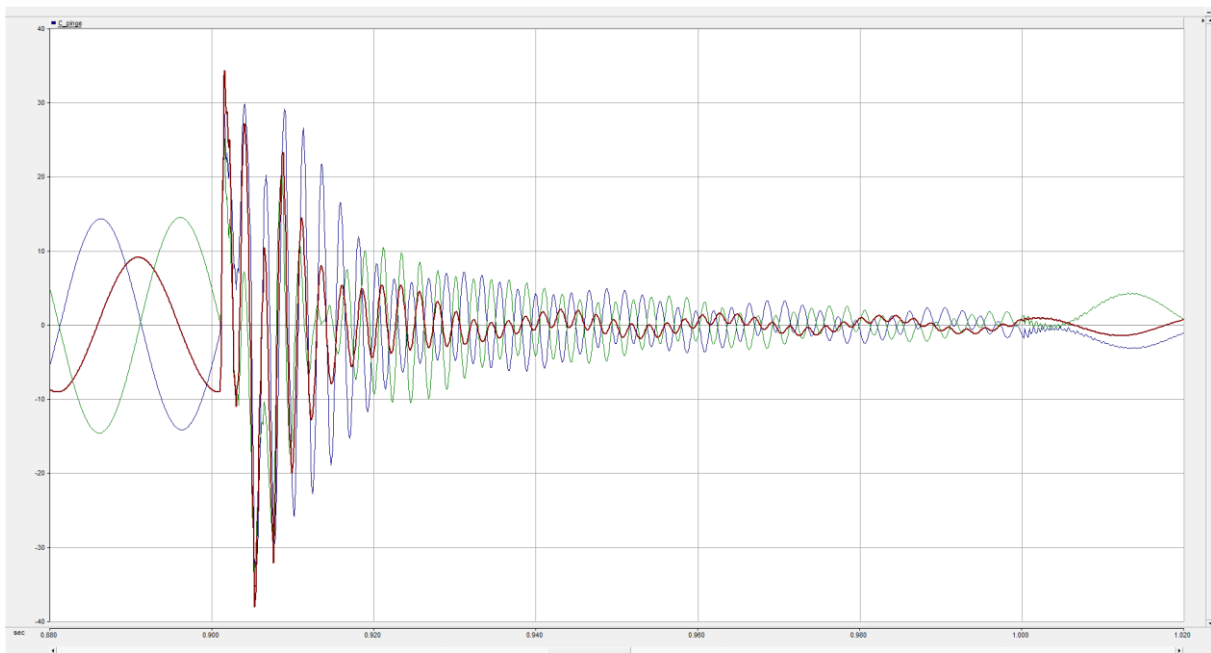
joonis 5.7) e keskmine faas. Selles faasis on faasipinge amplituudväärtus (*root mean square - RMS*) väiksem teiste faaside faasipingetest. Kuna 330 kV õhuliinil on kõik faasid võrselt koormatud, siis on selle indutseeritud pinge väiksem RMS-väärtus tingitud paiknemisest kõigist kolmest 330 kV faasijuhtmest ligikaudu võrdsel kaugusel (vt joonis 5.7).

Peale kolmefaasilise lühise tekkimist 330 kV õhuliinil alajaama A lähistel väheneb pinge 330 kV õhuliinis ja selles tingituna ka indutseeritud pinge 110 kV õhuliinis ligikaudu 2 korda.

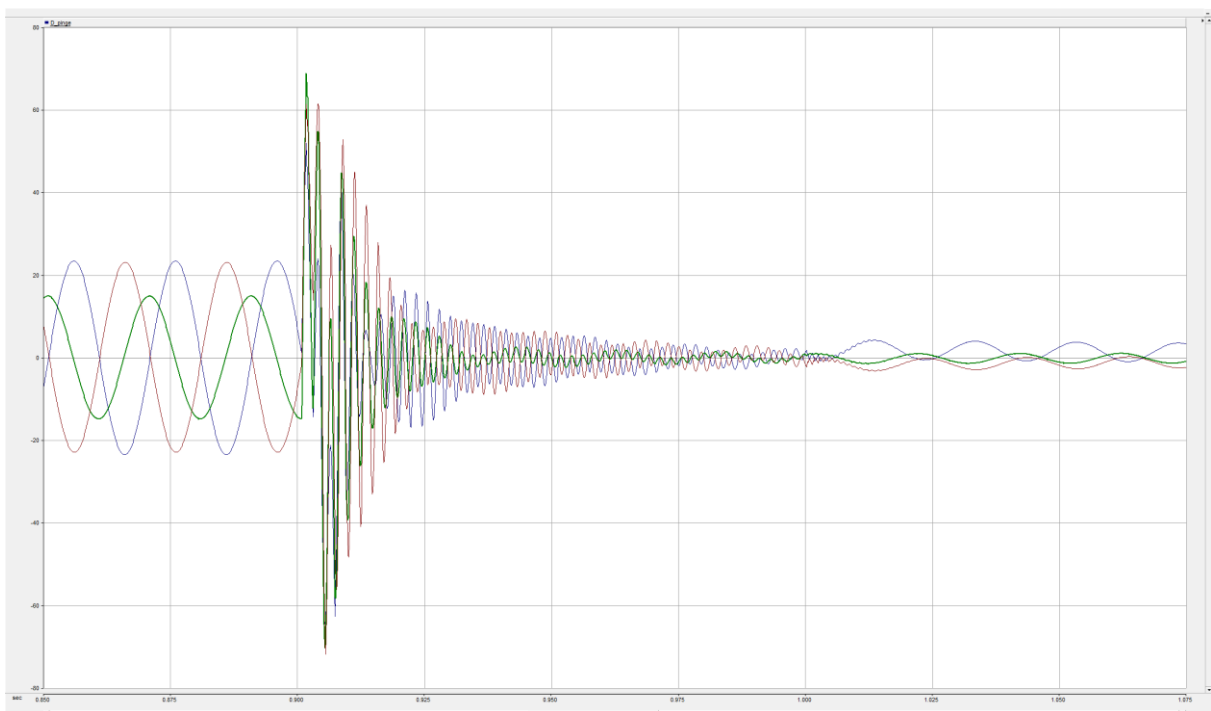


Joonis 5.12 110 kV õhuliini faasipinged alajaamas C, ajahetkel $t=0,5$ ehk lühise tekkimise ajal, katse 1“

Kõige suurem indutseeritud pinge hüpe tekib olukorras, kus 330 kV õhuliin lülitatakse täielikult välja, siis kasvavad indutseeritud faasipinged alajaamas C kuni 34,10 kV (vt joonis 5.13) ja lühisest kaugemas alajaamas D lausa 68,33 kV-ni (vt joonis 5.14).



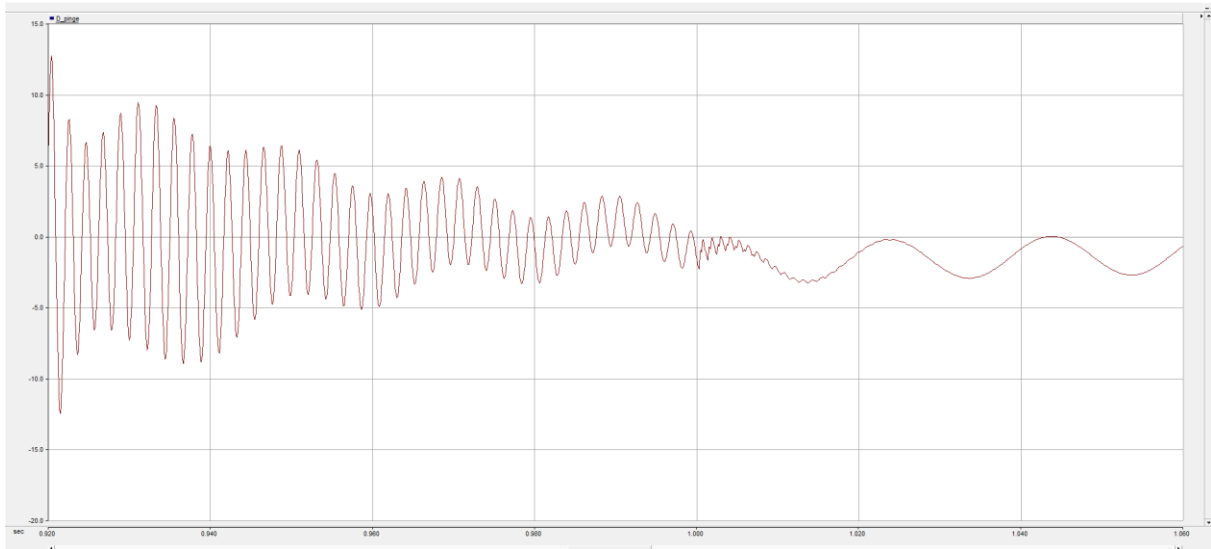
Joonis 5.13 110 kV õhuliini faasipinged alajaamas C, ajahetkel $t=0,9$ ehk 330 kV õhuliini täielikult väljalülitamisel, katse 1“



Joonis 5.14 110 kV õhuliini faasipinged alajaamas D, ajahetkel $t=0,9$ ehk 330 kV õhuliini täielikult väljalülitamisel, katse 1“

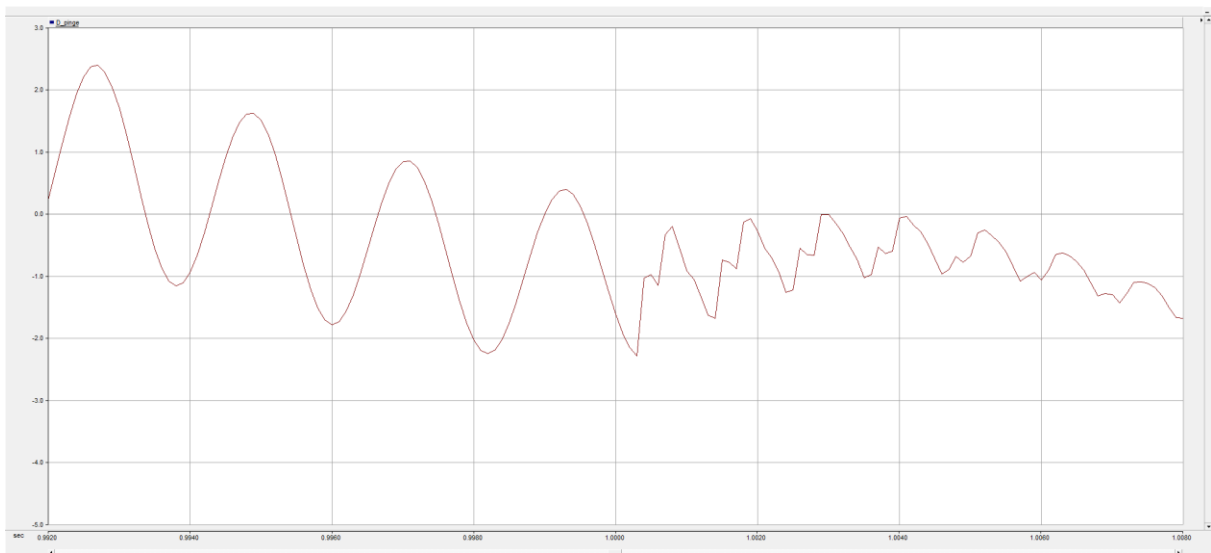
Kahe nimetatud alajaama vahekaugus on 43,6 km. Seega lühisest kaugemal on indutseeritud liigpinge suurem. See on seletatav asjaoluga, et mida kaugemal minna lühise kohast, seda suurem on pinge 330 kV õhuliinil ja seeläbi on ka indutseeritud pinge kõige suurem seal. Täiendavalt tuleb ära mainida ajahetk $t=1,0$ s ehk ajahetk, millal liini tekkinud lühis lakkab aga

liin on juba välja lülitatud (vt joonis 5.15). Selgelt on näha, et lühise toimetel tekib indutseeritud pingesse sisse võnkuv komponent sagedusega 400 Hz, mis taandub lühise lakkamisel ($t=1,0$ s). Samuti tekib lühise lõplikul väljalülitamisel hammaspinge (vt joonis 5.16). Hammaspinge tekib samal põhjusel mis on kirjeldatud p 1.4 ehk lühistatud väljalülitatud liinis tekivad peegelduvad lained, mis summeeruvad liini alguses (lühisest kõige kaugema lüliti juures).



