



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonikainstituut

TRANSIENT-TAASTUVPINGETE UURIMINE 110KV
VÕRGUS ERINEVAT LIIKI LÜHISTE
VÄLJALÜLITAMISEL

A STUDY OF TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE IN 110KV SYSTEM IN CASE OF
DIFFERENT TYPES OF SHORT CIRCUITS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane:Karl Valge.....

/ nimi /

Üliõpilaskood: ...111464 (ekstern).....

Juhendaja:Dots Ülo Treufeldt.....

/ nimi /

Tallinn, 2017.a

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 magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees
/ nimi ja allkiri /

Lõputöö kokkuvõte

<i>Autor:</i> Karl Valge	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> Transient-taastuvpingete uurimine 110kV võrgus erinevat liiki lühiste väljalülitamisel	
<i>Kuupäev:</i> 22.05.2017	74 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja(d):</i> dotsent Ülo Treufeldt	
<i>Töö konsultant (konsultandid):</i> Tanel Sarnet	
<i>Sisu kirjeldus:</i> Töö eesmärk on uurida erinevat liiki lühiste väljalülitamisel tekkivaid transient-taastuvpingeid. Uuritava võrguosa pingeklassiks valiti 110kV. Sissejuhatav osa sisaldab taastuvpingete teoreetilisi aluseid. Kirjeldatakse erinevat liiki lühiste väljalülitumisel toimuvaid protsesse. Uurimuse osa koosneb uurimismudeli koostamisest programmis PSCAD. Koostatud uurimismudelisse sisestati erinevad võrguparameetrid, mida hiljem muudeti, et näha, kuidas ja millest täpsemalt lühiste väljalülitamisel taastuvpingete kuju ja suurus sõltub. Välja on toodud valitud parameetrite uurimiste mõõtmistulemused nii tabelite kujul kui graafilisel kujul. Samuti parameetrite sõltuvus üksteisest. Lõputöö uurimise osa tulemused kattusid teoreetiliste alustega.	
<i>Märksõnad:</i> Transient-taastuvpinge, taastuvpinge, liigpinge, lühised, uurimismudel.	

Summary of the Master's Thesis

<i>Author:</i> Karl Valge	<i>Kind of the work:</i> Masters Thesis
<i>Title:</i> A study of transient recovery voltage in 110kV system in case of different types of short circuits	
<i>Date:</i> 20.05.2017	74 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology <i>Faculty:</i> Faculty of Power Engineering <i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering	
<i>Tutor(s) of the work:</i> Associate prof. Ülo Treufeldt <i>Consultant(s):</i> Tanel Sarnet	
<i>Abstract:</i> The purpose of this thesis was to study transient recovery voltages appearing after the elimination of different types of short circuits from a high voltage grid part. The voltage level of the grid under study was 110 kV. The introduction of the thesis consists of theoretical bases of transient recovery voltage and different processes appearing in the middle of short circuit disconnection; in addition, they are being explained. The study consists of creating the simulation scheme on the computer program PSCAD. Created simulation scheme consists of different grid parameters which are being changed and evaluated. The results of the transient recovery voltage study are represented by tables and figures of curve shapes. Study results overlap with the theory.	
<i>Key words:</i> Transient, transient recovery voltage, overvoltage, high voltage, short circuit	

Sisukord

Sisukord.....	5
Lõputöö ülesanne.....	6
Teema põhjendus:	6
Töö eesmärk:.....	6
Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:.....	7
Lähteandmed:.....	7
Essõna	8
Sissejuhatus.....	9
1. Transient-taastuvpinge teoreetiline taust.....	11
1.1. Lähilühisel tekkivad transient-taastuvpinged.....	13
1.2. Ühefaasilises skeemis lühise katkestamisel tekkivad transient-taastuvpinged	14
1.3. Transient-taastuvpinge kolmeefaasilise lühise väljalülitumisel	16
1.3.1. Transient-taastuvpinge kolmeefaasilise maaihenduseeta lühise väljalülitumisel	16
1.3.2. Transient-taastuvpinge kolmeefaasilise maaihendusega lühise väljalülitumisel	19
1.4. Transient-taastuvpinge sõltuvus erinevatest parameetritest...20	
1.5. Võimsuslülitite valikul arvestatavad tegurid seoses transient-taastuvpingetega	24
Transient-taastuvpinge maksimaalväärtuse arvutamine	24
Nimilainetakistus ja teised lähilühise parameetrid.....	25
Mahtuvuslik pingetegur	25
2. PSCAD modelleerimisskeemi mudel	27
2.1. Mudeli algandmed	27
2.2. Arvutusmudeli koostamine	28
3. Transient-taastuvpingete uurimine	31
3.1. Transient-taastuvpingete uurimine võimsuslülitite klemmidel kolmeefaasilise maaga lühise väljalülitumisel.....	31
3.2. Transient-taastuvpingete uurimine sõltuvalt liini pikkusest lähilühiste puhul	38
3.3. Transient-taastuvpingete uurimine võimsuslülitite klemmidel kolmeefaasilise maaga lühise väljalülitumisel.....	47
3.4. Transient-taastuvpingete uurimine võimsuslülitite klemmidel üheefaasilise maaga lühise väljalülitumisel.....	52
3.5. Transient-taastuvpingete võrdlus erinevat liiki lühiste väljalülitumisel	57
4. Lõputöö kokkuvõte	60
Lisad	63
L.1. Kõrgepinge seadmete labori juhendid.....	64
4.1.1 Mahtuvuse muutus.....	68
4.1.2 Lekketakistuse muutus	68

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	Transient-taastuvpingete uurimine 110kV võrgus erinevat liiki lühiste väljalülitamisel
Üliõpilane:	Karl Valge, ekstern
Eriala:	Elektroenergeetika
Lõputöö liik:	Magistritöö
Lõputöö juhendaja:	Ülo Treufeldt
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	
Lõputöö esitamise tähtaeg:	25.05.2017

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppetooli juhataja (allkiri)

Teema põhjendus:

Elektrisüsteemis toimuvad mitmesugused siirdeprotsessid, mis omavad elektriseadmetele kahjulikku mõju. Üheks neist on seotud lülitustoimingutega. Lülitid ohustavad eelkõige siirdeprotsessid, mis on seotud suurte voolude (lühisvoolude) väljalülitamistega. Ohtlikud on nii elektrihaar avanevate kontaktide vahel kui ka pärast kaare kustumist tekkivad suured taastuvpinged, mis võivad põhjustada elektrihaare taassüttimist ja sellega lülitite kahjustamist. Seetõttu on oluline uurida lüliti kontaktide vahel tekkivaid taastuvpingeid, eriti lühisvoolude lahutamise korral. Uurimistulemused võimaldavad paremini aru saada taastuvpingete tekkimisest ja nende sõltuvusest mitmesugustest võrgu parameetritest.

Töö eesmärk:

Töö eesmärgiks on uurida kõrgepingevõrgus tekkivate lühiste väljalülitumisel tekkinud taastuvpingeid. Töö tulemused on kasulikud loengute täiendamiseks aines „Kõrgepingeseadmed“. Töö väljundiks on ka uus laboratoorne töö aines „Kõrgepingeseadmed“.

Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Tutvumine kirjandusallikatega

Tutvumine programmiga PSCAD

Uurimiseks vajaliku arvutusmudeli koostamine

Mudeli abil taastuvpingete uurimine mitmesuguste algtingimuste korral

Laboratoorse töö juhendi koostamine

Lähteandmed:

Lõputöö lahendamise käigus kasutatakse kõrgepingesüsteemiosa uurimist, mille kokkupanekuks on kasutatud reaalse 110kV liini seadmete andmeid. Lähteandmed vastavad Elering AS andmetele.

Eessõna

Lõputöö teema on välja antud Tallinna Tehnikaülikooli Inseneriteaduskonna Elektroenergeetika ja mehatroonika Instituudi algatusel. Töö koostamine toimus dotsent Ülo Treufeldti juhendamisel.

Magistrant avaldab tänu nooremteadur Tanel Sarnetile abi eest magistritöös kasutatud arvutusmudeli koostamisel ja Elering AS töötajale Marko Tealasele.

Sissejuhatus

Transient esineb elektrisüsteemis, kui elektrivõrk muutub ühest stabiilsest olekust teise. See võib juhtuda siis, kui näiteks äike lööb maasse kõrgepinge ülekande liini läheduses või äike lööb otse alajaamas olevasse seadmesse. Tihti esinevad transiendid siirdeprotsesside tulemusena. Võimsuslülitid ja lahkülitid lülituvad sisse ja välja olles kas koormuse all või koormuse alt väljas. Võimsuslülitid katkestavad suuri voole ja tühistavad lühisvoole lühises olevatest süsteemiosadest. Ajaperiood, millal transient-pinge ja -voolu võnked esinevad ulatuvad mikrosekunditest kuni millisekunditeni. Sellel üliväikesel ajaskaalal võib lühise ajal esinevat lühisvoolu lugeda stabiilseks olekuks, millal peamine energia asub magnetväljas. Kui rikkevool on katkestatud, viiakse süsteem teise stabiilsesse olekusse, kus energia on peamiselt elektriväljas. Energia muutus magnetväljast elektrivälja toimub siis, kui süsteemi elemente vaadeldakse lihtskeemina, et tähele panna voolu transiente ja pinge kõikumisi. [1]

Teatavasti liigpinged mõjuvad võrguseadmete isolatsioonile kahjustavalt ning on isolatsiooni ülelööride ja läbilööride põhjusteks. Liigpinged mõjutavad veel isolatsiooni vananemist ja juhtimisseadmete väärtoimet. Siirdeprotsessidest tingitud transientliigpingeid esineb elektrivõrgus väga tihedalt. [2]

Lihtsate siirdeprotsesside transientide analüüsimiseks vaatleme võimsuslülitit, kui ideaalset lülitit. Uurides elektrikaare mõju süsteemi elementidele, on väga tähtis, et meil oleks täielik sisuline arusaam füüsilistest protsessidest, mis toimuvad võimsuslülitite kontaktide vahel. [1]

Kõrgepinge võimsuslülitit on asendamatu seade elektrivõrgus. Võimsuslülitit peamine ülesanne on katkestada rikkevoole ja eraldada süsteemist võrguosa, kus esineb rike. Lisaks lühisvoolule peab võimsuslülitit suutma eraldada laialdaselt teisi tüüpe voole nagu mahtuvuslikke voole, väiksemaid induktiivseid voole ja koormusvoole. Võimsuslülitid peavad täitma järgnevat rolli elektrivõrgu osana – suletud kontaktide asendis oleksid head juhid, avatud kontaktide asendis käituksid heade isolaatoritena erinevate kahe süsteemiosa vahel, kontaktide lülitamise ajaline vahe oleks võimalikult üürrike, suure töökindlusega seade. [1]

Kõrgepinge- ja keskpinge võrgus kasutatakse erinevaid viise elektrikaare kustutamiseks võimsuslülitites. Kontaktide eemaldumisel on tähtis kustutada kontaktide vahele tekkinud elektrikaar võimalikult kiirelt. Selleks peab toimuma kontaktidevahemikus põleva elektrikaare intensiivne deionisatsioon, mida on võimalik saavutada kaarekustutusega elegaasi keskkonnas, kaare jagamisega mitmeks lühemaks kaareks, kaare surumisega kitsamasse

pilusse või elektrikaare elektromagnetilise või gaasi abil ärapuhumisega. Elektriikaare kustutusmeetodite alusel jaotatakse võimsuslülite liigid – õhklülid, elegaaslülid (SF₆ lülid), vaakumlülid, õlivaesed lülid, õlirikkad lülid, tahkegaaslülid. [1]

Esimene õli tüüpi võimsuslülitite patenteeriti 1907. aastal J.N. Kelmanile Ameerika Ühendriikides. Kuna tehnoloogia oli väga algeline ja antud tehnoloogiat testiti katse-eksitusmeetoditega, kujutas ka algeline võimsuslülitite lihtsat kontaktipaari ujutatud õli täis anum. Esimene patent elegaasvõimsuslülite valdkonnas esitati 1956. aastal T.E. Browne, F.J. Lingal ja A.P. Stromile. Täna on tugev enamus kõrgepingevõimsuslülid elegaasi kustutustehnoloogial baseeruvad. [1]

Suur samm elektrikaare sõltuvusest erinevatest võrgu parameetritest oli 1939.aastal, kui A. M. Cassie avaldas artikli tuntud valemiga kirjeldamaks elektrikaare dünaamikat. 1943.aastal O. Mayr täiendas seda seletustega, mis toimub ajavahemikul voolu nullväärtuse juures. Nähti palju vaeva nende matemaatiliste seletuste tõestamisel ja täiustamisel läbi praktiliste katsetuste ja mõõtmiste. Sai selgeks, et voolu katkestus elektrikaare näol on väga keeruline füüsikaline protsess arvestades, et kõik toimub nii lühikese ajaintervalliga kui mikrosekundid. Plasma temperatuur ulatub 10 000 kelvinini ja temperatuuri langus voolu nullväärtuse ümber on umbes 2000 kelvinit mikrosekundis. [1]

Antud töö eesmärk on uurida, kuidas ja millistest võrguparameetritest sõltub 110kV võrgupingega süsteemis erinevat liiki lühistel lühisvoolude väljalülitumisel tekkinud transient-taastuvpinged. Uurimiste aluseks on võetud juhendid Tallinna Tehnikaülikooli Inseneriteaduskonna Elektroenergeetika magistratuuri õppekavas oleva õppeaine „Kõrgepingeseadmed“.

1. Transient-taastuvpinge teoreetiline taust

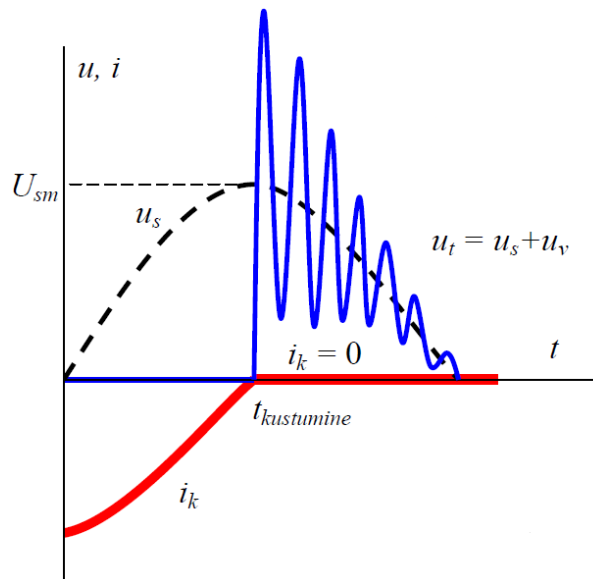
Selles töös on uurimise all ainult suurte elektrivoolude, täpsemalt avariitalitusel tekkinud lühisvoolude, katkestamisest tingitud taastuvpinged.

Lühiste väljalülitamise hetkel tekib võimsuslülitis avanevate kontaktide vahele elektrikaar. Kui voolu väärtus jõuab nullini, siis elektriakaare juhtivus kahaneb jõudsasti ja kontaktipaari vahel esinenud kaar kustub. Et kaar uuesti süttiks peab pinge kaarevahemikul kasvama taas süttimispingeni. Pinget kaarevahemikul peale elektriakaare kustumist nimetatakse transient-taastuv pingeks. [3]

Transient-taastuvpinge on punkt-punktiline erinevus pingete vahel lühise katkestanud võimsuslülitil sisendkontaktidel ja võimsuslülitil väljundkontaktidel. Kui lühis katkestatakse, siis võimsuslülitist pingeallika pool olevas võrguosas pinge taastub pingeallika võrgusagedusliku pinge tasemeni. Lühisepoolses võrguosas pinge võngub väga lühikest aega väga suure sagedusega ja sumbub seejärel täiesti. Seega tekivad lüliti lahknevatel poolustel välja väga erinevad potentsiaalid, mille tulemusel kujuneb võimsuslülitil lahknevatel kontaktide vahel pärast kaare kustumist välja oluline transient-taastuvpinge. [4] [5]

Kui lühisvool katkestatakse voolu nullväärtuse juures siis mingi osa magnetvälja energiast on endiselt salvestatud kas alajaama trafode puisteinduktiivsusesse, erinevate toitegeneraatorite staatorite ja ergutusmähiste eneseinduktsiooni, alajaama lattide induktsiooni, kõrgepingeliini või kaablitesse. Voolukatkestusest tingitud kiirest võrgukonfigutatsiooni muutusest põhjustatud elektromagnetlained levivad läbi süsteemi. Need pingelained peegelduvad vastu trafosid, suurendavad pingeamplituude ja levivad tagasi katkestatud süsteemiosa terminalini. [1] [6]

Transient-taastuvpinge koosneb sisuliselt kahest komponendist: transiendi komponendist ehk vabakomponendist, mis tekib koheselt peale voolu nullväärtuseni jõudmist ning stabiilsest komponendist ehk sundkomponendist, mis jääb alles kui transient ära sumbub. Taastuvpinge vabakomponendi kestvust mõõdetakse tavaliselt millisekundites (joonis 1.1). Transient-taastuvpinge tegelik lainekuju sõltub erinevatest elektrisüsteemi parameetritest. [3] [7]



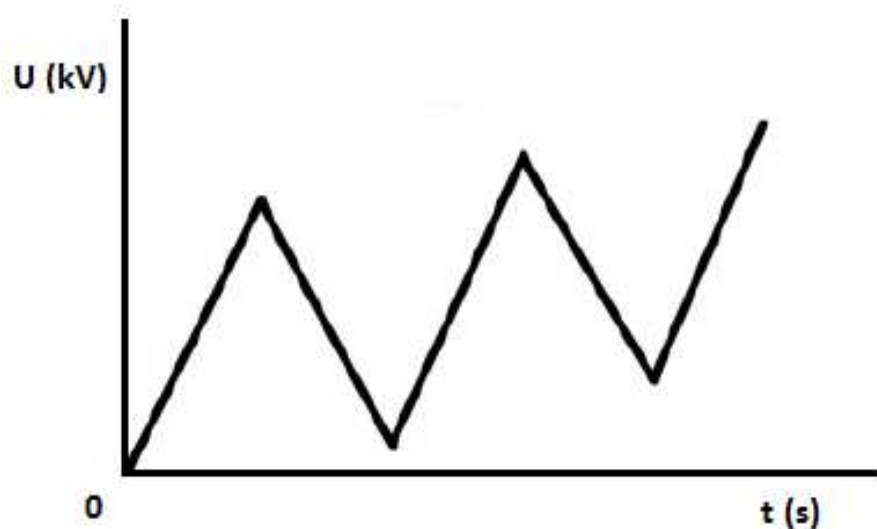
Joonis 1.1 Voolu ja pinge teoreetilised kõverad kaare kustumishetkel [3]

Rikkeline võrguosa eduka lahutamise määratlemiseks on tähtsad parameetrid taastuvpinge tõusukiirus ja amplituud. Nimelt, kui võimsuslüüti väljalülitumisel pooluste kontaktide lahutamise kiirus voolu nullväärtuseni jõudmise hetkel on suurem transient-taastuvpinge tõusukiirusest, siis on vooluringi lahutamine soojuslikus piirkonnas edukas. Sellele võib järgneda edukas taastuvpinge taluvus dielektrilises piirkonnas, ja kokkuvõttes täielik dielektriline taastuvpinge taluvus. Kuid, kui taastuvpinge tõusukiirus on suurem, kui võimsuslüüti kontaktidevaheline taastumiskiirus, siis on vooluringi lahutamine ebaedukas, kas soojuslikus piirkonnas või dielektrilises piirkonnas. [7] [8]

Transient-taastuvpinge esineb peale iga voolukatkestust, kuid kõige tõsisemad liigpinged esinevad peale lühiste väljalülitumist. [4]

1.1. Lähilühisel tekkivad transient-taastuvpinged

Kui lühisekoht on kõrgepinge liinil ja võimsuslülitite klemmidele võrdlemisi lähedal, siis sellist lühist nimetatakse lähilühiseks. Lähilühise katkestamine avaldab suurt termalset survet võimsuslülitite kontaktidevahel asuvale kaarevahemikule esimestel mikrosekunditel peale voolu katkemist tänu mööda liini lühisest tingitud elektromagnetlainete kulgemisele, mille tulemuseks võivad olla transient-taastuvpinged tõusukiirusega 5-10 kV/ μ s. Joonisel 1.2 on kujutatud tüüpilist lähilühise väljalülitumisel tekkinud saehambakujulist transient-taastuvpinge lainekujutist. [7]

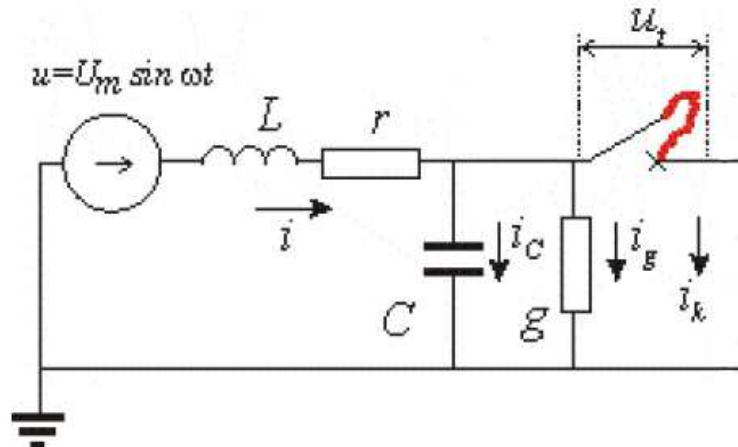


Joonis 1.2. Lähilühise väljalülitumisel tekkinud transient-taastuvpinge lainekuju [7]

Teatud tüüpi võimsuslülitite jaoks on kõige kriitilisem transient-taastuvpinge esimene periood ja lähilühise poolt põhjustatud koormus võib olla väga tõsine. Liinipoolse pinge tõusukiirus sõltub katkestatud lühisvoolust ja õhuliini näivtakistusest. Suurimaid probleeme tekitab parameeter pole mitte transient-taastuvpinge amplituudväärtus vaid taastuvpinge esimese perioodi tõusukiirus. [7]

1.2. Ühefaasilises skeemis lühise katkestamisel tekkivad transient-taastuvpinged

Kui elektrivooluahel on induktiivse iseloomuga, siis voolu nullväärtuseni jõudmisel on parajasti pinge maksimaalväärtuse juures. Sõltub ahela induktiivsusest. [3]



Joonis 1.3. Lühise väljalülitumine ühefaasilises ahelas [3]

Pinge sundkomponent U_s on toiteallika pinge see osa, mis elektrikaare puudumisel langeks komponentidele C ja g . [3]

Pinge vabakomponent U_v on toiteallika pinge see osa, mis kujuneb olukorras, kus toiteallikas on lühises ja pinge omab mahtvusliku iseloomu. Seega pinge vabakomponendi sagedus on tunduvalt suurem sundkomponendi omast. [3]

Vabakomponendi võnkesagedus ja sumbuvus avalduvad järgmiselt:

$$\omega = \sqrt{\frac{1 - rg}{LC} - b^2} \quad (1.1)$$

kus r – toiteahela aktiivtakistus Ω ;

g – faasi põikijuhtivus maa suhtes;

L – ahela induktiivsus H;

C – ahela põikimahtuvus μF ;

b – vabakomponendi sumbuvus;

ω – vabakomponendi võnkesagedus Hz.

$$b = \frac{1}{2} \left(\frac{g}{C} + \frac{r}{L} \right) \quad (1.2)$$

kus r – toiteahela aktiivtakistus Ω ;

g – faasi põikijuhtivus maa suhtes;

L – ahela induktiivsus H;

C – ahela põikimahtuvus μF ;

b – vabakomponendi sumbuvus.

Järelikult, kui toiteahela aktiivtakistus $r = 0$ (lühise hetkel) ja faasi põikijuhtivus maa suhtes $g = 0$, (ideaalne isolatsioon) siis vabakomponendi võnkesagedus avaldub valemiga [3]

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (1.3)$$

Mida suurem on ahela aktiivtakistus ja põikijuhtivus maa suhtes, seda väiksem on vabakomponendi võnkesagedus ning tulemuseks läheb vabakomponendi võnkumine sumbuvalt võnkumiselt üle eksponentsiaalsele sumbumisele, mille korral lakkavad taastuvpinge võnkumised täielikult. [3]

Taastuvpinge amplituudväärtus on elektrikaare kustumise hetkel tekkinud pinge sundkomponendi ja vabakomponendi väärtuste summa (Joonis 1.2)

$$u_t = U_S + U_V. \quad (1.4)$$

1.3. Transient-taastuvpinge kolmefaasilise lühise väljalülitumisel

Antud töös on tähtis teada, kuidas kujunevad taastuvpinged kolmefaasilises võrgus lühise väljalülitamisel võimsuslülitite kontaktipaaride vahel kuna kõrgepinge ülekandevõrk on üles ehitatud kolmefaasiline. Lühiseid on erinevaid liike – maaühendusega, faasidevaheline kahefaasiline, faasidevaheline kolmefaasiline. Selles töös uuritakse lähemalt kolmefaasilist maaühendusega ja kolmefaasilist faasidevahelist ehk maata lühist ja ühefaasilist lühist.

1.3.1. Transient-taastuvpinge kolmefaasilise maaühenduseta lühise väljalülitumisel

Kolmefaasilise lühise korral avanevad lülitite kolme pooluse kontaktipaarid samaaegselt ja iga kontaktipaari vahel tekib elektrikaar. Voolude faasinihete tõttu jõuab ühes faasis vool kõigepealt nullväärtuseni ja kustub selles faasis kontaktidevaheline elektrikaar. Sellest hetkest muutub lühis selles süsteemis kahefaasiliseks. [3]

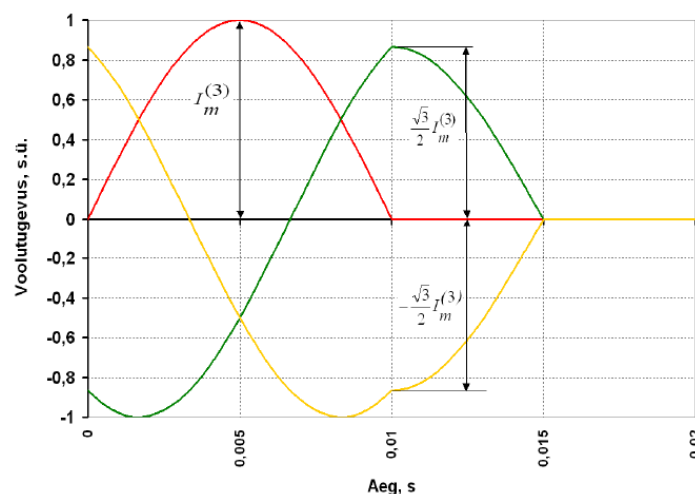
Selle kahefaasilise lühisvoolu amplituudväärtus avaldub järgmiselt:

$$I_m^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_m^{(3)} \cong 0,87 I_m^{(3)} \quad (1.5)$$

kus $I_m^{(3)}$ – kolmefaasilise lühisvoolu amplituudväärtus kA;

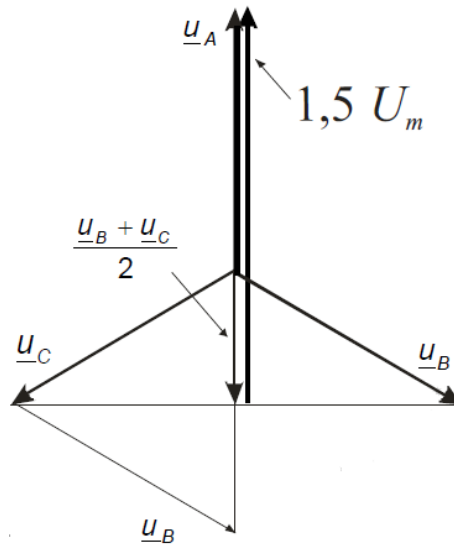
$I_m^{(2)}$ – kahefaasilise lühisvoolu amplituudväärtus kA.

Ülejäänud faasides peab vool samaaegselt nullväärtuseni jõudma, sest selles süsteemis pole voolul kuhugi mujale minna.