Joonis 5.15 Faasi C5 pinge alajaamas D ajahetkel $t=1,0$ s, katse 1“

Nagu katse 1“ näitab, kandub peegelduvate pingelainete mõju ka indutseeritud pinge puhul väljalülitatud õhuliini. Teine tuntav pinge hüpe toimub indutseeritud pinge puhul olukorras, kus liin taaspingestatakse peale ATL voolupausi ajahetkel $t=1,3$ s: indutseeritud faasipinged saavutavad poolperioodiks liini algusele lähemal alajaamas D ligikaudu sama suured väärtused (-61,5; -62,3 ning 63,3 [kV]) kui juba 0,08 s möödudes taastuvad lühise-eelsed pinged. Samuti oli kõige suurem pinge tõus 330 kV õhuliinil olukorras, kui liin taaspingestatakse ajahetkel $t=1,3$ s (vt tabel 3.1).



Joonis 5.16 Hammaspinge lühise lakkamisel ajahetkel $t=1,0$ s, kate 1“

Katse 3“

Tabel 5.2 kirjeldab faasipingeid 110 kV õhuliinil alajaamas C ja D katse 3“ puhul. Selle katse puhul toimub ühefaasiline lühis alajaama A lähisel 330 kV õhuliini ahela faasijuhtmel C1 (vt joonis 5.7). Transpositsiooni tõttu on see alajaamade C ja D juures faas C3. Kogu mudeliga teostatud simulatsiooni (kestusega = 2,0 s) käigus indutseeritud faasipinged on esitatud lisades L.10 ja L.11.

Kui katse 1“ puhul olid lühisest haaratud kõik 330 kV õhuliini faasid, siis katsete 3“ ja 5“ puhul on lühisest haaratud vaid üks 330 kV faasijuhe alajaama A juures. Transpositsioonide tõttu selgitatakse järgmiselt faaside paiknemist alajaamade juures, võttes aluseks loogika, et 330 kV faaside tähistamine ei muutu (C1, C2 ja C3, vt joonis 5.7), kuid iga alajaama juures on 110 kV tähistus muutub vastavalt sellele, et mis 110 kV faasijuhe paikneb lõpumasti juures millise 330 kV faasijuhtme all.

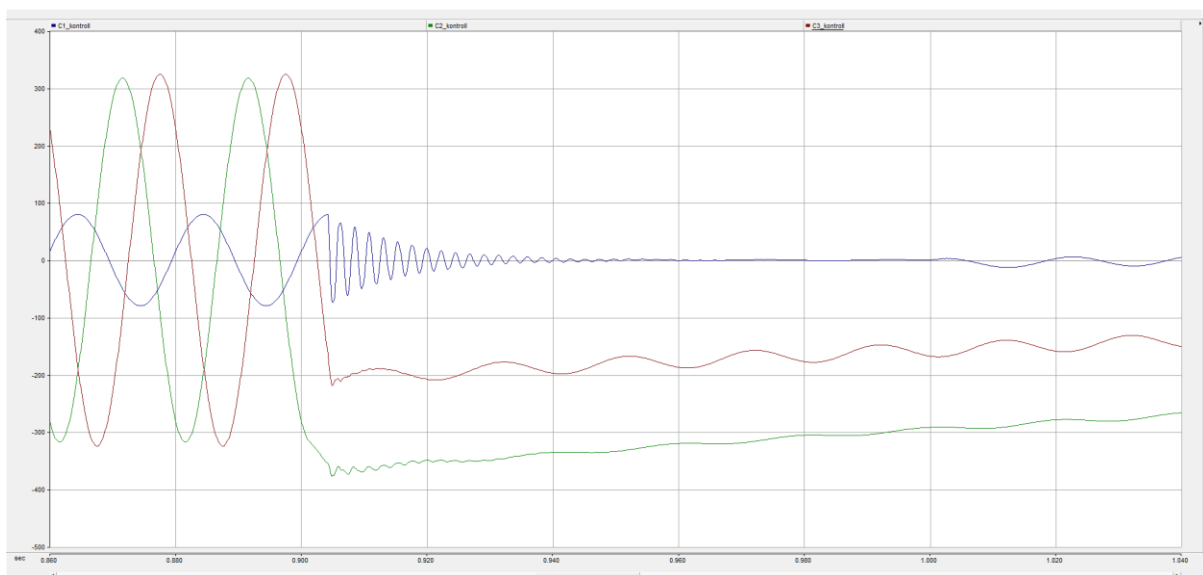
Faasijuhtmete paiknemine alajaama lõpumasti juures:

- Alajaam näide: ülemine-alumine, ülemine-alumine ja ülemine-alumine.
- Alajaam A: C1-C4, C2-C5 ja C3-C6 (vt joonis 5.9);
- Alajaam C: C3-C5, C2-C6 ja C1-C4 (vt joonis 5.10);
- Alajaam D: C3-C4, C2-C5 ja C1-C6 (vt joonis 5.11).

Tabel 5.2 kirjeldab faasivoolusid välja lülitatud 110 kV õhuliinil. Kuna lühis toimub 330 kV õhuliini faasis C1 (Joonis 5.7), siis on lühisele järgnevalt seal ka pinge kõige väiksem. Alajaamas D on näha, et faasid A ja C on omavahel vahetunud transpositsiooni tõttu.

Tabel 5.2 Faasipinged 110 kV õhuliini mõlemas otsas katsel 3“

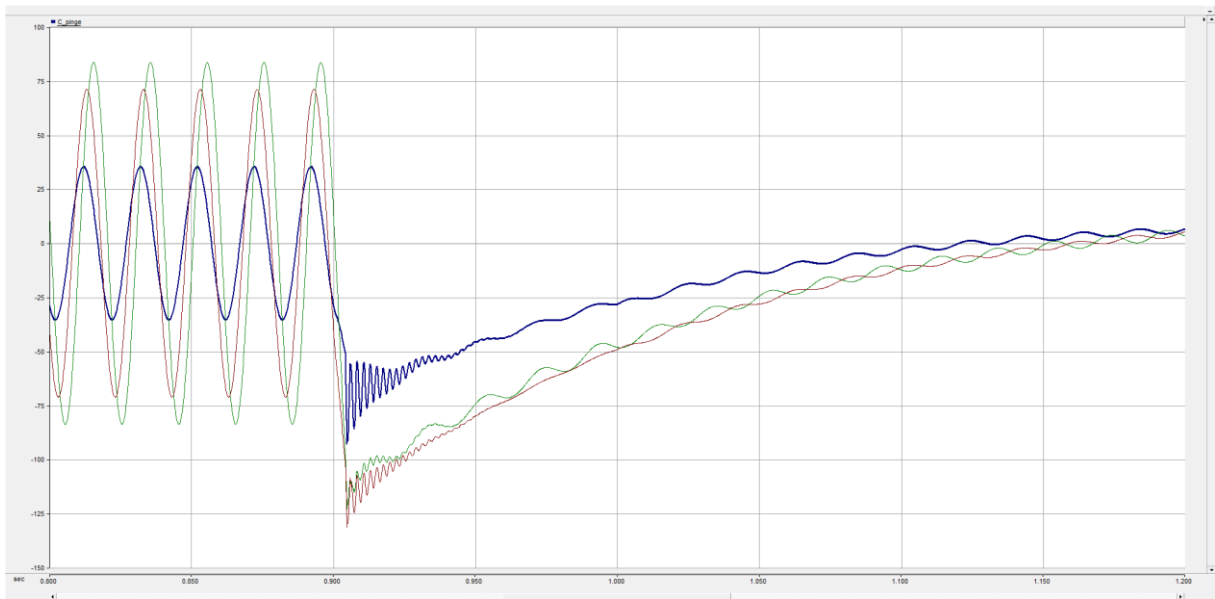
Alajaam C (lühisega faasijuhtmele kõige lähem faasijuhe 110 kV liinil on faas A)							
Faasipinge	Normaalolukorras	t=0,5	t=0,7	t=0,9	t=enne sisselülitamist	t=1,3	t=1,5
Faas A (C5)	48,78	29,64	38,38	-91,37	7,74	103,1	58,32
Faas B (C6)	-49,16	76,17	-101,04	-121,3	12,85	-24,25	34,94
Faas C (C4)	35,33	50,98	-75,27	-129,71	9,67	107,51	19,54
Alajaam D (lühisega faasijuhtmele kõige lähem faasijuhe 110 kV liinil on faas C)							
Faas A (C4)	49,072	-55,42	-80,05	-128,05	12,85	90,52	34,65
Faas B (C5)	35,23	49,48	-50,38	-140,34	9,68	104,14	52,53
Faas C (C6)	48,77	24,77	-3,27	-107,31	7,73	99,57	58,61



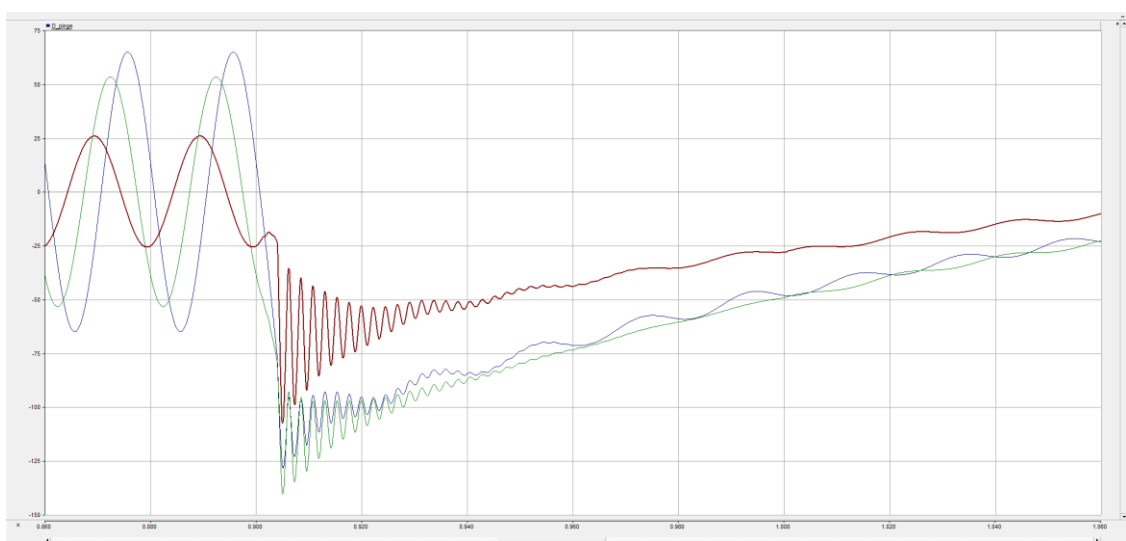
Joonis 5.17 330 kV õhuliini faasipinged alajaama C juures ajahetkel t=0,9 s, katse 3“

Ajahetkel $t=0,9$ s lülitatakse kogu liin välja, mille toimele pinge 330 kV liinis kasvavad lühisest mitte haaratud faasipingete amplituudväärtused kuni -381 kV, siis sellised suured liigpinged kutsuvad esile vastavad liigpinged ka 110 kV õhuliinil. Selle katse puhul huvipakkuv ajahetk

$t=1,0$ s ehk aeg, millal lühis lakkab olemast. Näha on vahelduvpinge tekkimine ajahetkel $t=1,0$ s, kui lühis lakkab olemast (vt joonis 5.18). Huvipakkuv on asjaolu, et 110 kV õhuliini keskmises faasis (vt punane joon, joonis 5.18) ei teki lühise täielikul väljalülitamisel vahelduvat indutseeritud pinget enne lühise kadumist (ajavahemik 0,9 s – 1,0 s). Vahelduvpinge indutseeritakse 110 kV õhuliini äärmistesse faasijuhtmetesse juba lühise ajal, sh ka sellesse 110 kV faasijuhtmesse, mis asub 330 kV lühisest haaratud faasijuhtmele kõige lähemal. Sama fenomeni on võimalik tuvastada ka alajaamas D (vt roheline joon, joonis 5.19).