Joonis 1.4. Kolmefaasilise maata lühise väljalülitumisel esinevad voolud [3]

Peamiselt induktiivses süsteemis on voolu nullväärtuse saavutamise hetkel pingete amplituudväärtuselähedane. Kolmefaasilise lühise puhul liidetakse faaside pingete vektoriaalsete suuruste väärtused. Võttes tinglikult, et kõigepealt jõuab nullväärtuseni faasi A vool, siis sel hetkel kujuneb faasi A pingete sundkomponendi amplituudväärtus järgmiselt (Joonis 1.5) [3]



Joonis 1.5. Kolmefaasilise maata lühise väljalülitumisel tekkivate pingete vektordiagramm

[3]

Teades, et pingete vabakomponendi suurim väärtus on sama suur, kui sundkomponendi suurim väärtus, võib faasi A voolu nullväärtuse saavutamisel avaldada taastuvpinge maksimumväärtuse järgnevalt:

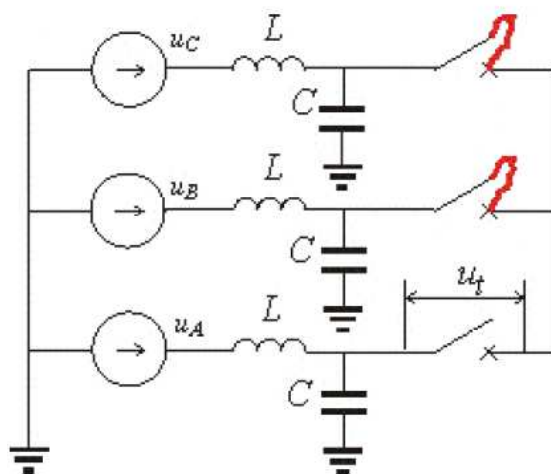
$$u_{t\max} = 2 \cdot 1,5U_m = 3U_m \quad (1.6)$$

kus U_m – pingeamplituudväärtus kV.

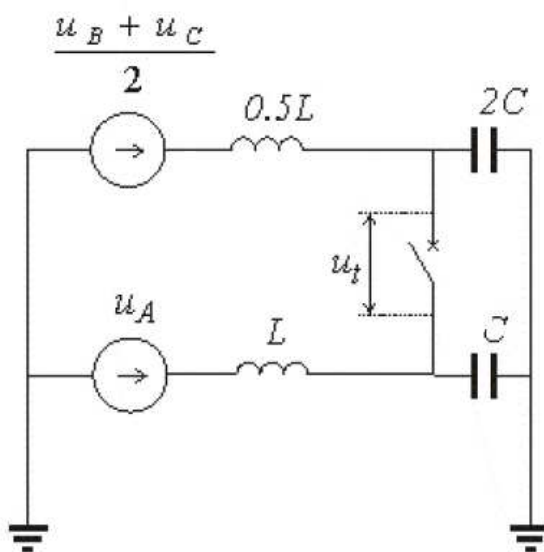
Kahes ülejäänud faasis jõuavad voolud nullväärtuseni 5ms ehk veerand perioodi hiljem. Sel hetkel on pingete sundkomponendi amplituud

$$u_{sm} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_m. \quad (1.7)$$

Voolude väljalülitamise skeemi ilmestab Joonis 1.6 ja aseskeemi Joonis 1.7.



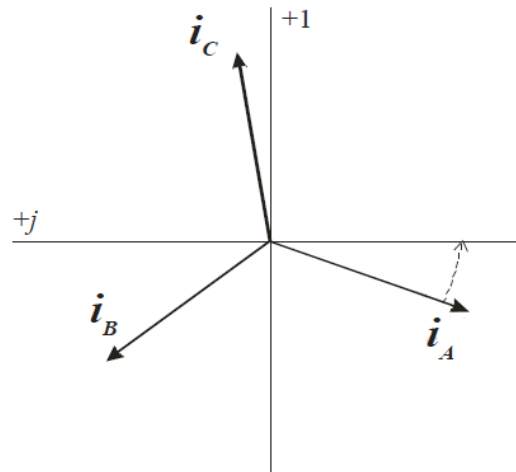
Joonis 1.6. Kolmefaasiline maata lühise väljalülitamise skeem [3]



Joonis 1.7. Kolmefaasilise maata lühise väljalülitamise aseskeem [3]

1.3.2. Transient-taastuvpinge kolmefaasilise maaihendusega lühise väljalülitumisel

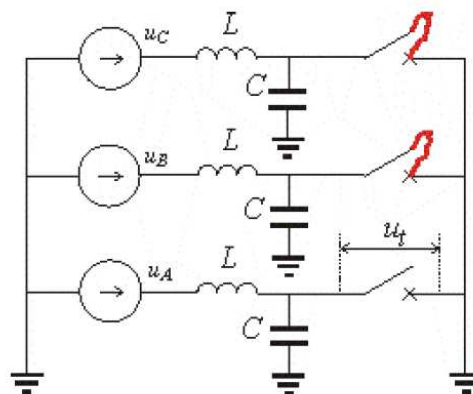
Kolmefaasilise maaihendusega lühise puhul peale lüliti kontaktide avanemist tekkinud elektrihaared pooluste kontaktipaaride vahel kustuvad üksteise järel teineteisest sõltumatult võrdsete intervallidega $20/3$ ms.



Joonis 1.8. Kolmefaasilise maaga lühise väljalülitamisel kujunevate voolude vektordiagramm [3]

Teades, et halvimal juhul on pinge sundkomponendi ja vabakomponendi väärtused võrdsed saame taastuvpinge maksimaalse väärtuse.

$$u_{tm} = 2U_m \quad (1.8)$$

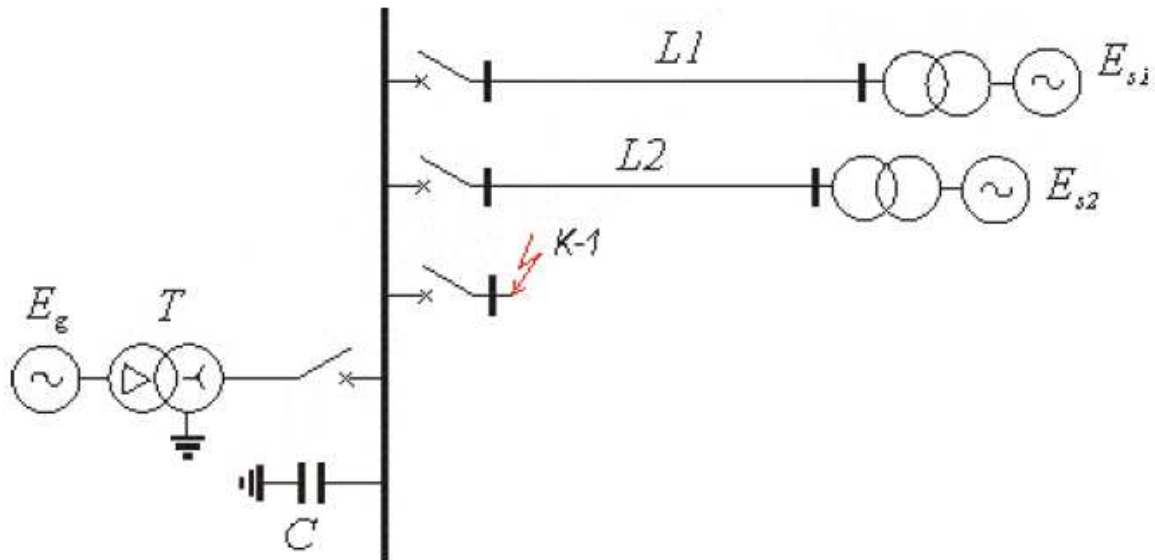


Joonis 1.9. Kolmefaasilise maaga lühise väljalülitamise skeem [3]

Kolmefaasiline maaga lühis on sümmeetriline lühis kuna süsteem jääb peale lühist stabiilseks. [3]

1.4. Transient-taastuvpinge sõltuvus erinevatest parameetritest

Selleks, et leida, mis faktoritest või millistest parameetritest lühisvoolu väljalülitumisel tekkinud taastuvpinge sõltub, tuleb vaadata taastuvpinget läbi matemaatiliste valemite.



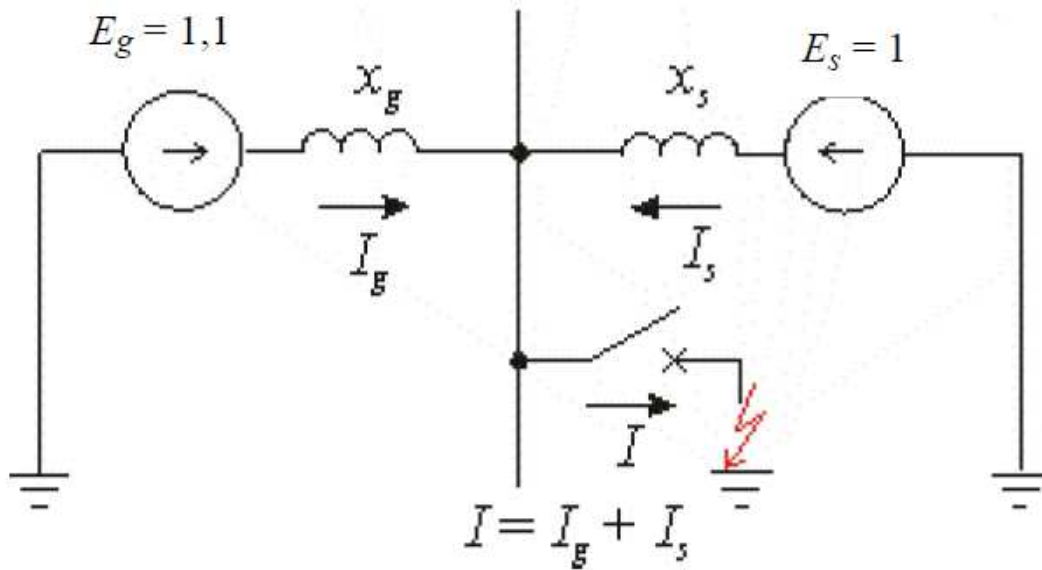
Joonis 1.10. Kolmefaasiline maandatud neutraaliga lühist sisaldav elektrisüsteemi skeem

[3]

Selgituseks:

- Lühis on kolmefaasiline
- Algselt võib vaadelda ainult ühte faasi
- Esmalt tuleb leida lühisvool (parameetrid võrgusagedusel)
- Taastuvpinge arvutamine. Parameetrid kõrgetel sagedustel kuni 1MHz, kuna taastuvpinge vabakomponendi võnkesagedus võib olla väga kõrge.

Lühisvoolu leidmiseks koostatakse tavapärase aseskeem – sisaldab lühisepunkti lähedal asuvate generaatorite (50Hz) takistusi ühes harus ja kaugemates süsteemide ning neid ühendavate pikkade liinide takistusi teises harus.



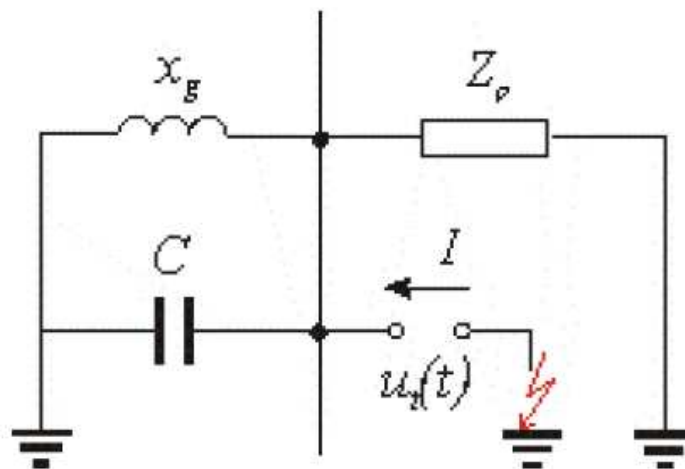
Joonis 1.11. Lühisvoolu leidmiseks koostatud aseskeem [3]

Seejärel koostatakse aseskeem kaare kustumishetkele. Kaare kustumishetkel toimub pinge järsk taastumine. Sellises olukorras võib generaatori takistuse jätta muutumatuks, kuid pikad liinid tuleb asendada nende lainetakistusega:

$$Z_1 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1.9)$$

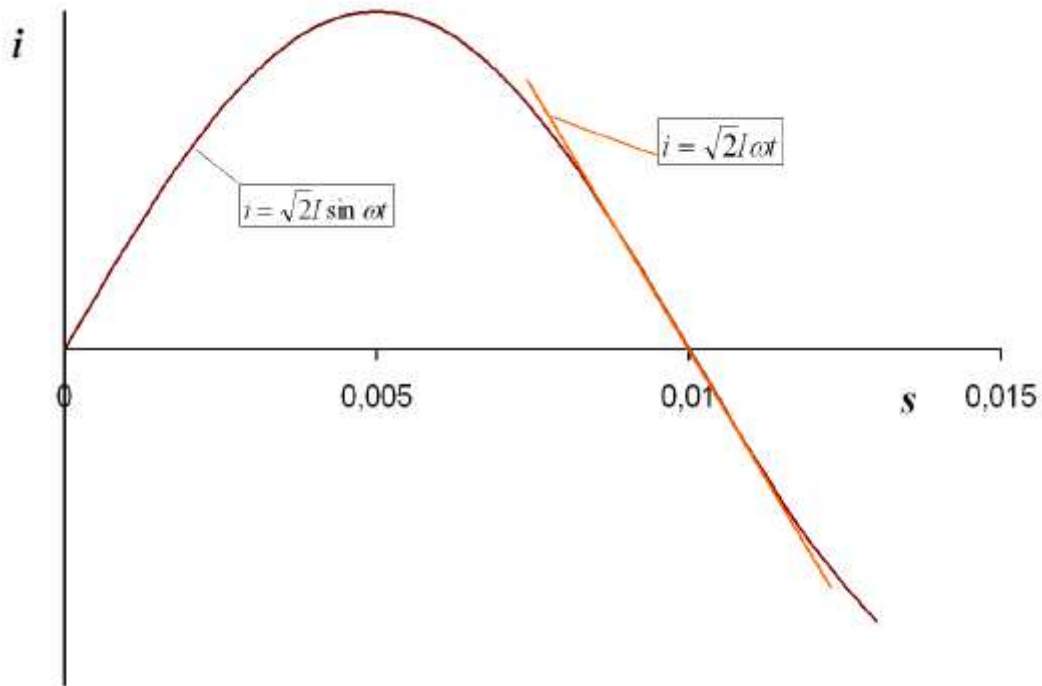
$$Z_p = \frac{Z_1}{n} \quad (1.10)$$

kus n - paralleelsete liinide arv.



Joonis 1.12. Kaare kustumisele vastav superponeeriv aseskeem kõrgetele sagedustele [3]

Leitud lühisvool sisestatakse joonisel 1.11. kujutatud aseskeemi ja jälgitakse aseskeemi reaktsiooni sellele voolule. Elektrihaar katkeb voolu nulli läbimise hetkel seega võib siinuskõvera asendada nullpunkti läbimise ümbruses kaldsirgega. [3]



Joonis 1.13. Siinuskõvera asendamine kaldsirgega [3]

Kuna taastuvpinge vabakomponendi sagedus on palju kõrgem kui 50Hz, saab pinge sundkomponendi lugeda siirdeprotsessi käigus muutumatuks ja võrdseks siinuspinge amplituudiga. [3]

Sellistel tingimustel avaldub pinge lüliti kontaktide vahel järgmiselt:

$$u(t) = utp \left\{ 1 - e^{\frac{\sqrt{\delta}t}{2ZpC}} \left[\frac{e^{\frac{\sqrt{\delta}t}{2ZpC}} - e^{-\frac{\sqrt{\delta}t}{2ZpC}}}{2\sqrt{\delta}} + \frac{e^{\frac{\sqrt{\delta}t}{2ZpC}} - e^{-\frac{\sqrt{\delta}t}{2ZpC}}}{2} \right] \right\} \quad (1.11)$$

kus

$$\sqrt{\delta} = \sqrt{\frac{1-4Zp^2C}{Lg}} \quad (1.12)$$

$$u_{tp} = \sqrt{2}I\omega Lg \quad (1.13)$$

Taastuvpinge u_{tp} 50Hz komponendi hetkväärtus kaare kustumise hetkel. Kui u_{tp} valemis on induktiivsus Lg , siis lühisvoolu I arvutati faasipinge ja ekvivalentse induktiivsuse $Le=Lg/Ls$ alusel. Kuna $Lg > Le$, siis u_{tp} on suurem faasipinge amplituudist. [3]

Siirdeprotsessi iseloomu määrab $\sqrt{\delta}$, mis asendatakse suurusega

$$\eta = \sqrt{1 - \delta} = \sqrt{\frac{4Zp^2C}{Lg}} = 2Zp \sqrt{\frac{C}{Lg}} \quad (1.14)$$

Suurus η iseloomustab taastuvpinge vabakomponendi sumbuvalt:

- kui $\eta > 1$, siis taastuvpinge vabakomponent on võnkuv
- kui $\eta < 1$, siis taastuvpinge vabakomponent on aperioidiline
- kui $\eta = 1$, siis on tegemist nn. kriitilise tingimusega.

Mida väiksem on η , seda paremad on lühise lahutustingimused võimsuslülile. Suurus η on seda väiksem, mida väiksem on resulteeriv lainetakistus Zp . Resulteeriv lainetakistus Zp on väiksem, kui lühisekohaga on ühendatud liinid pikemad ja nende arv suurem. [3]

Lainetakistus on oma olemuselt aktiivtakistus, mis põhjustab pingelainel energiakadu ning millel on siirdeprotsessi summutav efekt. [3]

Transient taastuvpinge sõltub mitmetest süsteemi parameetritest: [4]

- a) Süsteemi induktiivsusest ja mahtuvusest
- b) Lühisvoolust
- c) Võimsuslüliti läbiviikude mahtuvusest
- d) Alajaama latini jõudvate ülekandeliinide arvust ja nende näivtakistusest
- e) Võimsuslüliti sisestest faktoritest (esimene poolus, kus elektrikaar kustub näiteks)
- f) Süsteemi maandusest

1.5. Võimsuslüli valikul arvestatavad tegurid seoses transient-taastuvpingetega

Selleks, et pakutavad võimsuslülitid oleksid elektrisüsteemi standardites kirjeldatavatele nõutud parameetritele vastavad, erinevad kõrgepingevõimsuslülitite tootjad teostavad mitmeid teste võimsuslülititega. ABB on oma tootekataloogis välja toonud, mida tuleb tähele panna, et võimsuslülitid suudaksid vastu pidada erinevaid kõrgepingesüsteemis tekkivaid liigpingeid ja nende hulgas ka transient-taastuvpingeid.

Elektrisüsteemi maandusviis mängib tähtsat rolli transient-taastuvpinge kujunemisel kuna liigpingete amplituudväärtused on reeglina vähem tõsisemad maandatud neutraaliga võrkudes. Võimsuslüli valikul on vajalik tegur, mis kirjeldab võimsuslüli esimesel faasipoolusel kujunevat pinget kui vool selles faasis peale võimsuslüli väljalülitumist nulli jõuab (k_{pp}). Seda tegurit kasutatakse transient-taastuvpingete arvutamiseks kolmefaasiliste lühiste puhul. [9] [10]

Üldkasutatavad teguri numbrilised väärtused: [10]

- $k_{pp} = 1.3$ kui tegemist on kolmefaasiliste lühistega elektrisüsteemis, kus neutraal on jäigalt maandatud.
- $k_{pp} = 1.5$ kui tegemist on kolmefaasiliste lühistega elektrisüsteemis, kus neutraal on maast isoleeritud.
- $k_{pp} = 1.0$ kui tegemist on eriolukordadega, näiteks kahefaasilised raudteesüsteemid, lähilühised.

Erinev olukord on ka siis, kui toimub kolmefaasiline lühis maauhenduseta. Sel juhul $k_{pp} = 1.5$. [10]

Transient-taastuvpinge maksimaalväärtuse arvutamine

Kasutatakse sellist terminit kui nimi transient-taastuvpinge. Selle sisu seisneb transient-taastuvpinge suurimas väärtuses, mis esineb võimsuslüli esimesel faasipoolusel, kus vool peale võimsuslüli väljalülitumist nullväärtuseni jõuab. [10]

IEC standardi alusel arvutatakse transient-taastuvpinge suurimat väärtust järgneva valemi alusel: [10]

$$u_c = \frac{U_r * k_{pp} * \sqrt{2} * k_{af}}{\sqrt{3}} \quad 1.15$$

kus U_r – nimipinge kV

k_{pp} – transient-taastuvpinge faktor

k_{af} – amplituudifaktor. IEC järgi võttes peab olema 1.4 100% lühisvoolu juures.

Nimilainetakistus ja teised lähilühise parameetrid

Lühise esinemisel kõrgepingeliinil võimsuslüliti läheduses levivad lained moodustavad transient-taastuvpinges küllaltki sügava esimese osa. Taastuvpinge tõusukiirus, *RRRV*, sõltub väga paljuski lühisvoolust ja lainetakistusest. [10]

Lainetakistuse erinevus sõltub faasijuhi materjalist.

IEC ja IEEE standardites on lainetakistus määratud väärtusega 450 Ω. [10]

Lisaks on lähilühise puhul vajalikud parameetrid löögitegur (*Peak factor*) ja taastuvpinge tõusukiirus (*RRRV factor*). Nende parameetrite väärtused on standardiseeritud: [10]

Peak factor – 1.6

RRRV factor – 0,2 (kV/μs) 50Hz süsteemis

0,24 (kV/μs) 60Hz süsteemis

Mahtvuslik pingetegur

Mahtvuslikku pingeteguri kasutatakse ühefaasilise taastuvpinge defineerimiseks erinevate mahtvuslike lülitustoimingute puhul. Tegur sõltub järgmistest asjaoludest: [10]

Olukord:

- koormusvaba õhuliini lülitamine
- koormusvaba kaabelliini lülitamine
- akupankade lülitamine

Elektrisüsteemi maandusviis:

- maandatud neutraal
- maandamata neutraal

Standardsed mahtvusliku pingeteguri (k_c) väärtused on järgnevad: [10]

Koormusvaba õhuliini lülitamine:

- 1.2 maandatud neutraaliga võrgus
- 1.4 maandamata neutraaliga võrgus

Koormusvaba kaabelliini lülitamine: [10]

- 1.0 varjestatud kaablid jäigalt maandatud neutraaliga võrgus
- 1.2 võötatud kaablid maandatud neutraaliga võrgus
- 1.4 maandamata neutraaliga võrgus

Akupankade lülitamised: [10]

- 1.0 maandatud neutraaliga akupank jäigalt maandatud neutraaliga võrgus
- 1.4 akupank maandamata neutraaliga

Juhul kui sobivad erinevad mahtvuslikud pingetegurid siis kasutada kõrgeima väärtusega tegurit. [10]

Pingetegurit kasutatakse ühefaasilise taastuvpinge maksimumväärtuse arvutamiseks järgmise valemiga: [10]

$$u_c = \frac{U_r * k_c * 2 * \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad 1.16$$

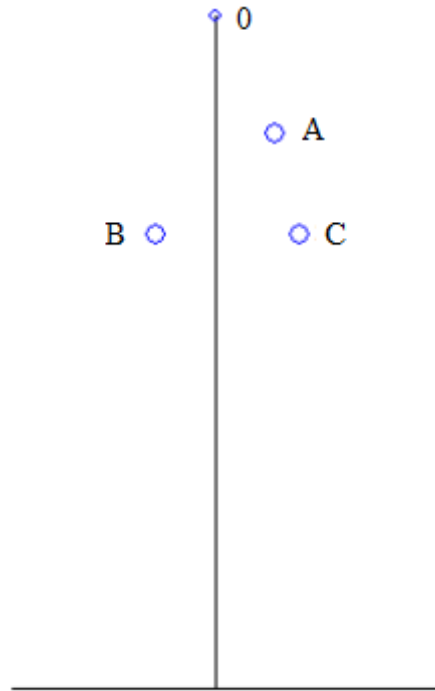
kus U_r – nimipinge kV

k_c – mahtvuslik pingefaktor

2. PSCAD modelleerimisskeemi mudel

2.1. Mudeli algandmed

110 kV kõrgepingeliini mudeli loomiseks kasutati Elering AS omandisse kuuluva liini L186, Kohila ja Rapla alajaamade vahelise 110kV liini, füüsilisi ja elektrilisi parameetreid. Juhtmete paiknemist üksteise ja masti suhtes kirjeldavad Joonis 2.1 ja Tabel 2.1.



Joonis 2.1 110kV liini faaside paiknemise skeem [11]

Tabel 2.1. Kõrgepingeliini füüsilised andmed [11]

Juhe	Kaugus maapinnast [m]	Kaugust masti keskmest horisontaalselt [m]
Faas A	16,2	1,75
Faas B	13,2	1,75
Faas C	13,2	2,45
Piksekaitse 0	19,6	0

Kõrgepingeliini mudeli loomiseks vajalikud liinijuhtmete andmed on toodud tabelis Tabel 2.2.

Tabel 2.2 110kV liini faasijuhtmete andmed [11]

Juhtme tüüp	Kiudude arv juhtmes	Juhi raadius [mm]	Juhi mahtuvustakistus [Ω/km]	Juhi aktiivtakistus [Ω/km]
AC 185	28/7(35)	9,5	2,993	0,17

Lisaks liini parameetritele vajalikud elektrilised parameetrid:

- Süsteemi sagedus – 50Hz
- Juhtide arv süsteemis – 3 faasiline
- Süsteemi nimipinge – 110kV
- Pingeallika sisetakistus – 0,0001 Ω
- Ahela induktiivsus 0,25 H
- Lekketakistus – 1 000 000 Ω
- Põikimahtuvus faasi ja maa vahel – 0,025 μF
- Süsteemiosa summaarne tarbimine on 10MVA, mis on jaotatud faaside vahel sümmeetriliselt. Tarbimise aktiivvõimsuse ja reaktiivvõimsuse tangens on 0,3.

Simulatsioonimudelid kasutatud, väljaarvatud elektriliini, elektrilised parameetrite valiku aluseks on võetud Tallinna Tehnikaülikooli Inseneriteaduskonna Elektroenergeetika magistratuuri õppekavas oleva õppeaine Kõrgepingeseadmed õppematerjal.

2.2. Arvutusmudeli koostamine

Üks osa, mida antud töös uuritakse on transient - taastuvpingete sõltuvus lühise asukohast. Seega on vajalik kahe erineva modelleerimisskeemi koostamine. Lühiste puhul võimsuslüliti klemmidel asub lühisekoht kohe peale liini võimsuslülitit. Teisel juhul uuritakse taastuvpingeid erineva pikkusega elektriliini lõpus, antud töös kuni mõne kilomeetri pikkuse liini lõpus.

Kuna uurimise all on kolmefaasilise lühis, siis tuleb kõik seadmed skeemi koostamisel valida kolmefaasilised. Siinkohal tuleb arvestada pingeallika signaalide parameetrite, liini tüübi kui ka õige süsteemiosa tarbimise määramisega.

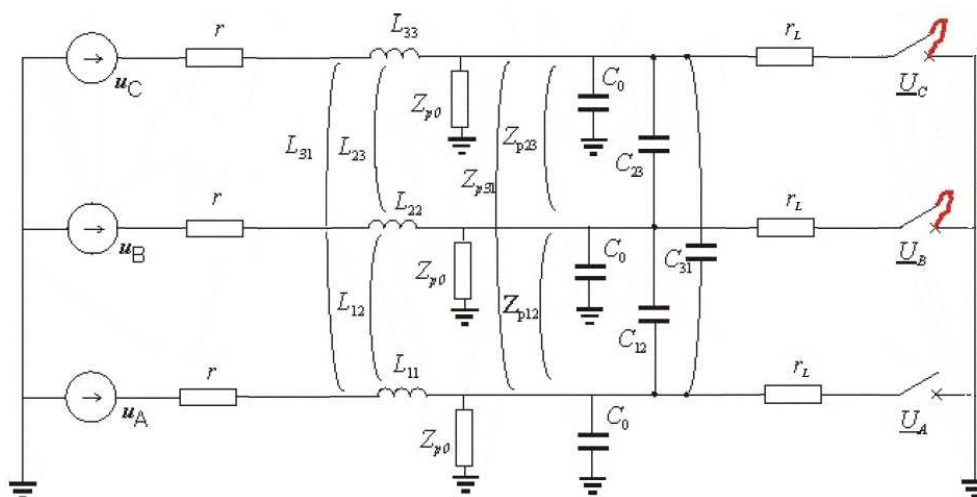
Pingeallika konfigureerimisel tuleb määratleda, mis tüüpi on pingeallika sisetakistus, kas pingeallika neutraal on maandatud ning kas tegu on alalispinge- või vahelduvpingeallikaga. Süsteemi pingetaset, algfaasinurka ehk algfaasi, süsteemisagedust ning pingeallika sisetakistust saab käisitsi soovi korral pingeallika kaudu sisestada ja muuta.

Võimsuslüliti puhul saab sisestada voolu väärtuse, mis väärtusel lüliti välja lülitub. Lisaks saab määratleda välja ja sisse lülitamise ajalise hetke.

Pinge ja voolu väärtuste väljatoomiseks kasutati ühefaasilisi volt- ja ampermeetreid.