Joonis 5.18 Faasipinged alajaamas D lühise täielikul väljalülitamisel ajahetkel $t=0,9$ s ja lühise lakkamine ajahetkel $t=1,0$ s, katse 3“



Joonis 5.19 Faasipinged alajaamas D lühise täielikul väljalülitamisel ajahetkel $t=0,9$ s ja lühise lakkamine ajahetkel $t=1,0$ s, katse 3“

Nii alajaamas C kui ka D tekib kõige suurem indutseeritud pinge ajahetkel, millal kogu liin välja lülitatakse $t=0,9$ s. Siis tõusevad indutseeritud pinged kuni 140 kV juurde, mis on ligikaudu 1,5 korda suurem kui faasipinge amplituudväärtus 110 kV õhuliinil normaalolukorras ($U_{fRMS} = \frac{110 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 89,8$ [kV]). Teine kõrgete pingetega olukord tekib, kui 330 kV taaspingestatakse ajahetkel $t=1,3$ s.

Katse 5“

Katse 5“ puhul lülitati välja vaid lühisest haaratud faas ühefaasilise maalühise korral 330 kV õhuliinil. Tabel 5.3 kirjeldab faasipingeid 110 kV õhuliinil alajaamas C ja D katse 5“ puhul.

Kogu mudeliga teostatud simulatsiooni (kestusega = 2,0 s) käigus indutseeritud faasipinged on esitatud lisades L.13 ja L.14. Arvestama peab asjaoluga, et lisaks transpositsioonile 110 kV õhuliinil teostatakse ka transpositsioon 330 kV õhuliinil, mille käigus vahetavad äärmised faasijuhtmed omavahel kohad (C1→C3).

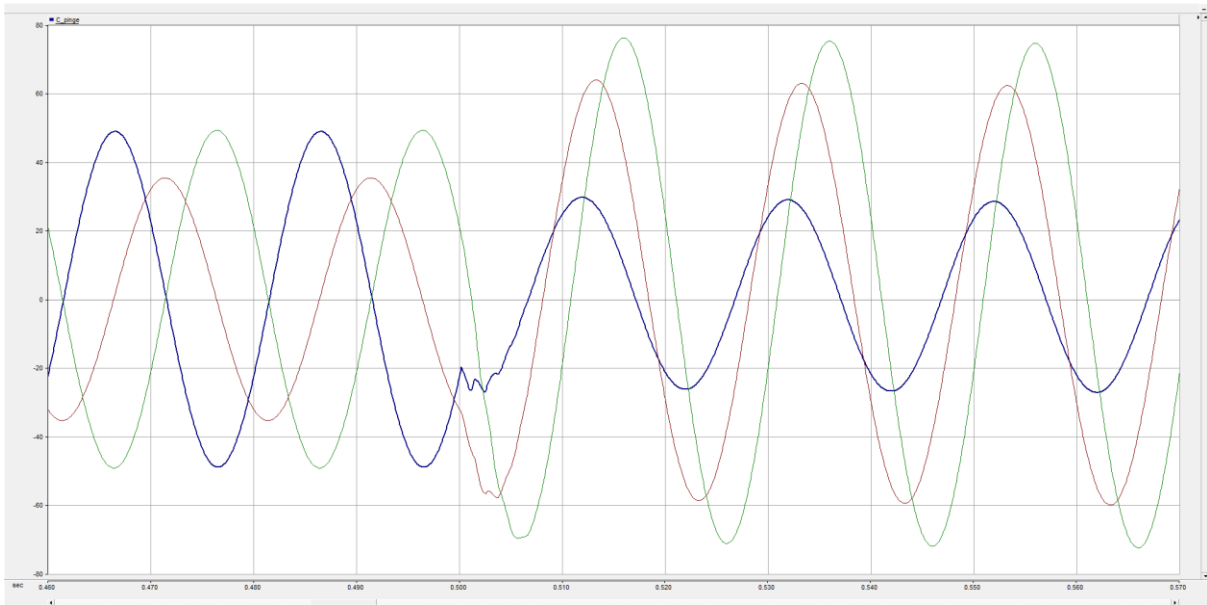
Faasijuhtmete paiknemine alajaama lõpumasti juures on täpselt sama nagu katsete 1“ ja 3“ puhul (vt joonis 5.9, joonis 5.10 ja joonis 5.11).

Tabel 5.3 Faasipinged 110 kV õhuliini mõlemas otsas katsel 5“

Alajaam C (lühisega faasijuhtmele kõige lähem faasijuhe 110 kV liinil on faas A)							
Faasipinge	Normaalolukorras	t=0,5	t=0,7	t=0,9	t=enne sisselülitamist	t=1,3	t=1,5
Faas A (C5)	48,92	29,64	-32,18	-54,33	48,3	55,27	48,35
Faas B (C6)	48,91	-69,52	-91,02	-71,23	66,64	54,58	-50,7
Faas C (C4)	35,11	-46,5	-74,01	-69,62	41,46	30,78	34,8
Alajaam D (lühisega faasijuhtmele kõige lähem faasijuhe 110 kV liinil on faas C)							
Faas A (C4)	49,01	61,01	-76	-75,42	66,35	50,96	6,69
Faas B (C5)	35,27	49,5	-51,29	-72,48	66,67	-41,6	-40,44
Faas C (C6)	48,78	24,66	-5,8	-65,47	49,75	51,18	-21,32

Lisa L.12 kirjeldab faasipingeid 330 kV õhuliinil alajaama A juures. Tumedama joonega on kujutatud lühisest haaratud faasi faasipinge pingekõver. Nagu näha, siis lühise tekkimisel langeb selle faasi faasipinge nulli ning selle kompenseerimiseks tõusevad faasipinged kahes teises faasis. Selgelt on eristatavad nende tervete faaside faasipingete muutumised ajahetkel

$t=0,7$ s ja $t=0,9$ s ehk vastavalt ajahetked, millal lülituvad lühisele kõige lähem võimsuslülitid alajaamas A ja kõige kaugem võimsuslülitid alajaamas E.



Joonis 5.20 110 kV õhuliini faasipinged alajaamas C, ajahetkel $t=0,5$ s, ehk lühise tekkimise ajal, katse 5“

Joonis 5.20 kirjeldab lühise tekkimise hetke ning sellest järeldeb, et lühise tekkimisel langeb faasipinge alajaamas C kõige enam lühisest haaratud faasijuhtmele (C3) lähedal asuvas 110 kV faasijuhtmes (C5). Järgnevad C4 ja C6 faasipingete suurustega. Kuna C3 puhul on tegu äärmise faasiga, siis on loogiline, et kõige enam mõjutab see alajaamas C faasijuhet C4, siis C6 ja C5.

Võrreldes katsete 1“ ja 3“ on katse 5“ puhul tekkivad indutseeritud pinged ligikaudu sama suured kui kolmefaasilisel lühisel (1“). Kõige enam tekivad kõrged indutseeritud pinged olukorras, kus ühefaasiline lühise korral lülitatakse välja kogu 330 kV õhuliin – katse 3. Sama võis täheldada ka katse 3“ puhul liigpingete puhul alajaamas E ehk lühisest kõige kaugemas alajaamas. Siis tõusid 330 kV võimsuslülitid kontaktide vahel pinged ohtlikult kõrgele lühisest mitte haaratud faaside puhul.

6 Kokkuvõte

Käesoleva töö esimeses peatükis anti ülevaade lühistest ning nende lülitamisel tekkinud liigpingetest, mis võivad kujutada ohtu elektriseadmetele. Elektrisüsteemi seadmete kaitsmiseks kasutatakse liigpingepiirikuid, millest käesoleva töö esimese punktis anti ülevaade metalloksiid liigpingepiiriku näitel. Tegu on seadmega, mis kindla pingetaseme juures muutub juhtivaks ning sellisel juhul suunab liigpingelainega tekkiva liigse energia maasse. Metalloksiid liigpingepiirikute puhul võib arvestada, et liigpingelaine peab olema vähemalt poolteist korda suurem kui valitud liigpingepiiriku kestevalituspinge.

Töö teises ja kolmandas osas kasutati Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis loodud PSCAD-mudelit kahekorruselise 330 kV õhuliinis esinevate liigpingete ja nende piiramisvõimaluste uurimiseks. Olulist tähelepanu pöörati lühise korral esinevatele liigpingetele. Vastavalt käesoleva töö jaoks koostatud katsete kavale teostati erineva iseloomuga lühiskatseid: kolmefaasiliste lühiste väljalülitamine, ühefaasiliste kolmefaasiline väljalülitamine ning ühefaasiline väljalülitamine. Teostatud katsed näitasid, et kõige suuremad liigpinged tekkisid just selles alajaamas, mis asus lühisest kõige kaugemal. Lühisest kõige kaugemas alajaamas lülitati lühises olev 330 kV õhuliin lõplikult välja. Saadud tulemuste alusel valiti töö neljandas osas esmalt liigpingepiirikute suurused.

Töö neljandas osas valiti liigpingepiirikud kahte 330 kV alajaama. Mudelis kasutati metalloksiid liigpingepiirikut, mille volt-amper karakteristik oli sellise kujuga, et vastavalt meetodikale valitud liigpingepiirikud ei avaldanud sellist mõju mida esialgu töö eesmärkide seadmisel oodati. Katsete käigus leitud liigpingete kordsused jäid liigpingepiiriku nimipinge ja lülitusliigpingete kaitsenivoo vahemikku ja olid oluliselt madalamad liigpingepiiriku lülitusliigpingete kaitsenivoost. Seetõttu ei osutunud liigpingepiirikud piisavalt efektiivseks, mistõttu jäi liigpinge vähenemine väiksemaks kui 22 kV.

Töö viiendas osas vaadeldi Rumeenias 2006. aastal läbiviidud katset, mille käigus mõõdeti indutseeritud pingeid kaheaheelisel 220/220 kV õhuliinil olukorras, kui üks 220 kV ahel oli välja lülitatud. Selle katse aruandes [16] anti samuti ülevaade indutseeritud pingete teooriast. Nimetatud kirjandusallikas käsitletud teooria paikapidavust kinnitasid katsetulemused. Seejärel teostati katsed PSCAD-mudeliga kahekorruselisel 330/110 kV õhuliinil samadel alustel nagu lühiskatsed eelnevates käesoleva töö punktides. Kolmefaasilise lühise korral avaldasid 330 kV liigpinged mõju kõige vähem 110 kV ahela keskmisele faasile. Sarnaselt 330 kV õhuliinil teostatud katsetele toimusid ka 110 kV õhuliinil pingete muutused sarnaselt 330 kV õhuliinil

tekinud liigpingete muutumisele. Kõikide katsete puhul võis täheldada pinge kasvu lühisest kaugemal asetsevas alajaamas, sest lühisele lähedamal asuvates alajaamades oli lühise tõttu pinged madalamad. Lühisest kaugemal paiknevates alajaamades tekkisid suured liigpinged liini taaslülitamisel, siis kasvasid liigpinged. Samuti oli võimalik eristada peegelduvate pingelainete tõttu tekkivat hammaspinget lühises kaugemal asetseva alajaama võimsuslülitil klemmidel. Kõige suuremad indutseeritud pinged ulatusid ligikaudu 100 kV-ni olukorras, kui ühefaasilise lühise korral lülitati välja kogu 330 kV liin. Lühistest mitte-haaratud faasidesse salvestunud energia ei laadunud lühise käigus maha ning seda suuremaid energiahulkasid pidid võimsuslülitid lülitama. 330 kV õhuliini kolmefaasilise väljalülitamisel ja ühefaasilise lühise ühefaasilisel väljalülitamisel olid 110 kV indutseeritud liigpingete kordusused ligikaudselt võrdsed, ulatudes kuni 75 kV-ni.

Hinnates töö käigus teostatud katsete tulemusi, siis kuni 100 kV ulatuvad indutseeritud pinged 110 kV õhuliinil on piisavalt suured, et elektrisüsteemi kaitsmisel lühiste eest peab lisaks 330 kV süsteemile kaaluma ka liigpingete piiramist madalamatel pingetel. Sarnast analoogi võib kasutada ka keskpinge-õhuliinide puhul, kus lõppkasutajate poolt kasutatav 0,4 kV pingeastmel võivad 6 kV õhuliini poolt indutseeritud pinged lühise olukorras kujutada ohtu nii varale kui ka tervisele. Keskpingel on võrreldes kõrgepingega küll väiksemad pinged kuid see eest on seal ka väiksemad õhkvahemikud ning lõpptarbija seadmete lähedus.

Töö eesmärkidena püstitatud eesmärgid said kõik täidetud.

1. Lühised mõjutavad lülitusliigpingeid olulisel määral, suurendades võimsuslülitil poolt lülitatava pinge suurust ning lülitatavat energiahulka.
2. Liigpingete vähendamiseks saab kasutada liigpingepiirikeid, kuid nende parameetrite valimisel peab kasutama võimalikult täpseid algandmeid, mille alusel saab määrata liigpingepiiriku parameetrid.
3. Lühise olukorras võib kahekorruselise õhuliini 330 kV ahelal võib indutseerida 110 kV õhuliini väljalülitatud ahelasse kuni 100 kV-ni ulatuvaid pingeid. Indutseeritud pinged võivad olla tipuväärtustelt lähedal ahela nimipingele. Seega võib järeldada, et pingestatud 110 kV ahela puhul võivad 330 kV õhuliinis tekkivad lülitusliigpinged kujutada ohtu ka 110 kV võrgus paiknevate seadmete isolatsioonile.

Edasistes uurimustöodes võib täpsemalt uurida järgmisi uurimissuundasid:

- Liigpingepiirikute kasutamise täiendav uurimine arvestades konkreetseid liigpingepiirikute karakteristikuid;
- Kompenseerivate reaktorite mõju uurimine lühiste olukorras;
- Kahekorruselise õhuliini korrustevaheliste lühiste uurimine.

7 Kasutatud kirjandus

- [1] Ü. Treufeldt, Lühised elektrisüsteemides, Tallinn: Infotrükk, 2002.
- [2] Ü. Treufeldt ja R. Oidram, Kõrgpingeseadmed, Loengukonspekt aines AEK0020, Tallinn, 2014.
- [3] A. Janssen, D. Makareinis and C.-E. Sölver, “International Surveys on Circuit-Breaker Reliability Data for Substation and System Studies,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 2, no. 2, 2014.
- [4] U. Salumäe ja Ü. Treufeldt, „Lülituspinged õhuliinides,“ Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika Instituut, Tallinn, 2017.
- [5] Elering AS, Varustuskindluse aruanne 2017, Tallinn, 2017.
- [6] Ü. Treufeldt, Kõrgpingetehnika, loengukonspekt aines AEK3011, Tallinn, 2010.
- [7] Л. В. П. Ю. Базуткин В.В., Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах., 1989: Энергоатомиздат.
- [8] E. Tiigimägi, Elektrivõrgud, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika Instituut, 1997.
- [9] Eesti Standardikeskus, Standard EVS-EN 60099-4:2014 Liigpingepiirid. Osa 4: Sädamiketa metalloksiid-liigpingepiirid vahelduvvoolusüsteemidele, Eesti standardikeskus, 2014.
- [10] V. Hinrichsen, Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems, Fundamentals, Berlin: Siemens AG, 2011.
- [11] PSCAD, „PSCAD User's Guide v4.6,“ 15 Juuni 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://hvdc.ca/webhelp/ol-help.htm>. [Kasutatud 8 Aprill 2018].
- [12] M. Meldorf, K. Möller, P. Raesar ja E. Tiigimägi, Elektroenergeetika põhimõisted, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika instituut, 1995.

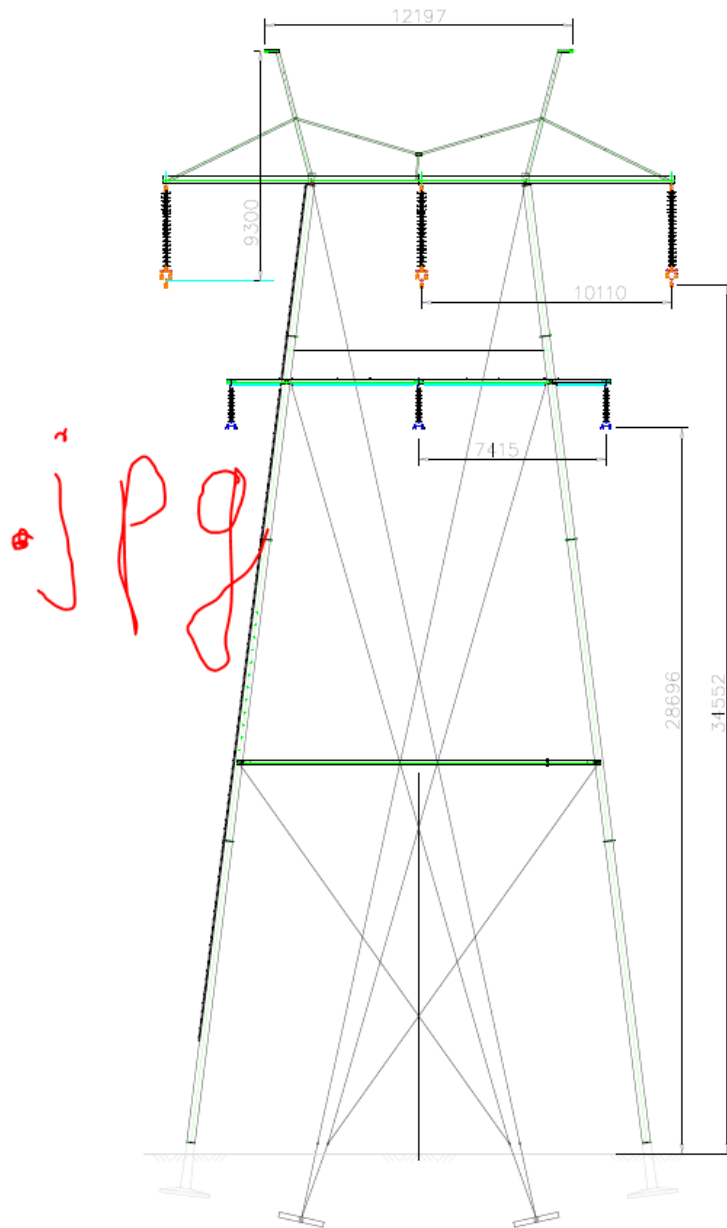
- [13] M. Meldorf ja T. Tikk, Elektrivõrgu operatiivjuhtimissüsteem, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2001.
- [14] Manitoba HVDC Research Centre, *PSCAD On-Line Help System*, Winnipeg, 2011.
- [15] L. Neumaan ja P. Kalantrov, *Elektrotehnika teoreetilised alused - III*, Tallinn: Valgus, 1969.
- [16] F. D. Surianu, „Determination of the Induced Voltages by 220 kV Electric Overhead Power Lines Working in Parallel and Narrow Routes. Measurements on the Ground and Mathematical Model,“ *WSEAS Transactions on Power Systems*, kd. 4, nr 8, p. 11, 2009.

8 Lisad

- L.1 - Kahekorruselise 330/110 kV kandemasti S2G joonis
- L.2 - Katse 1: 330 kV õhuliini faaside voolud alajaamas A enne liigpingepiirikute paigaldamist
- L.3 - Katse 1: 330 kV õhuliini faaside voolud alajaamas E enne liigpingepiirikute paigaldamist
- L.4 - Katse 3: 330 kV õhuliini faaside voolud alajaamas A enne liigpingepiirikute paigaldamist
- L.5 - Katse 3: 330 kV õhuliini faaside voolud alajaamas E enne liigpingepiirikute paigaldamist
- L.6 - Katse 5: 330 kV õhuliini faaside voolud alajaamas A enne liigpingepiirikute paigaldamist
- L.7 - Katse 5: 330 kV õhuliini faaside voolud alajaamas E enne liigpingepiirikute paigaldamist
- L.8 - Katse 1“: Väljalülitatud 110 kV õhuliini faasipinged alajaamas C
- L.9 - Katse 1“: Väljalülitatud 110 kV õhuliini faasipinged alajaamas D
- L.10 - Katse 3“:Väljalülitatud 110 kV õhuliini faasipinged alajaamas C
- L.11 - Katse 3“:Väljalülitatud 110 kV õhuliini faasipinged alajaamas D
- L.12 - Katse 5“: 330 kV õhuliini faasipinged alajaamas A
- L.13 - Katse 5“:Väljalülitatud 110 kV õhuliini faasipinged alajaamas C
- L.14 - Katse 5“:Väljalülitatud 110 kV õhuliini faasipinged alajaamas D