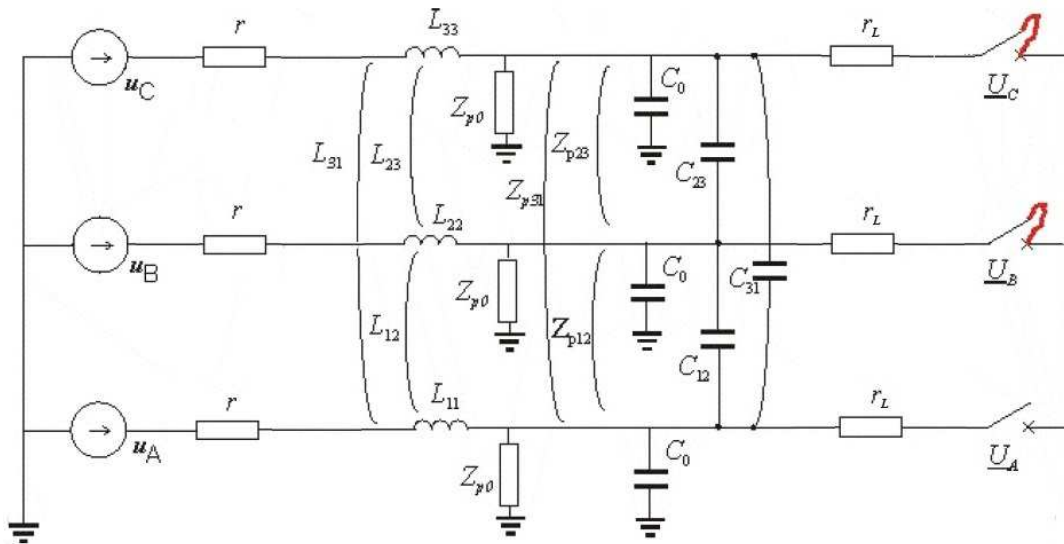
Skeem (Joonisel 3.1) algab kolmefaasiline pingeallikaga, peale mida on kõrgepingeliini võimsuslülitid. Seejärel 110kV elektriliin. Pingeallika ja liini võimsuslülitite vahele on paralleelühendusena ühendatud igasse faasi alajaama seadmeid kirjeldavad parameetrid - trafo tühijooksukaod, trafo mahtuvus maa suhtes ja alajaama lattide põikmahtuvus. Peale liini on kohe igasse faasi ühendatud võimsuslülitid, mis lülitavad süsteemi võimalusel ühendusse nii maaga kui omavahel faasid kokku. Nii on võimalik genereerida lühist soovitud ajahetkel. Iga faas modelleeritud skeemis lõpeb sama suure tarbimisega, mis summaarselt on 10MVA. Tarbimine on sümmeetriliselt ära jagatud kõigi faaside vahel. Aktiiv-ja näivkoormuse suhte $\tan \varphi$ on võetud 0,3.

Modelleerimisskeemi sisuliseks arusaamiseks on välja toodud askeem nii kolmefaasilise lühise puhul maaga (Joonis 2.3) kui maata (Joonis 2.4) ühenduse korral.



Joonis 2.3. Kolmefaasiline maaga lühise korral transient-taastuvpinge uurimise askeem

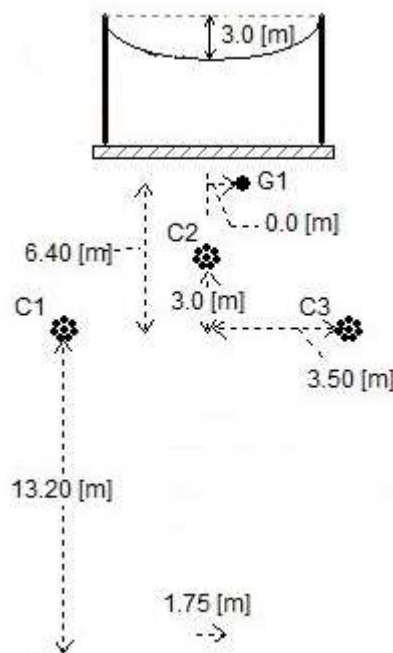
[3]



Joonis 2.4. Kolmefaasiline maata lühise korral transient-taastuvpinge uurimise aseskeem

[3]

Peale liini füüsiliste andmete sisestamist kuvab programm liini faasijuhtmete asetuse masti ja maa suhtes (Joonis 2.4).



Joonis 2.5. 110kV liini ehitus [12]

3. Transient-taastuvpingete uurimine

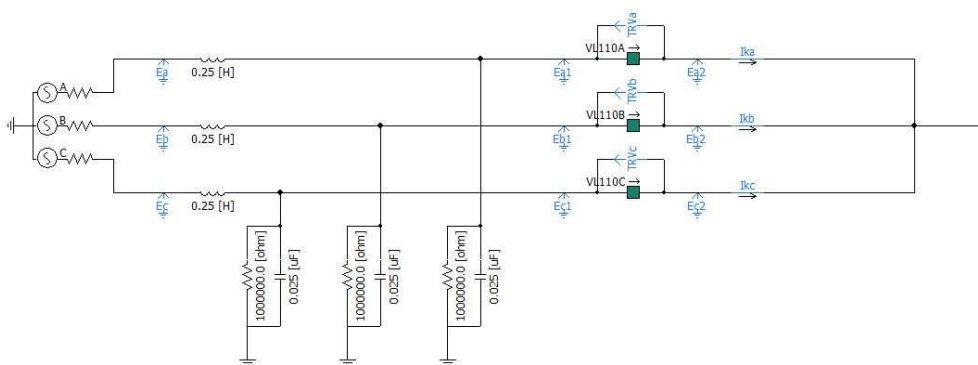
Taastuvpingete uurimise aluseks võeti Tallinna Tehnikaülikooli Inseneriteaduskonna Elektroenergeetika magistratuuri õppekavas oleva õppeaine Kõrgpingeseadmed laborijuhendid.

3.1. Transient-taastuvpingete uurimine võimsuslülitite klemmidel kolmefaasilise maaga lühise väljalülitumisel

Koostati mudel lühiste väljalülitumisel tekkinud taastuvpingete uurimiseks (Joonis 2.2). Uuriti tekkinud taastuvpingeid erinevatel võrguparameetritel ja kuidas nende parameetrite muutus avaldab mõju taastuvpingetele. Laboratoorses juhendis on tegemist ühefaasiliste skeemidega. Antud töös uuriti kolmefaasilist skeemi. Ühefaasilise ja kolmefaasilise skeemi võrdlusmomendi tekitamise eesmärgil jäeti muudetud võrguparameetrite väärtused samaks kolmefaasilises skeemis, mis nõuti õppeaine laborijuhendites.

Kõigepealt uuriti, kuidas avaldab lühiste väljalülitumisel tekkinud taastuvpingetele mõju võrguahela induktiivsuse muutus. Mõõdetavateks suurusteks olid taastuvpinge maksimaalväärtus, aeg, millal taastuvpinge saavutas maksimaalväärtuse ja sellele järgneva perioodi ajahetk, millal taastuvpinge saavutas amplituudväärtuse arvutamaks taastuvpinge sagedust. Uurimistulemused on väljatoodud tabelis Tabel 3.1

Skeemi käitamisel tekib lühis koheselt, kuna lühise puudumisel on tegemist tühijooksul oleva pingellikaga ja lühise tekkimisel tekib aperioidiline komponent, millest tulenevalt on ka mõõtetulemused mõjutatud. Võimsuslülitid saavad väljalülituskäsu ajahetkel 0,3 sekundit. Kuna võimsuslülititele on määratud väljalülitumine voolu nullväärtusel, siis võimsuslülitid lülituvad tegelikkuses välja üksteise järel võrdsete 20/3 ms intervallidega.

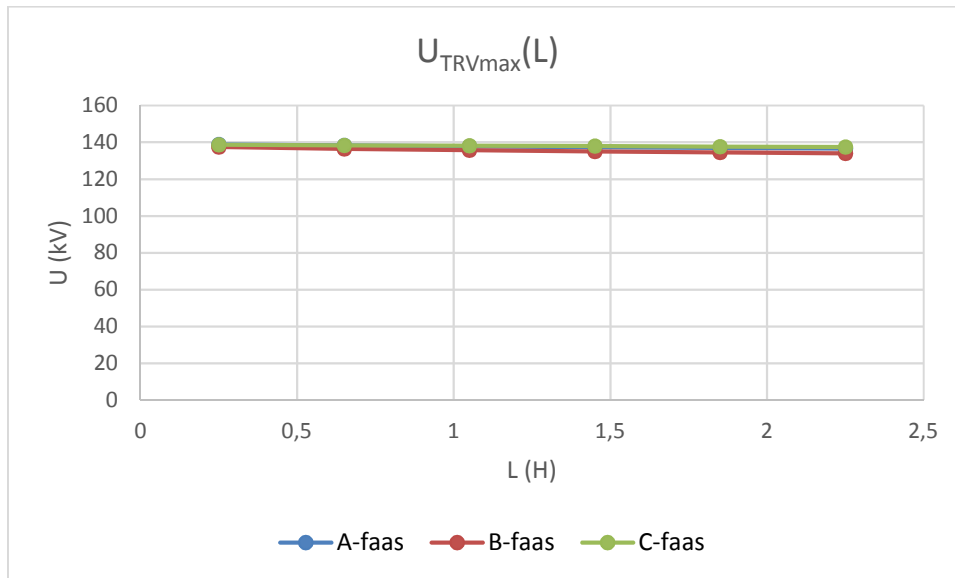


Joonis 3.1 Arvutusmudeli skeem uurimiseks lühiseid võimsuslülitite klemmidel

Tabel 3.1 Induktiivsuse muutus transient-taastuvpingete uurimisel

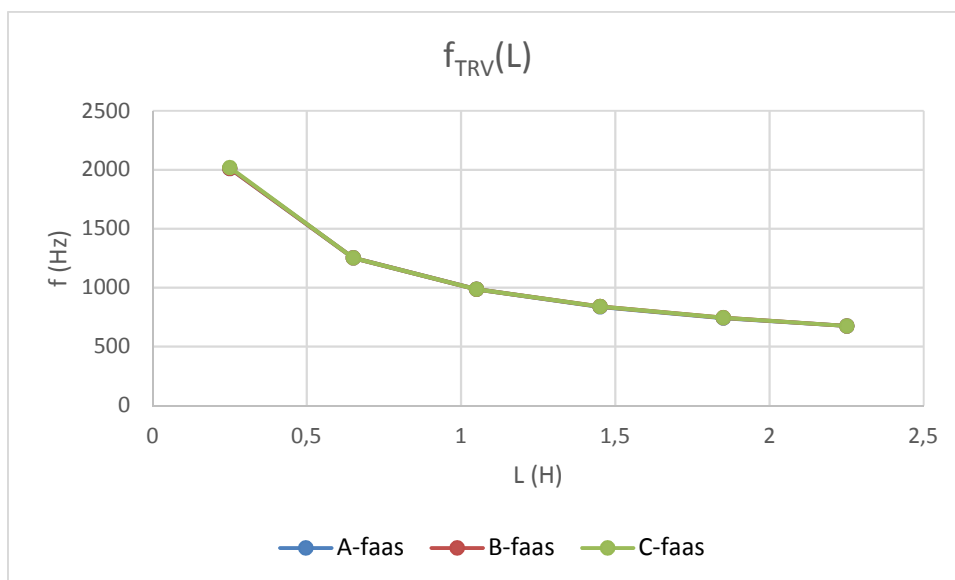
A-faas	L H	0,25	0,65	1,05	1,45	1,85	2,25
	U_{TRVmax} kV	138,89	138,28	137,78	137,34	136,94	136,55
	$t_{TRVmax1}$ s	0,305248	0,305401	0,30551	0,3056	0,30567	0,30574
	$t_{TRVmax2}$ s	0,305745	0,306199	0,30652	0,30679	0,30702	0,30722
	f_{TRV} Hz	2012,07243	1253,13283	985,222	838,223	742,942	674,764
B-faas	L H	0,25	0,65	1,05	1,45	1,85	2,25
	U_{TRVmax} kV	137,47	136,49	135,74	135,09	134,51	133,98
	$t_{TRVmax1}$ s	0,302264	0,302417	0,30252	0,30261	0,30269	0,30276
	$t_{TRVmax2}$ s	0,302761	0,303216	0,30354	0,3038	0,30403	0,30424
	f_{TRV} Hz	2012,07243	1251,56446	985,222	838,926	744,048	674,764
C-faas	L H	0,25	0,65	1,05	1,45	1,85	2,25
	U_{TRVmax} kV	138,65	138,39	138,16	137,93	137,71	137,48
	$t_{TRVmax1}$ s	0,308233	0,308384	0,30849	0,30858	0,30866	0,30873
	$t_{TRVmax2}$ s	0,308728	0,309183	0,30951	0,30977	0,31	0,31021
	f_{TRV} Hz	2020,20202	1251,56446	985,222	838,926	743,494	675,219

Uuriti taastuvpinge maksimaalset hetkväärtuse sõltuvust ja taastuvpinge vabakomponendi sagedust võrgu induktiivsusest.



Joonis 3.2. Taastuvpinge maksimaalse hetkväärtuse sõltuvus võrgu induktiivsusest

Mõõtetulemustest selgus, et transient-taastuvpinge suurim väärtus võrgu induktiivsuse muutudes on suhteliselt väike. Lühise lahutamise ohutuse seisukohalt ei oma võrgu induktiivsuse muutus erilist mõju.



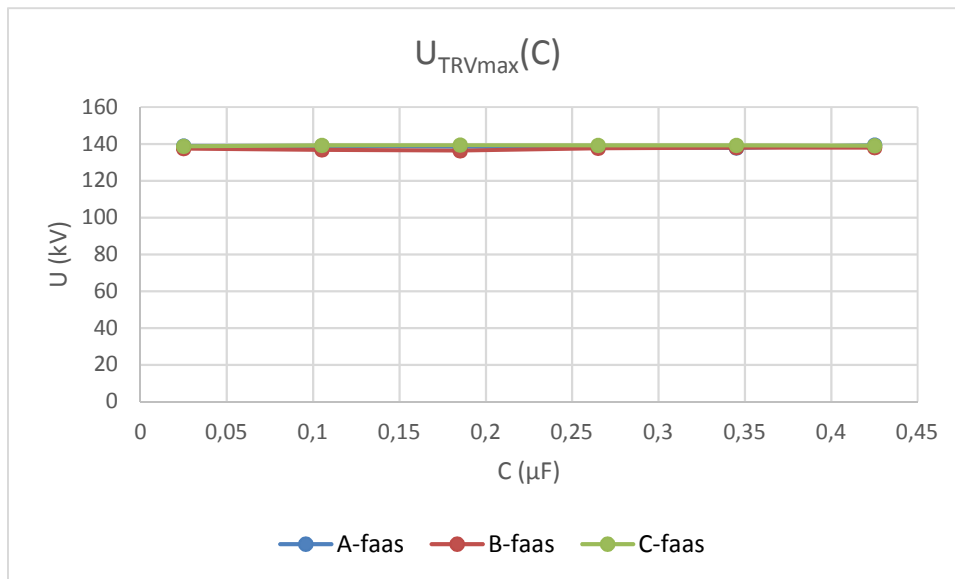
Joonis 3.3. Taastuvpinge vabakomponendi sageduse sõltuvus võrguahela induktiivsuse muutusest

Taastuvpinge vabakomponendi sagedus aga väheneb võrgu induktiivsuse suurenedes. (Joonis 3.3.)