L.1

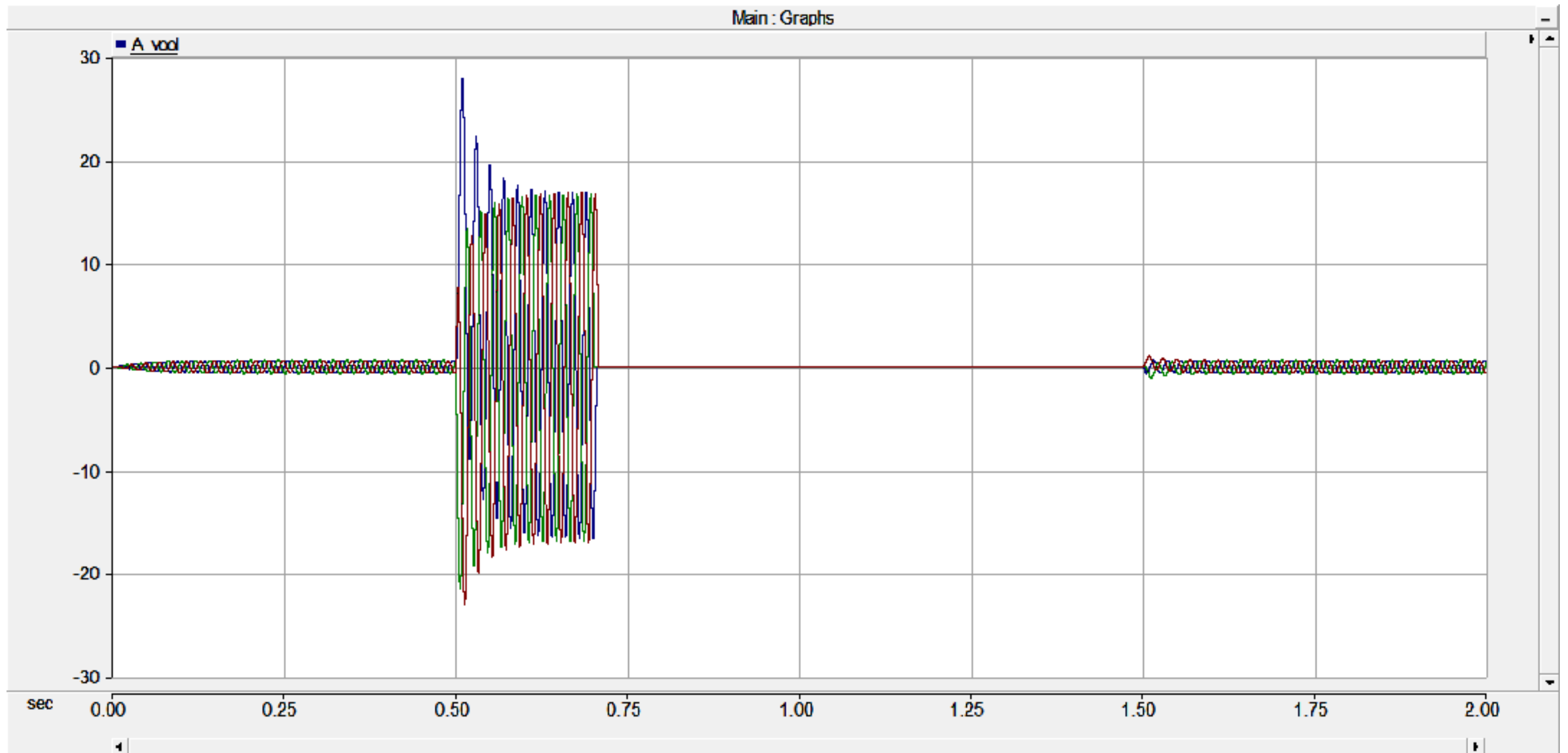
Kahekorruselise 330/110 kV kandemasti S2G joonis



		Projektantsuun	
Ühik		Korraldaja	
Liigpingete uurimine 330 kV liini lühiste korral PSCAD mudeli abil			
Juurte viis	Kandemast S2G	Kandemast	Lk 1
		Ühik	Lk 1
1:200	A2		

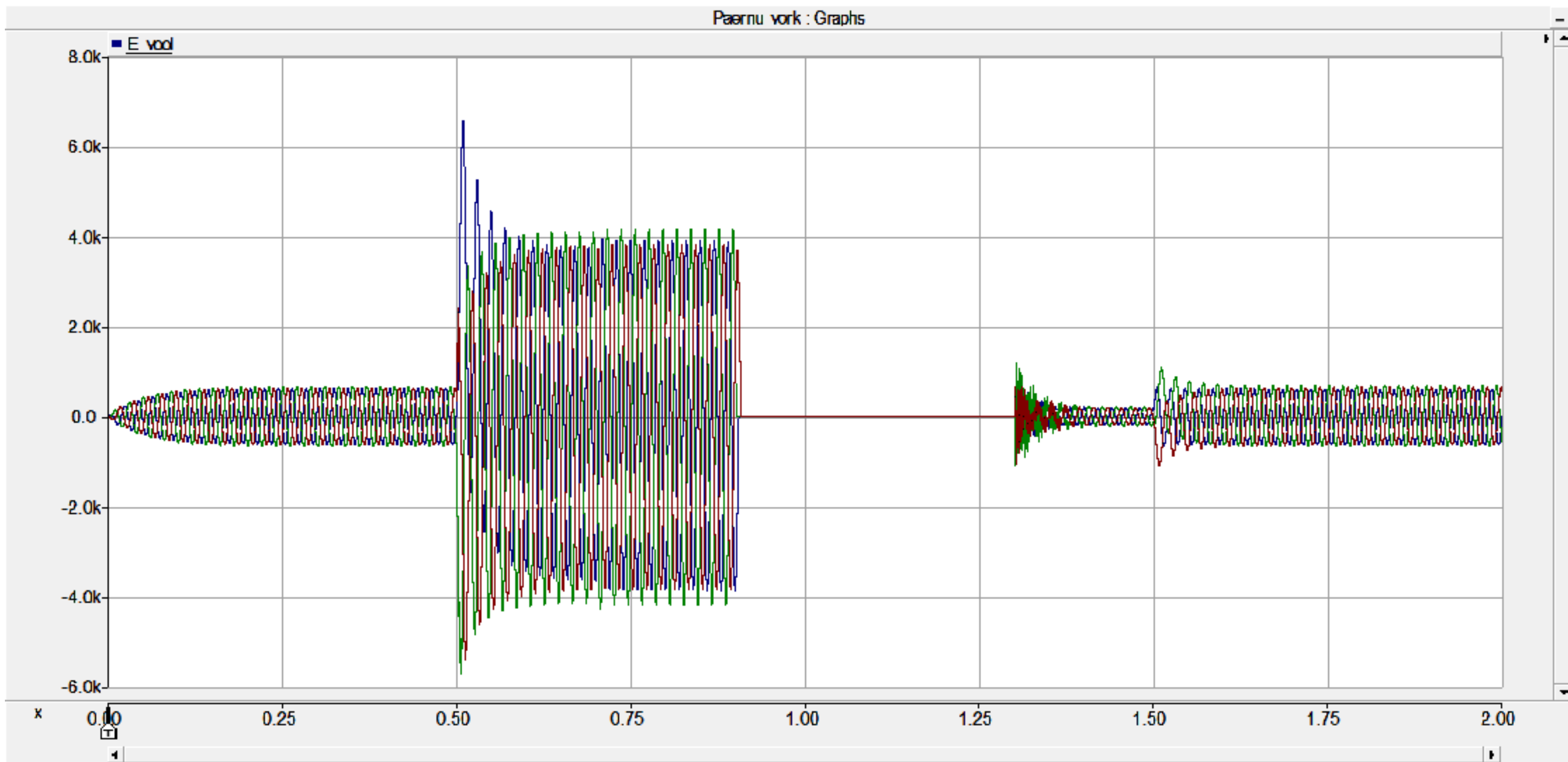
L.2

Katse 1: 330 kV õhuliini faaside voolud alajaamas A enne liigpingepiirikute paigaldamist



L.3

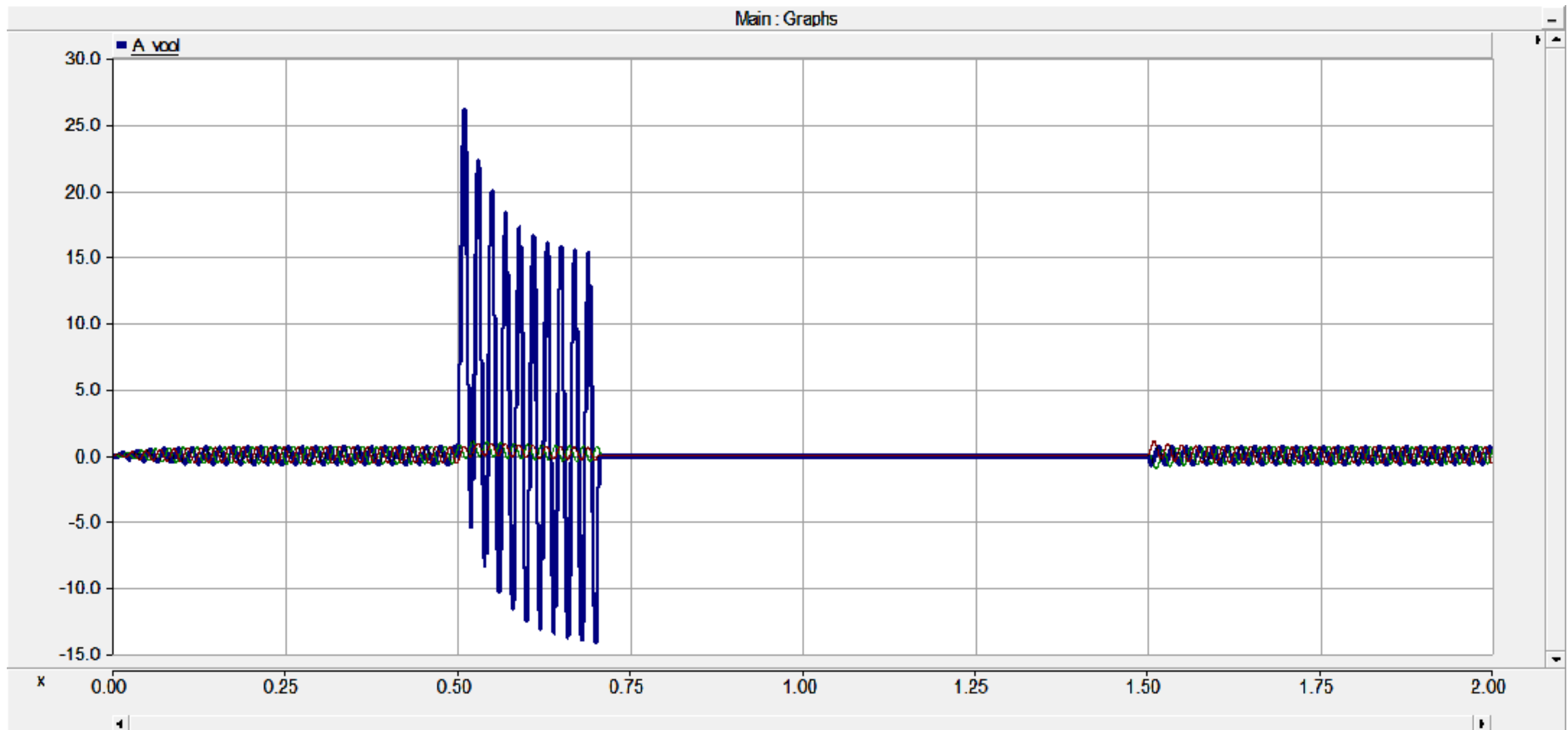
Katse 1: 330 kV õhuliini faaside voolud alajaamas E enne liigpingepiirikute paigaldamist



L.4

Katse 3: 330 kV õhuliini faaside voolud alajaamas A enne liigpingepiirikute paigaldamist