Uuriti taastuvpinge maksimaalse hetkväärtuse ja vabakomponendi sageduse sõltuvust põikimahtuvusest. Mõõletulemused on tabelis Tabel 3.2.

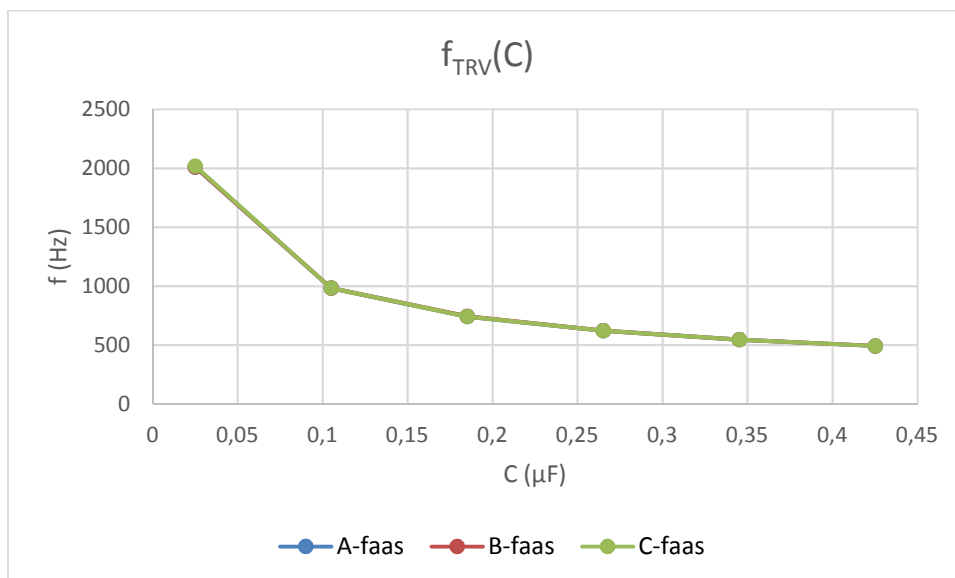
Tabel 3.2 Põikmahtuvuse muutus taastuvpingete uurimisel

A-faas	C μF	0,025	0,105	0,185	0,265	0,345	0,425
	U_{TRVmax} kV	138,89	138,85	138,54	138,18	137,82	139,32
	t_{TRVmax1} s	0,305248	0,305508	0,30567	0,3058	0,30592	0,31524
	t_{TRVmax2} s	0,305745	0,306524	0,30702	0,30741	0,30775	0,31727
	f_{TRV} Hz	2012,07243	984,251969	742,942	621,504	545,852	493,097
B-faas	C μF	0,025	0,105	0,185	0,265	0,345	0,425
	U_{TRVmax} kV	137,47	136,81	136,33	137,69	138,02	137,93
	t_{TRVmax1} s	0,302264	0,302523	0,30269	0,31172	0,31124	0,31225
	t_{TRVmax2} s	0,302761	0,303539	0,30403	0,31332	0,31307	0,31428
	f_{TRV} Hz	2012,07243	984,251969	743,494	622,665	546,448	493,097
C-faas	C μF	0,025	0,105	0,185	0,265	0,345	0,425
	U_{TRVmax} kV	138,65	139,23	139,31	139,27	139,17	139,07
	t_{TRVmax1} s	0,308233	0,308493	0,30866	0,30879	0,3089	0,31823
	t_{TRVmax2} s	0,308728	0,309509	0,31001	0,3104	0,31074	0,32026
	f_{TRV} Hz	2020,20202	984,251969	742,942	622,278	545,852	493,097



Joonis 3.4. Transient-taastuvpinge tippväärtuse sõltuvus faaside põikimahtuvusest maa ja faasi vahel

Mõõtetulemused näitavad, et ka põikimahtuvuse muutmine ei mõjuta transient-taastuvpinge suurimat väärtust märgatavalt.(Joonis 3.4.)



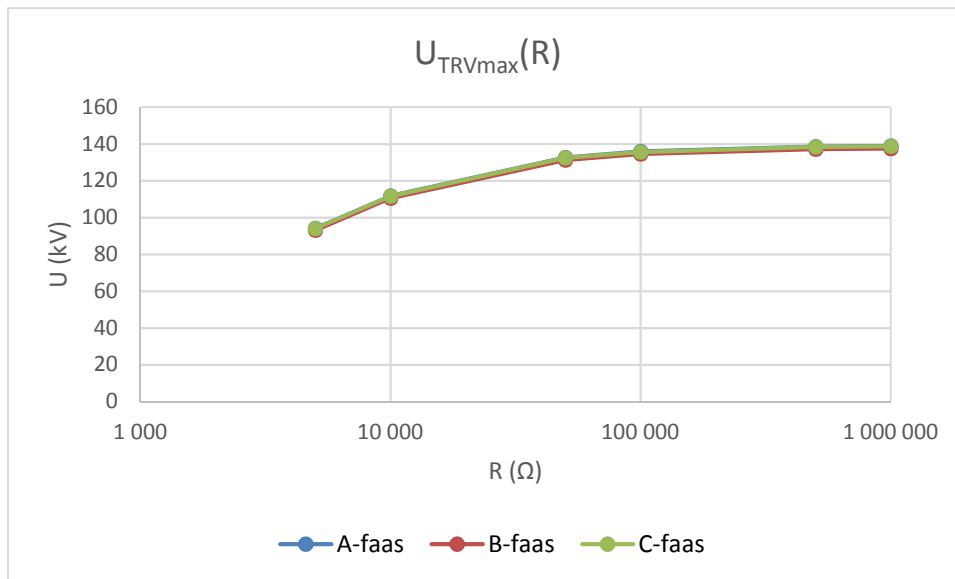
Joonis 3.5. Transient-taastuvpinge vabakomponendi sageduse sõltuvus faasi ja maa vahelise põikimahtuvusest

Leiti, et mida suurem on mahtuvus faaside ja maa vahel, seda madalam on taastuvpinge vabakomponendi sagedus.(joonis 3.5.)

Kolmandaks uuriti taastuvpinge maksimaalset hetkväärtuse ja taastuvpinge vabakomponendi sageduse sõltuvust võrguahela lekketakistusest.

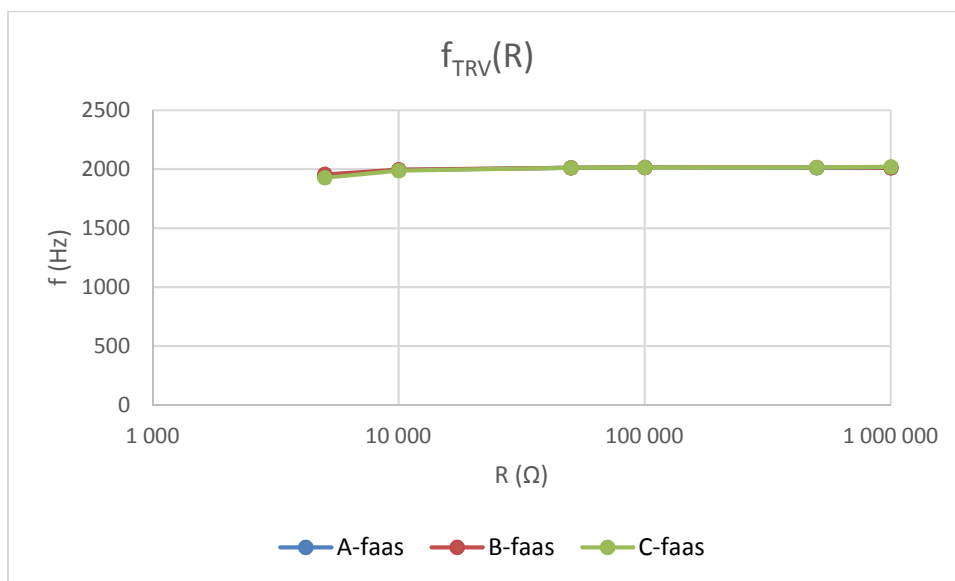
Tabel 3.3. Lekketakistuse muutus taastuvpingete uurimisel

A-faas	R Ω	1 000 000	500 000	100 000	50 000	10 000	5000
	U_{TRVmax} kV	138,89	138,55	135,87	132,67	111,77	94,12
	$t_{TRVmax1}$ s	0,305248	0,305248	0,30525	0,30525	0,30525	0,30526
	$t_{TRVmax2}$ s	0,305745	0,305745	0,30575	0,30575	0,30575	0,30578
	f_{TRV} Hz	2012,072	2012,072	2016,13	2012,07	1992,03	1945,53
B-faas	R Ω	1 000 000	500 000	100 000	50 000	10 000	5000
	U_{TRVmax} kV	137,47	137,13	134,47	131,29	110,59	93,09
	$t_{TRVmax1}$ s	0,302264	0,302264	0,30226	0,30226	0,30227	0,30228
	$t_{TRVmax2}$ s	0,302761	0,30276	0,30276	0,30276	0,30277	0,30279
	f_{TRV} Hz	2012,07	2016,13	2016,13	2012,07	1996,01	1956,95
C-faas	R Ω	1 000 000	500 000	100 000	50 000	10 000	5000
	U_{TRVmax} kV	138,65	138,31	135,64	132,44	111,6	94,02
	$t_{TRVmax1}$ s	0,308233	0,308232	0,30823	0,30823	0,30824	0,30825
	$t_{TRVmax2}$ s	0,308728	0,308728	0,30873	0,30873	0,30874	0,30877
	f_{TRV} Hz	2020,202	2016,129	2016,13	2012,07	1988,07	1926,78



Joonis 3.6. Taastuvpinge tippväärtuse sõltuvus lekkestakistusest faasi ja maa vahel

Lekkestakistuse vähendamisel leiti, et taastuvpinge tippväärtus vastavalt langes. Lekkestakistuse ja taastuvpinge tippväärtuse sõltuvus toodud välja joonisel 3.6.



Joonis 3.7. Taastuvpinge vabakomponendi sageduse sõltuvus lekkestakistusest

Mõõtetulemustest leiti, et kui vähendada aktiivtakistust faasi ja maa vahel, siis teatud hetkest hakkab transient-taastuvpinge vabakomponendi sagedus langema. (Joonis 3.7.) Antud parameetritega skeemi juures leiti, et sagedus hakkas langema 100 000 oomist ja madalamate takistuste juures. Sageduse muutus, kuigi, on antud suuruses muutujate juures võrdlemisi väike.

3.2. Transient-taastuvpingete uurimine sõltuvalt liini pikkusest lähilühiste puhul

Lühiste väljalülitumisel tekkinud taastuvpingeid uuriti võrdlemisi väikeste liinipikkuste juures. Taastuvpingete uurimiseks koostati modelleerimisskeem kõrgepingeliiniga ja 3-faasilise tarbijaga (Joonis 2.3). Lühis tekitati õhuliini lõpus hetkel 0,2 sekundit ja võimsuslülitit kontaktide avanemiseks anti signaal hetkel 0,3 sekundit. Elektrihaar kustub voolu nullväärtusel.

Modelleerimisskeemi käitamisel mõõdeti ja arvutati järgmisi väärtusi:

- 1) Lühise löökvoolu i_m (kA)
- 2) Lühisvoolu hetkelist maksimum- ja miinimumväärtust viimasel täisperioodil $i_{k\max}$ (kA), $i_{k\min}$ (kA)
- 3) Lühisvoolu perioodilise komponendi amplituud viimasel täisperioodil I_{km} (kA)

$$I_{km} = \frac{i_{k\max} - i_{k\min}}{2} \quad 3.1.$$

- 4) Lühisvoolu efektiivväärtus I_k (kA)

$$I_k = \frac{I_{km}}{\sqrt{2}} \quad 3.2.$$

- 5) Taastuvpinge tippväärtust $U_{TRV\max}$ (kV) ja tippväärtushetke t_{TRV} (s)
- 6) Taastuvpinge esimesele suurima tõusukiirusega löigu tipp-pinget U_{TRV-1} (kV) ja selle hetke t_{TRV-1} (s)
- 7) Kaare kustumise hetk t_{TRV-0} (s) hetkel kui $U_{TRV-0} = 0$
- 8) Taastuvpinge suurim tõusukiirus S (kV/ μ s)

$$S = \frac{U_{TRV\max1}}{t_{TRV\max1} - t_{TRV0}} \quad 3.3.$$

- 9) Saehammaspinge täisperioodi algus- ja lõpuaeg t_{k2-1} (s) ja t_{k2-2} (s) kahe järjestikuse naabermaksimumi kohal.
- 10) Saehammaspinge sagedus f_{k2} (Hz)

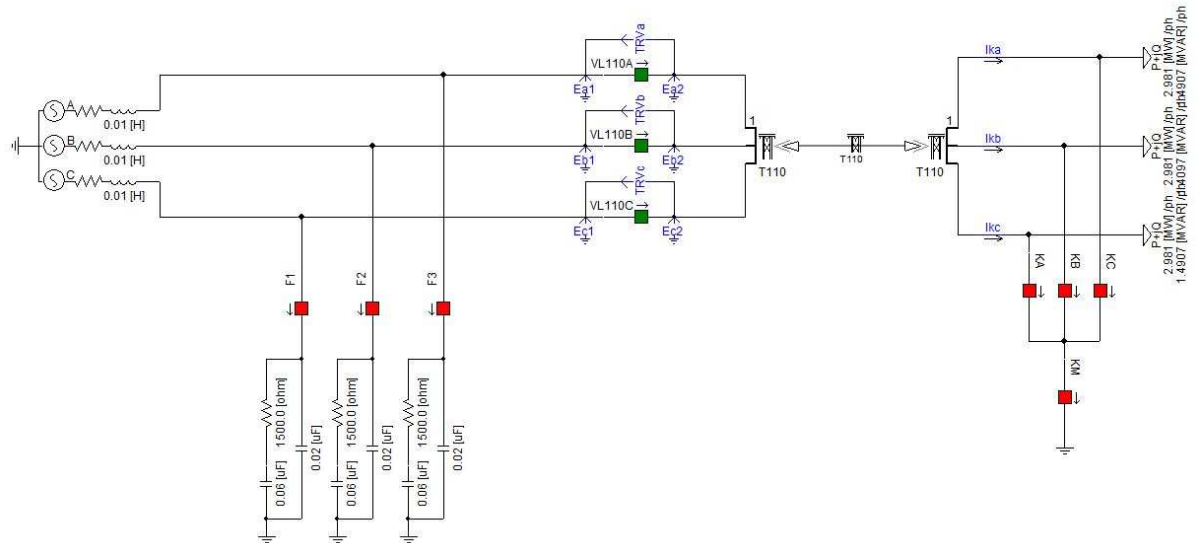
$$f_{k2} = \frac{1}{t_{k2-2} - t_{k2-1}} \quad 3.4.$$

- 11) Arvutada ja võrrelda saehammaspinge sagedust laboratoorse uurimise tulemusega ja teoreetiliselt arvutatuna.

$$f_{\text{teor}} = \frac{v}{4 \cdot l} \quad 3.5.$$

kus v – pingelaine levimiskiirus liinis (290 000 km/s)

l - liini pikkus km



Joonis 3.8. Lähilühiste väljalülitamisel tekkinud transient-taastuvpingete uurimiseks koostatud arvutusmideli skeem

Mõõtmistulemused igas faasis eraldi.

Tabel 3.4. Mõõtmistulemused A-faasis

l km	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8
Löökvool i_m kA	26,15	25,39	24,62	23,96	23,22	22,59	22,02
Vool i_{kmax} kA	18,15	17,68	17,34	16,71	16,59	16,32	15,81
Vool i_{kmin} kA	18,08	17,75	17,34	17,27	16,68	16,24	16,14
Lühisvool i_k kA	12,81	12,53	12,26	12,01	11,76	11,51	11,30
U_{TRVmax} kV	101,14	100,64	104,13	106,26	105,85	104,81	102,17
t_{TRVmax} s	0,304498	0,304486	0,304475	0,304525	0,304480	0,304446	0,304481
U_{TRV-1} kV	37,18	43,15	46,80	51,41	57,81	62,72	67,87
t_{TRV-1} kV	0,304456	0,304461	0,304446	0,304494	0,304448	0,304410	0,304444
t_{TRV-0} kV	0,304445	0,304448	0,304432	0,304479	0,304431	0,304492	0,304424
S kV/ μ s	9,194545	7,741538	7,437857	7,084000	6,226471	5,516316	5,108500
t_{k2-1} s	0,304455	0,304461	0,304446	0,304494	0,304448	0,304410	0,304444
t_{k2-2} s	0,304478	0,304485	0,304475	0,304525	0,304480	0,304429	0,304482
f_{k2} Hz	43478,26	41666,67	34482,76	32258,06	31250	52631,58	26315,79
f_{k2teor} Hz	45312,5	40277,78	36250	32954,55	30208,33	27884,62	25892,86

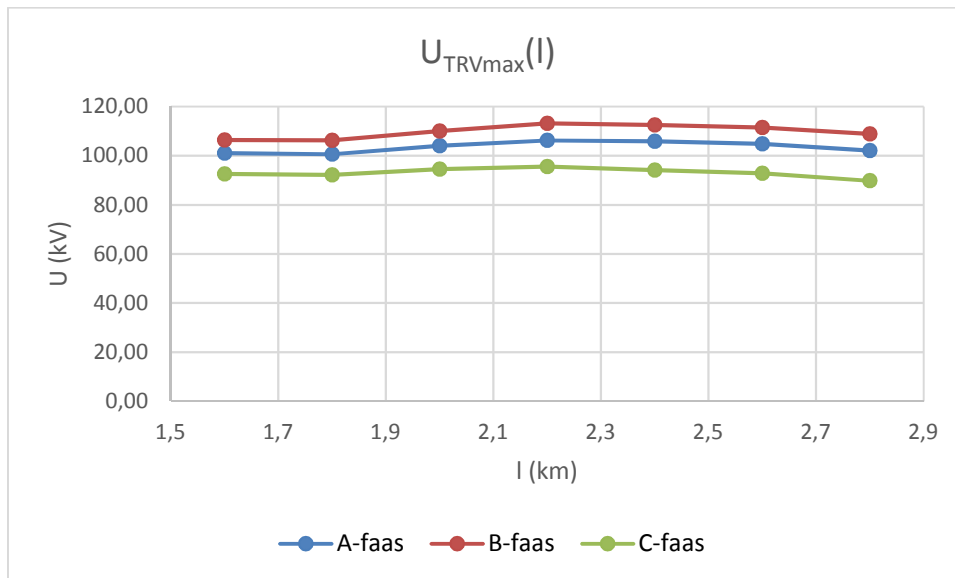
Tabel 3.5. Mõõtmistulemused B-faasis

l km	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8
Löökvool i_m kA	21,32	20,72	20,13	19,63	19,06	18,57	18,13
Vool i_{kmax} kA	18,14	17,74	17,34	17,13	16,65	16,26	16,05
Vool i_{kmin} kA	18,09	17,7	17,34	16,84	16,6	16,3	15,88
Lühisvool i_k kA	12,81	12,53	12,26	12,01	11,76	11,51	11,29
U_{TRVmax} kV	106,42	106,29	110,11	113,21	112,57	111,55	108,86
t_{TRVmax} s	0,300892	0,300849	0,300820	0,300824	0,300780	0,300745	0,300748
U_{TRV-1} kV	38,69	43,39	49,33	54,28	60,58	65,34	71,28
t_{TRV-1} kV	0,300849	0,300823	0,300792	0,300793	0,300748	0,300710	0,300711
t_{TRV-0} kV	0,300838	0,300811	0,300779	0,300779	0,300732	0,300692	0,300692
S kV/ μ s	3,517272	3,615833	3,794615	3,877143	3,786250	3,630000	3,751579
t_{k2-1} s	0,300849	0,300823	0,300792	0,300793	0,300748	0,300710	0,300711
t_{k2-2} s	0,300869	0,300848	0,300819	0,300824	0,300780	0,300746	0,300749
f_{k2} Hz	50000	40000	37037,04	32258,06	31250	27777,78	26315,79
f_{k2teor} Hz	45312,5	40277,78	36250	32954,55	30208,33	27884,62	25892,86

Tabel 3.6. Mõõtmistulemused C-faasis

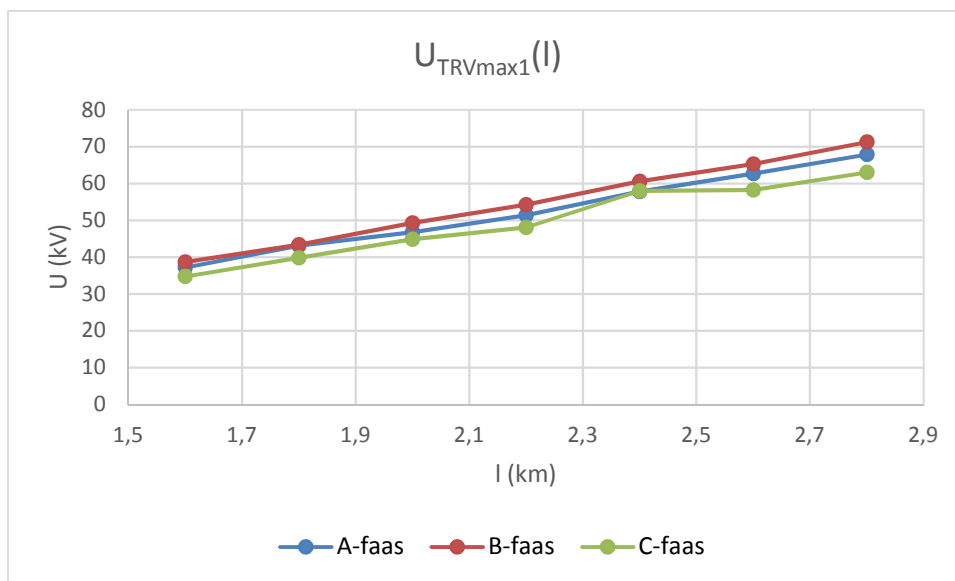
l km	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8
Löökvool i_m kA	22,34	21,74	21,16	20,62	20,07	19,58	19,11
Vool i_{kmax} kA	18,13	16,98	16,55	16,32	15,82	15,41	15,19
Vool i_{kmin} kA	17,38	17,7	17,33	16,85	16,61	16,29	15,89
Lühisvool i_k kA	12,55	12,26	11,98	11,73	11,47	11,21	10,99
U_{TRVmax} kV	92,56	92,26	94,58	95,60	94,17	92,87	89,82
t_{TRVmax} s	0,307556	0,307515	0,307489	0,307489	0,307456	0,307425	0,307434
U_{TRV-1} kV	34,75	39,82	44,86	48,07	57,96	58,29	63,01
t_{TRV-1} kV	0,307514	0,307488	0,307462	0,307459	0,307423	0,307391	0,307397
t_{TRV-0} kV	0,307503	0,307476	0,307448	0,307443	0,307407	0,307373	0,307377
S kV/ μ s	3,159090	3,318333	3,204286	3,004375	3,622500	3,238333	3,150500
t_{k2-1} s	0,307514	0,307488	0,307462	0,307459	0,307423	0,307391	0,307397
t_{k2-2} s	0,307536	0,307513	0,307489	0,307489	0,307457	0,307427	0,307434
f_{k2} Hz	45454,54	40000	37037,04	33333,33	29411,76	27777,78	27027,03
f_{k2teor} Hz	45312,5	40277,78	36250	32954,55	30208,33	27884,62	25892,86

Uuriti liinipikkuse mõju taastuvpinge maksimaalväärtusele U_{TRVmax} ja taastuvpinge esimesele suurima tõusukiirusega löigu tippväärtusele $U_{TRVmax1}$.



Joonis 3.9. Transient-taastuvpinge tippväärtuse sõltuvus liini pikkusest

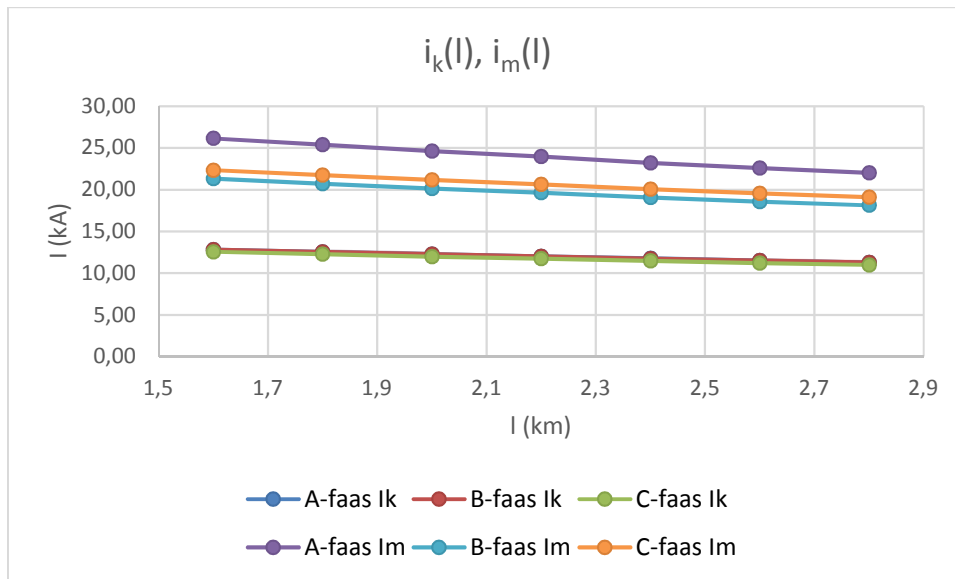
Leiti, et liini pikkuse muutust taastuvpinge tippväärtus märgatavalt ei sõltu.



Joonis 4.10. Transient-taastuvpinge esimese suurima tõusukiirusega löigu tipp-pinge sõltuvus liini pikkusest

Leiti, et taastuvpinge esimese suurima tõusukiirusega löigu tipp-pinge kasvab liini pikkuse suurenemisel.

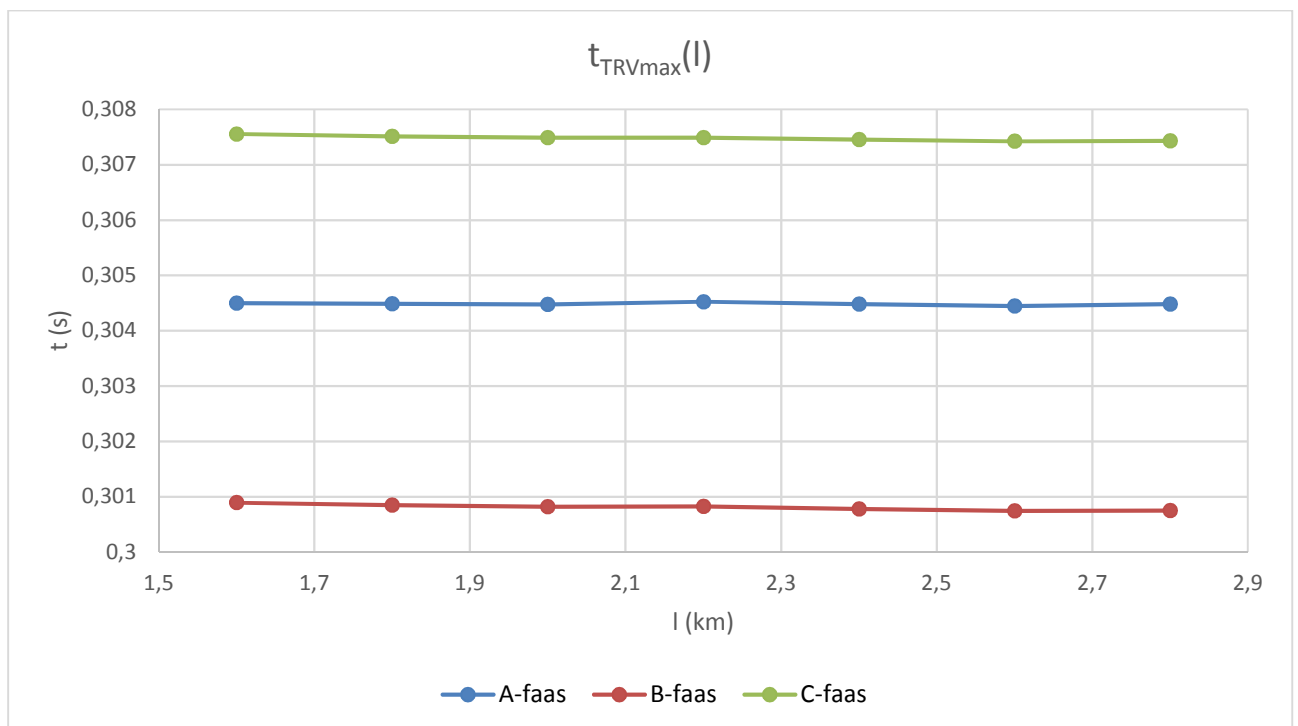
Uuriti lühise löökvoolu i_m ja lühisvoolu i_k sõltuvust liini pikkusest.