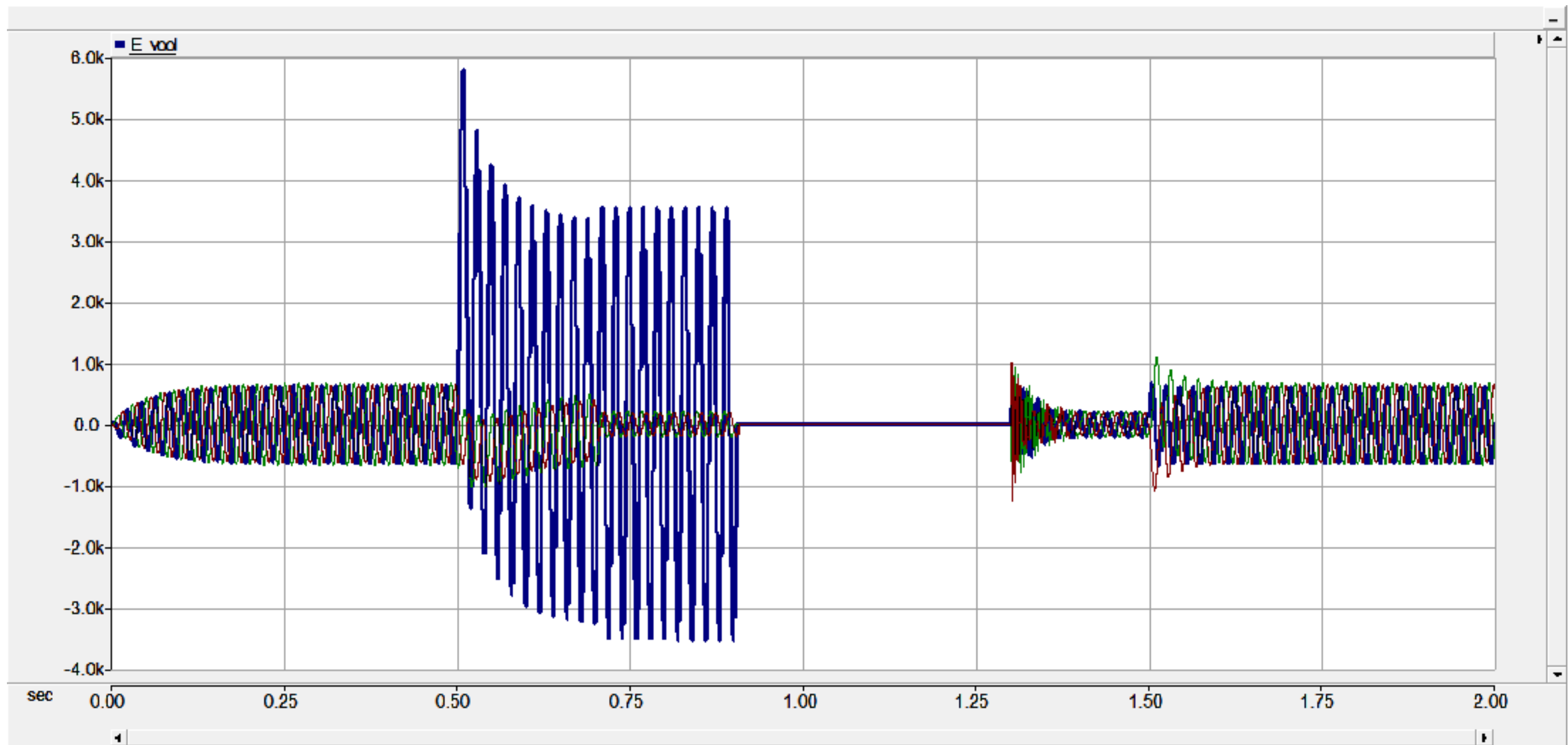
(Jämeda joonega on 330 kV õhuliini lühisest haaratud faasijuhtmele kõige lähedamal olev 110 kV faasijuhtme faasipinge)



L.5

Katse 3: 330 kV õhuliini faaside voolud alajaamas E enne liigpingepiirikute paigaldamist

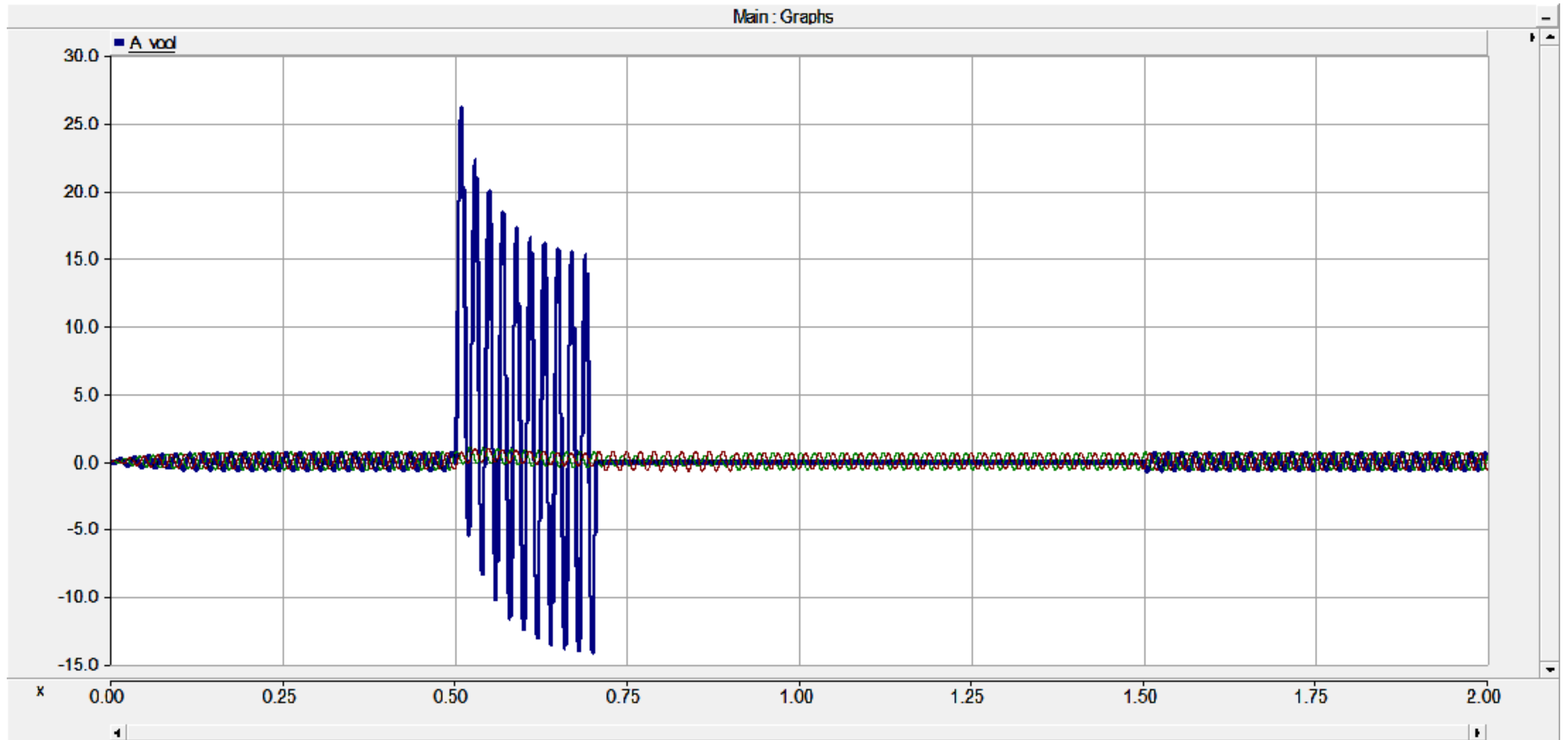
(Jämeda joonega on 330 kV õhuliini lühisest haaratud faasi vool)



L.6

Katse 5: 330 kV õhuliini faaside voolud alajaamas A enne liigpingepiirikute paigaldamist

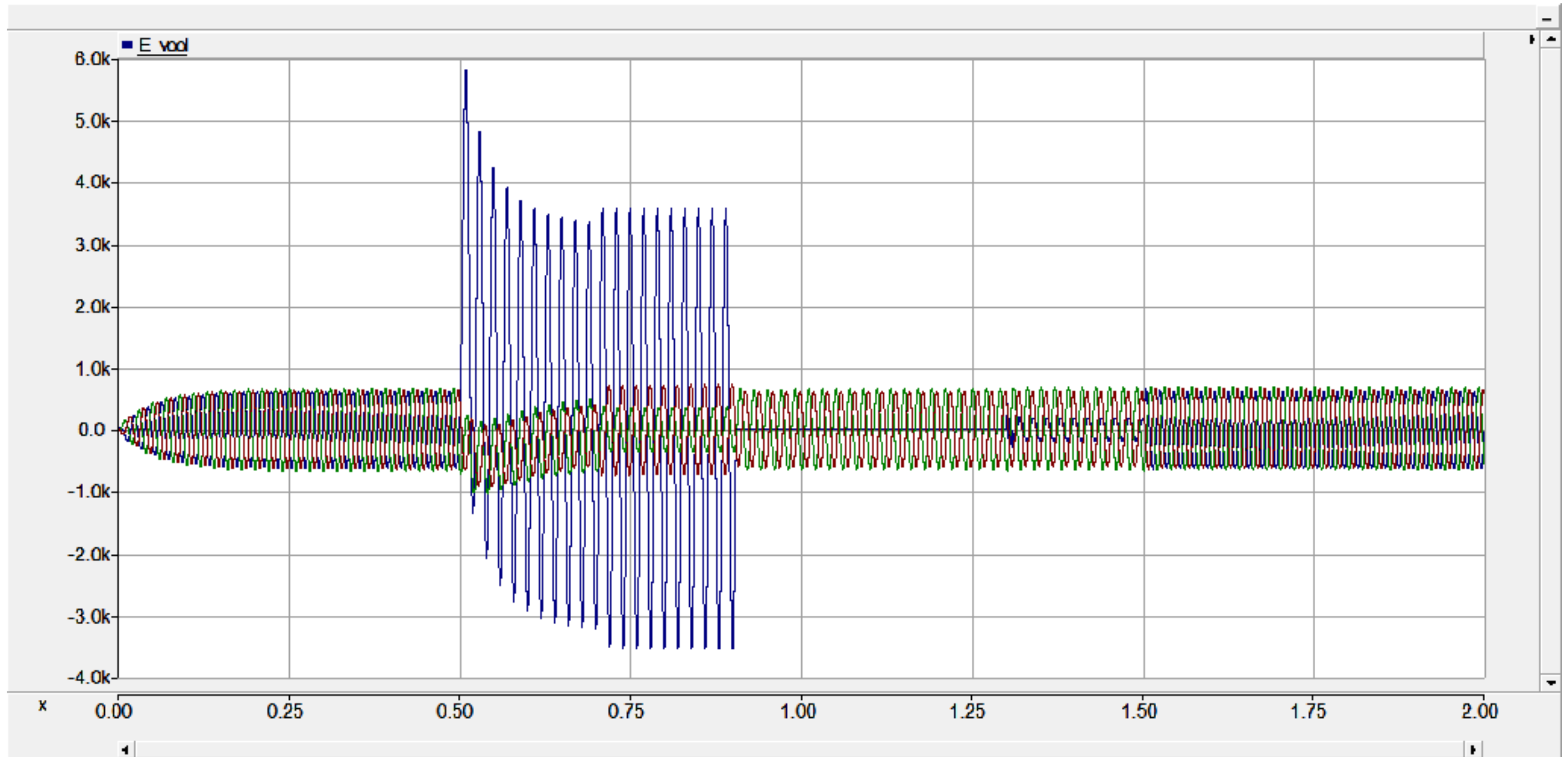
(Jämeda joonega on 330 kV õhuliini lühisest haaratud faasi vool)



L.7

Katse 5: 330 kV õhuliini faaside voolud alajaamas E enne liigpingepiirikute paigaldamist

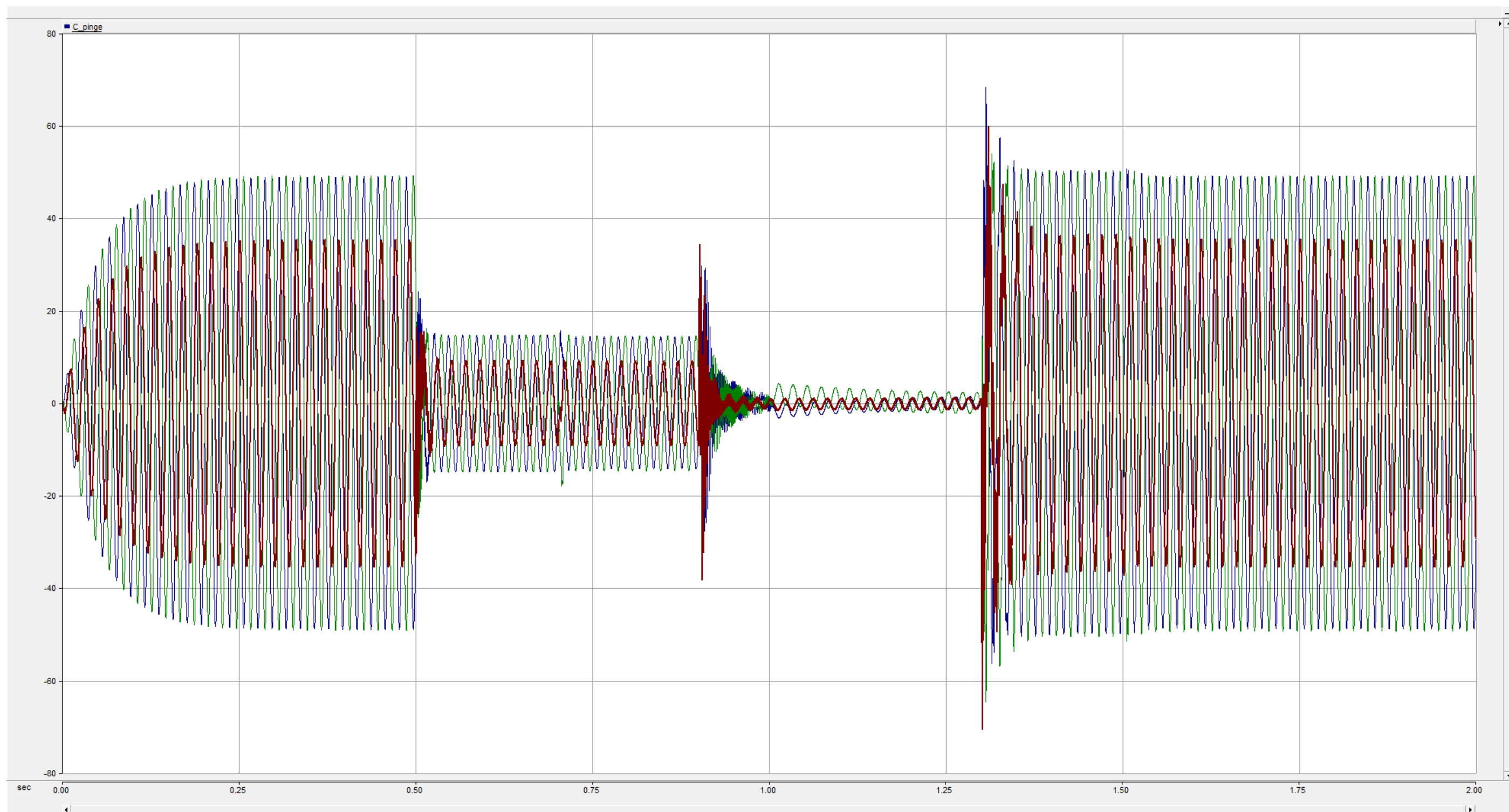
(Jämeda joonega on 330 kV õhuliini lühisest haaratud faasi vool)



L.8

Katse 1^o: Väljalülitatud 110 kV õhuliini faasipinged alajaamas C

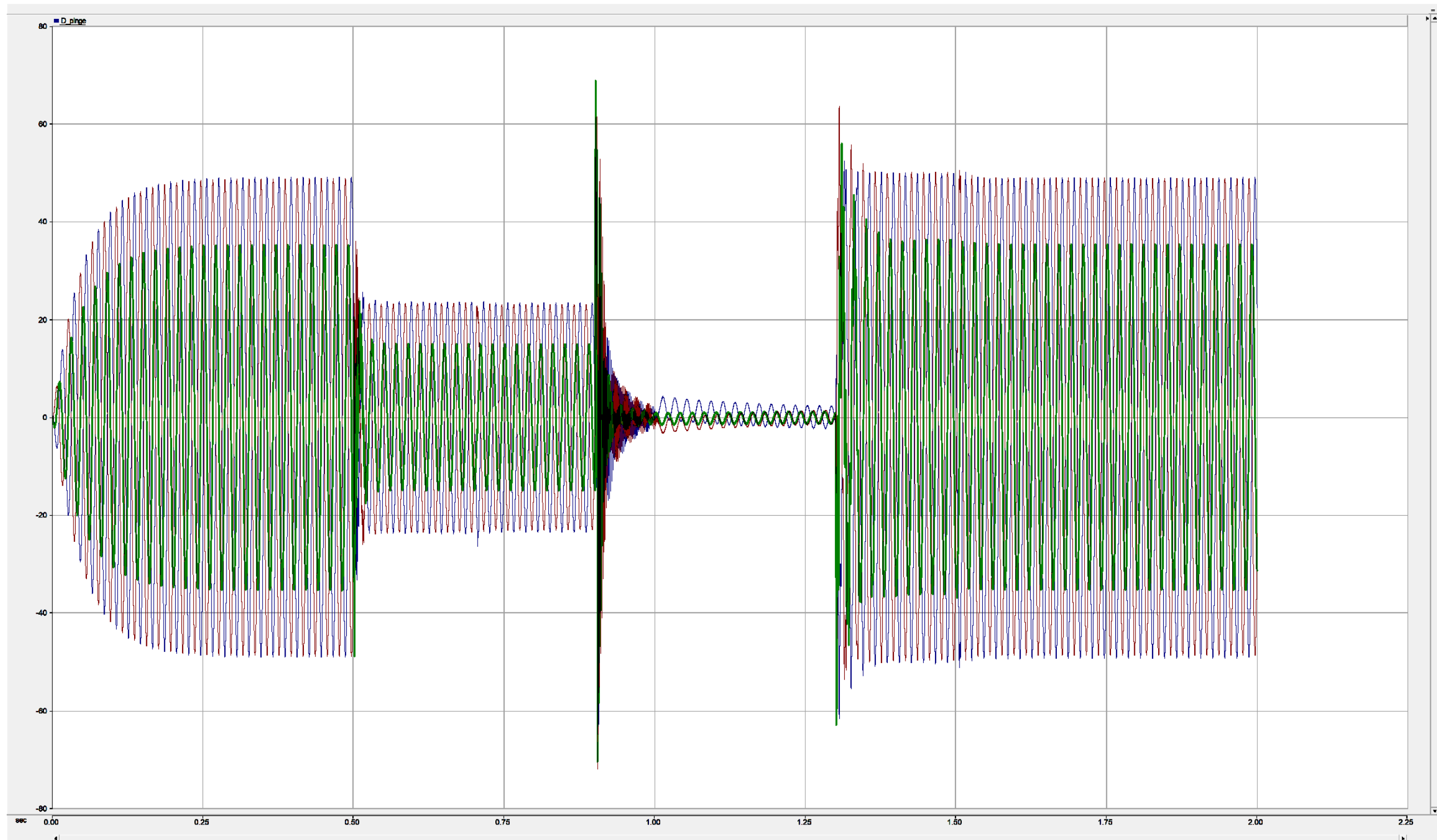
(Jämeda joonega on 330 kV õhuliini lühisest haaratud faasile kõige lähema 110 kV faasijuhtme pinge)



L.9

Katse 1st: Väljalülitatud 110 kV õhuliini faasipinged alajaamas D

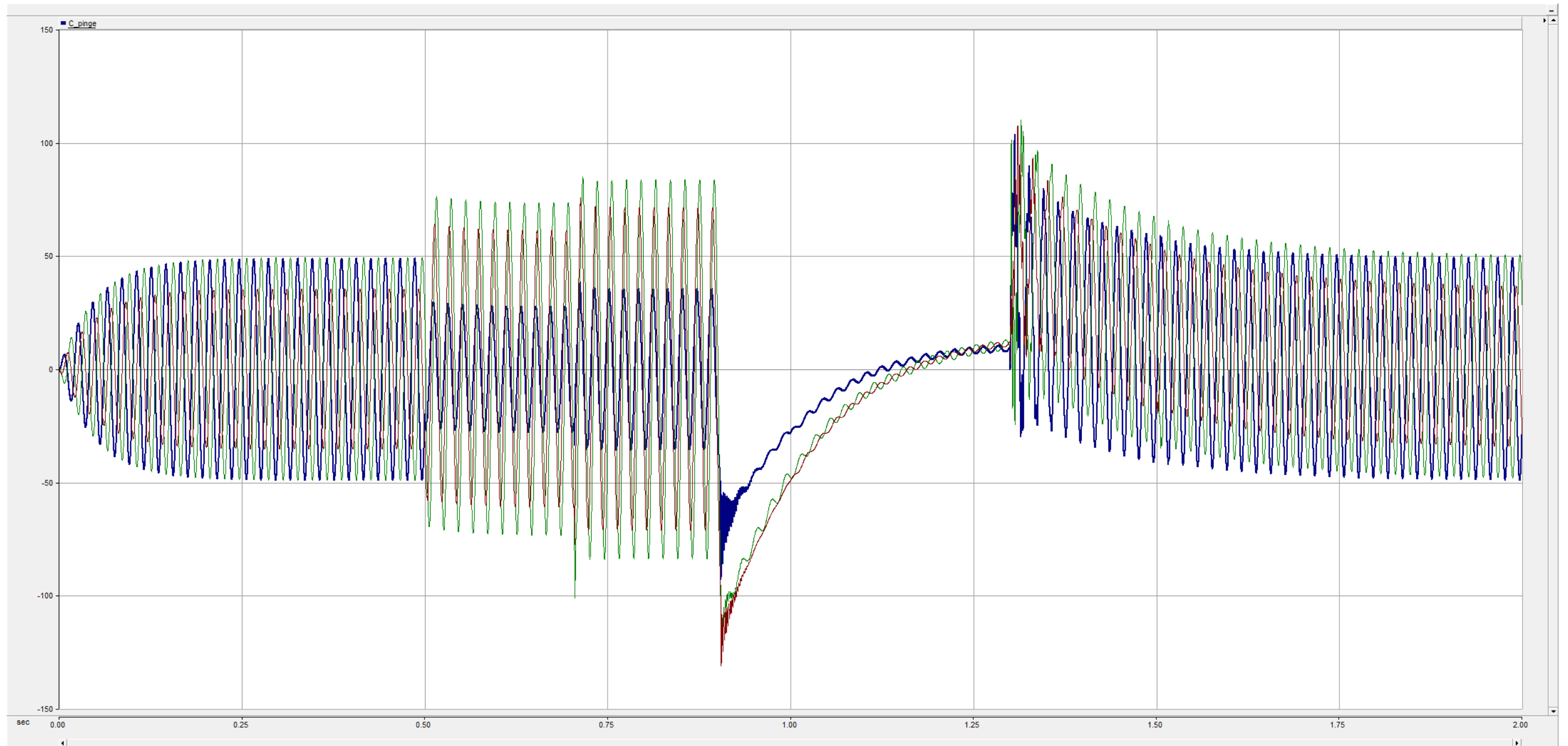
(Jämeda joonega on 330 kV õhuliini lühisest haaratud faasile kõige lähema 110 kV faasijuhtme pinge)



L.10

Katse 3“:Väljalülitatud 110 kV õhuliini faasipinged alajaamas C

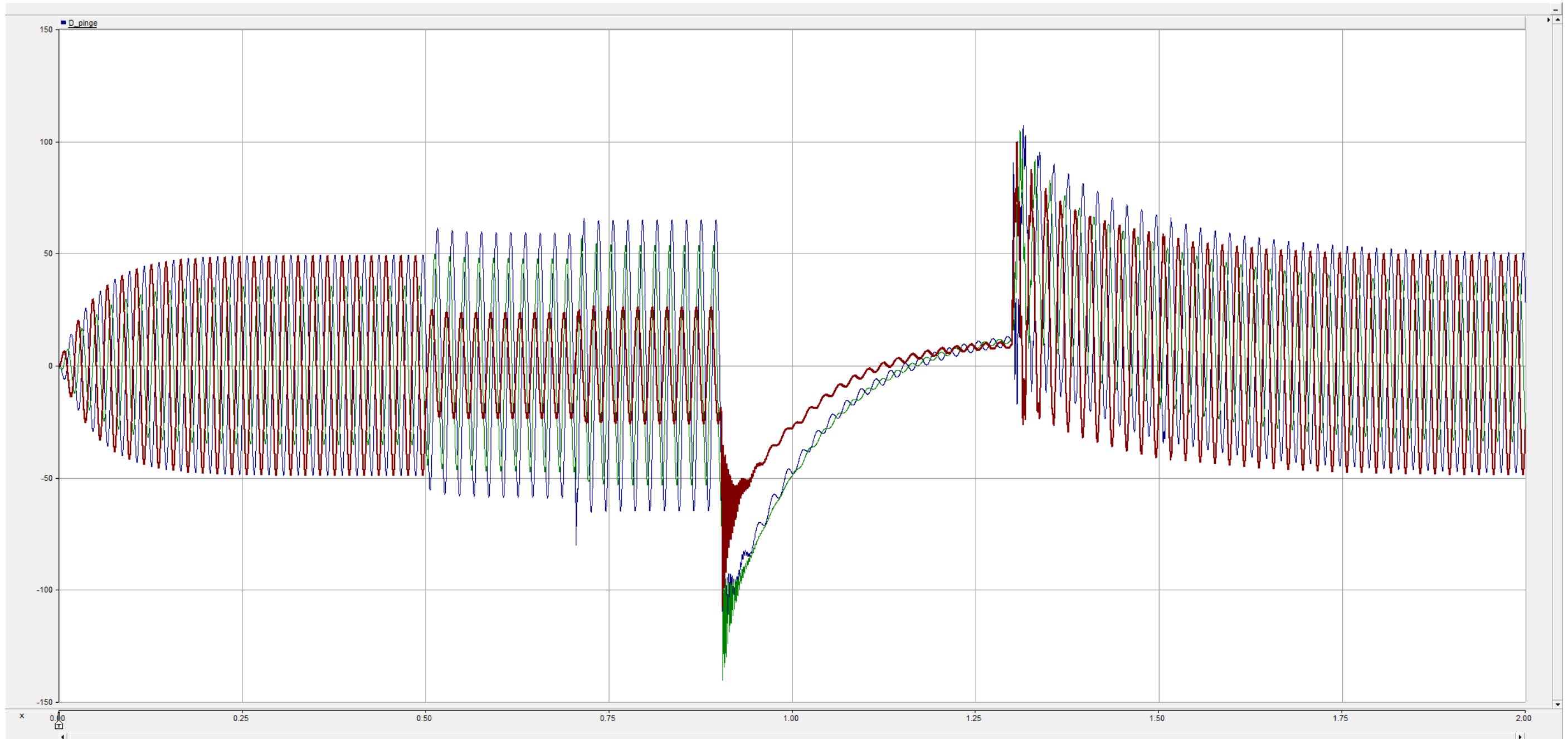
(Jämeda joonega on 330 kV õhuliini lühisest haaratud faasijuhtmele kõige lähedamal olev 110 kV faasijuhtme faasipinge)



L.11

Katse 3^o: Väljalülitatud 110 kV õhuliini faasipinged alajaamas D

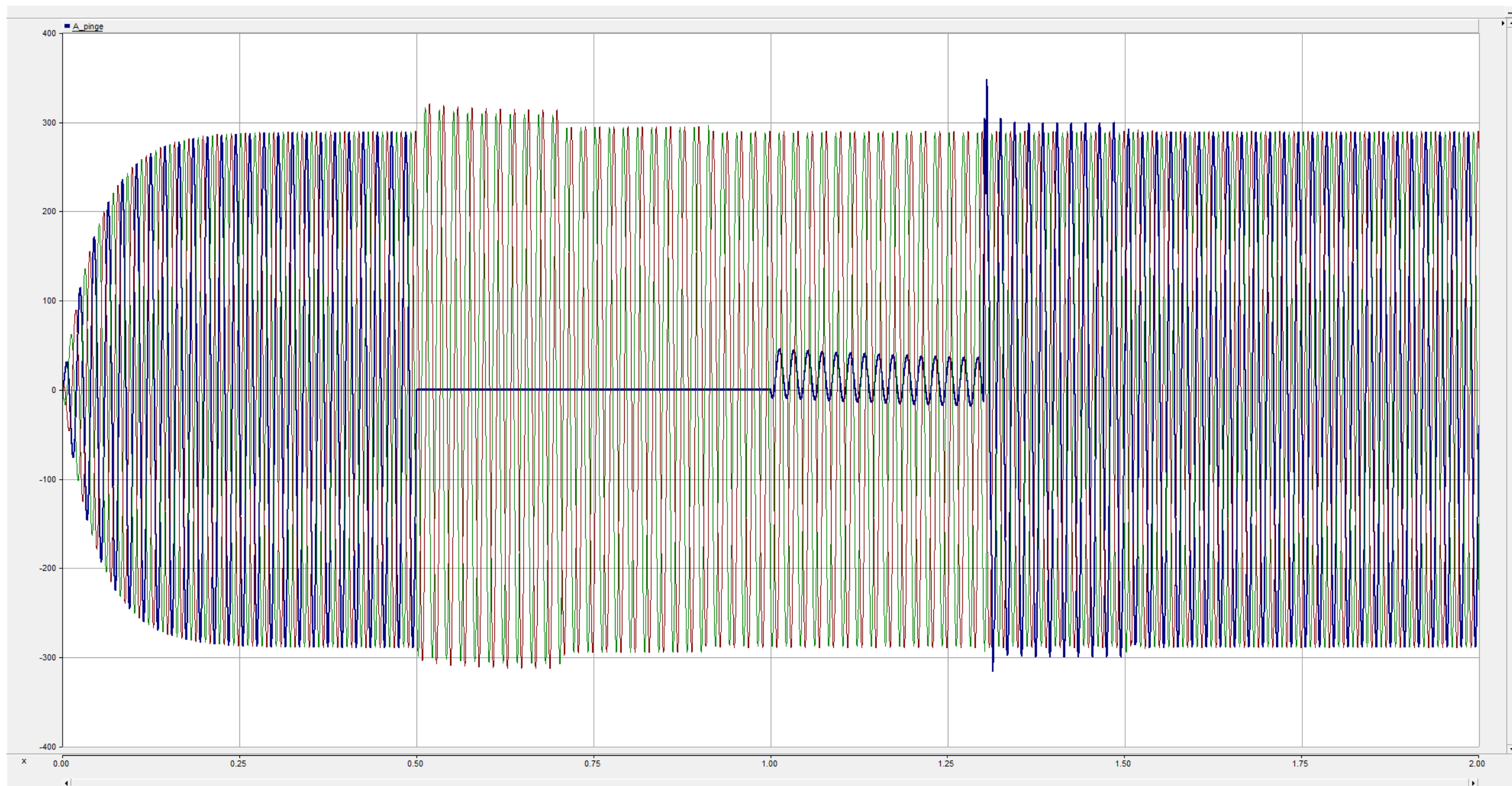
(Jämeda joonega on 330 kV õhuliini lühisest haaratud faasijuhtmele kõige lähedamal olev 110 kV faasijuhtme faasipinge)



L.12

Katse 5^o: 330 kV õhuliini faasipinged alajaamas A

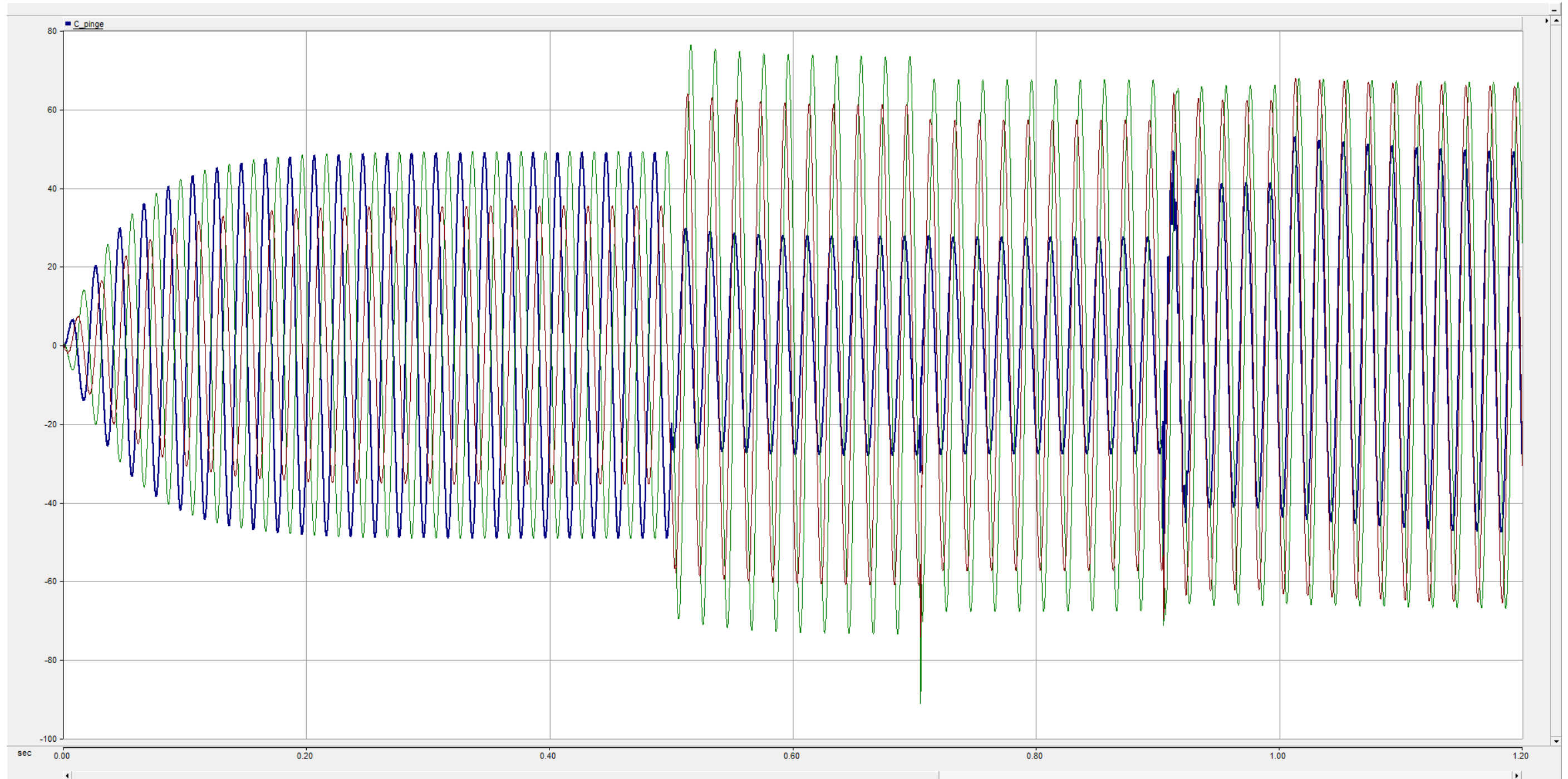
(Jämeda joonega on 330 kV õhuliini lühisest haaratud faasijuhtme faasipinge)



L.13

Katse 5^o: Väljalülitatud 110 kV õhuliini faasipinged alajaamas C

(Jämeda joonega on 330 kV õhuliini lühisest haaratud faasijuhtmele kõige lähedamal olev 110 kV faasijuhtme faasipinge)



L.14

Katse 5^o: Väljalülitatud 110 kV õhuliini faasipinged alajaamas D

(Jämeda joonega on 330 kV õhuliini lühisest haaratud faasijuhtmele kõige lähedamal olev 110 kV faasijuhtme faasipinge)