Joonis 4.7. Löökvoolu ja lühisvoolu sõltuvus liini pikkusest

Leiti, et mida pikem on elektriliin, seda madalam on nii löökvool kui lühisvool.

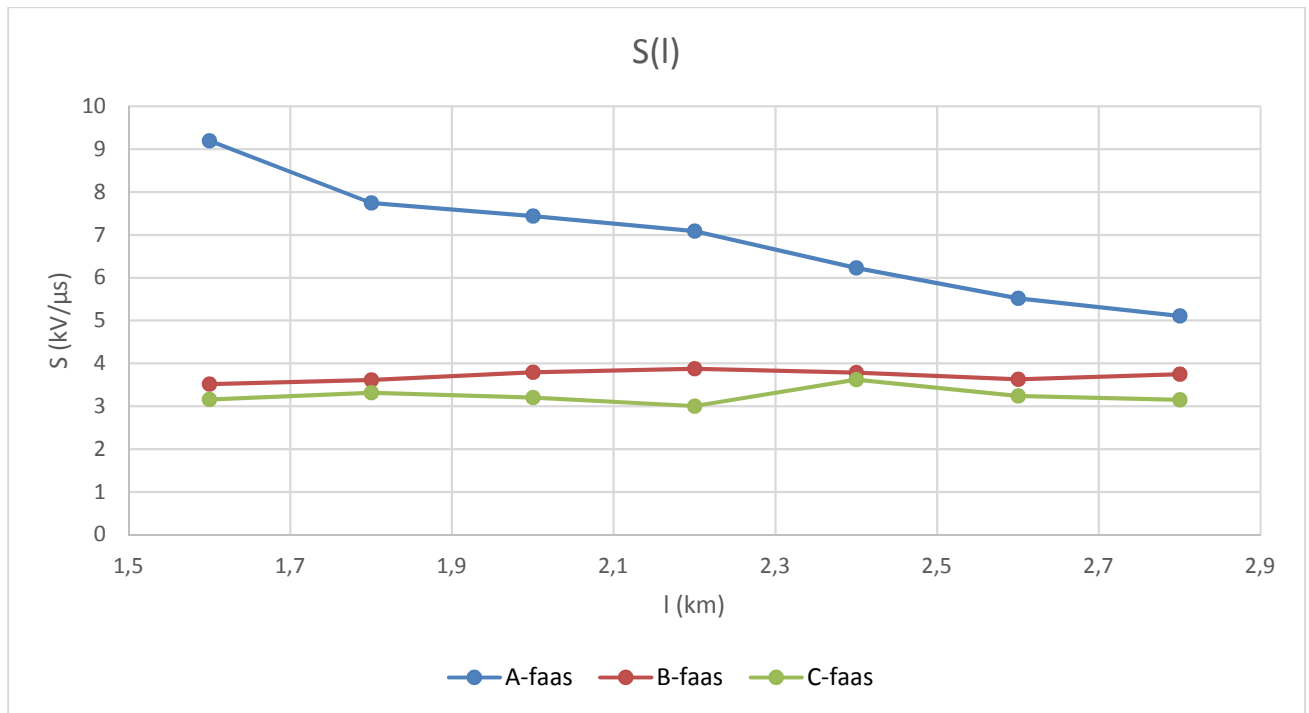
Uuriti taastuvpinge maksimaalväärtuse ajalise hetke sõltuvust liini pikkusest.



Joonis 3.17. Taastuvpinge maksimaalväärtuse ajalise hetke sõltuvust liini pikkusest

Leiti, et taastuvpinge tippväärtuse asukoht ajaskaalal liini pikkuse kasvades ei muutu.

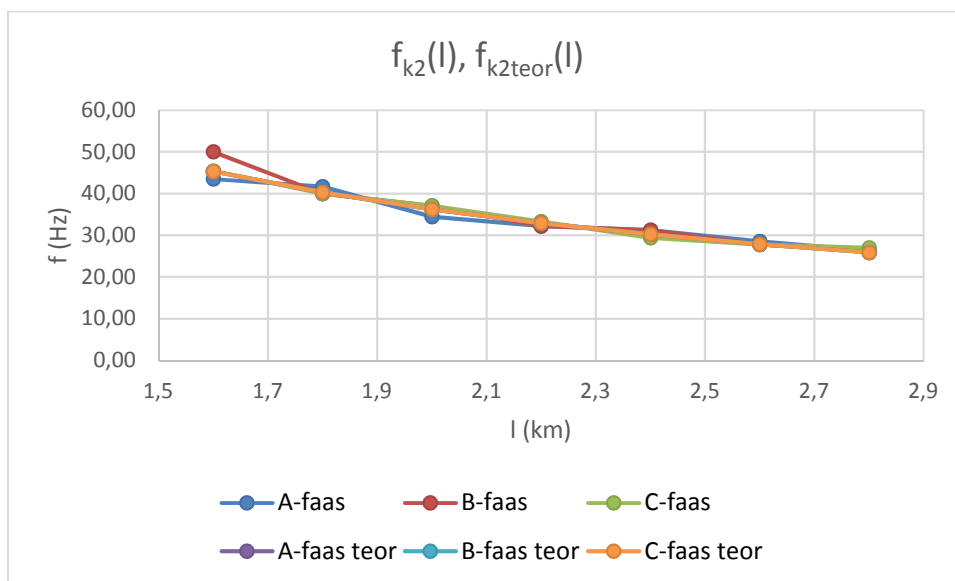
Uuriti taastuvpinge suurima tõusukiiruse sõltuvust liini pikkusest



Joonis 3.18. Taastuvpinge suurima tõusukiiruse sõltuvust liini pikkusest

Leiti, et taastuvpinge suurim tõusukiirus väheneb liini pikkuse kasvades.

Uuriti saehammaspinge arvutuslikul teel leitud sagedust f_{k2} ja võrreldi teoreetiliste väärtustega $f_{k2\text{teor}}$ arvestades pingelaine levimiskiiruse väärtust $v = 290\,000$ km/s. Uurimistulemused leiti igas faasis eraldi.



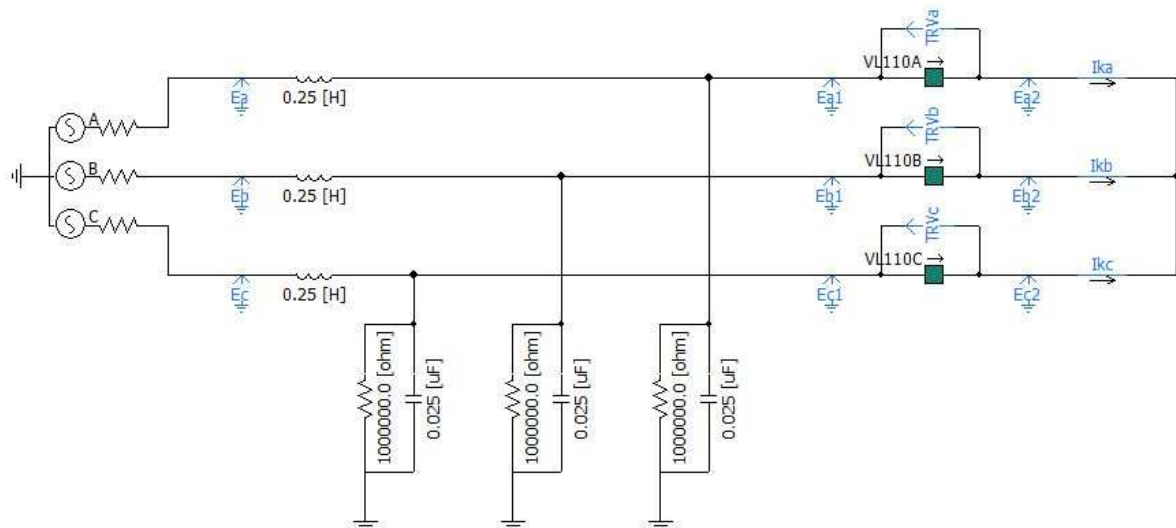
Joonis 4.12. Liinipoolsete kontaktidel peegeldunud saehammaspinge sageduse sõltuvus liini pikkusest

Leiti, et võimsuslüüti liinipoolsetel kontaktidel peegeldunud saehammaspinge sagedus langeb liini pikkuse suurenedes. Samuti leiti, et mõõdetud saehammaspinge sageduse väärtused on väga sarnased teoreetiliselt arvatatud sagedustega.

3.3. Transient-taastuvpingete uurimine võimsuslüüti klemmidel kolmefaasilise maata lühise väljalülitumisel

Punktis 3.1. ja 3.2. uuriti transient-taastuvpinget kolmefaasilise maatühendusega lühise väljalülitamisel. Edasi uuritakse veel teist lühise liiki – maata kolmefaasiline lühis.

Kolmefaasilise maata lühise väljalülitamisel tekkivate transient-taastuvpingete uurimiseks koostati uurimismudel (Joonis 3.22.)



Joonis 3.22. Uurimismudel kolmefaasilise maata lühise väljalülitamisel tekkinud taastuvpingete uurimiseks

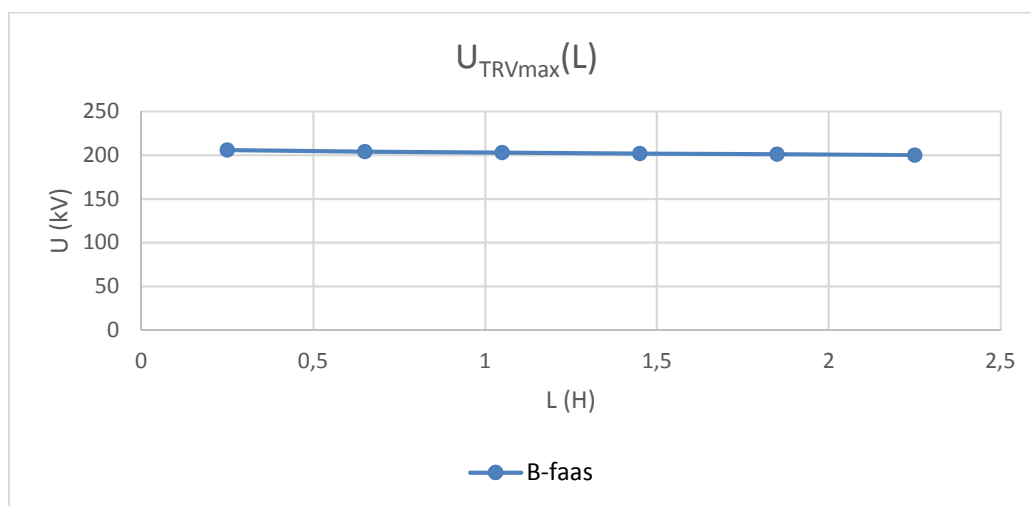
Kolmefaasilise maata lühise puhul on tingimused lühise lahutamiseks kõige raskemad. Punktis 1.3.1 käsitletud kolmefaasilise maata lühise teooriast näeme, et faasis, kus elektrikaar peale võimsuslüüti kontaktide eemaldumist, kõigepealt nullväärtuseni jõudis on taastuvpinge kõige tõsisem. Teooria ütleb, et transient-taastuvpinge summaarne suurim väärtus võib tõusta lausa 3 kordseks võrgusageduspinge amplituudväärtusega võrreldes. Teistes faasides on transient-taastuvpinge suurim väärtus madalam. Seega aruandes toodi välja selle faasi mõõtetulemused, kus voolu väärtus peale võimsuslüüti väljalülitumist kõige enne nulli jõudis, milleks antud uurimismudeli puhul on B-faas.

Muudetavad võrgu parameetrid muidu on samad, mis kolmefaasilise maaga lühise väljalülitamise uurimisel.

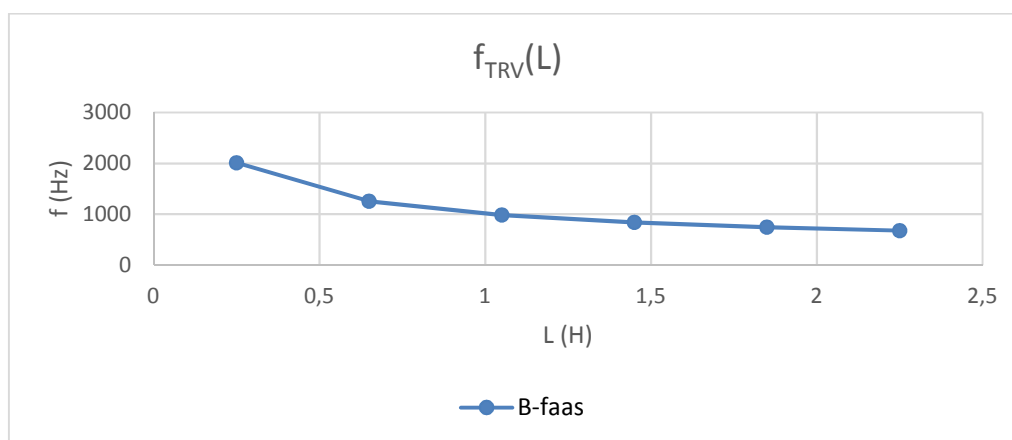
Tabel 3.7. Uurimistulemused võrgu induktiivsuse muutmisel kolmefaasilise maata lühise väljalülitamisel B-faasis

B-faas	L H	0,25	0,65	1,05	1,45	1,85	2,25
	U_{TRVmax} kV	205,94	204,32	203,09	202,04	201,09	200,23
	$t_{TRVmax1}$ s	0,302264	0,302418	0,302523	0,30261	0,302686	0,302757
	$t_{TRVmax2}$ s	0,302761	0,303215	0,303538	0,303805	0,304029	0,304234
	f_{TRV} Hz	2012,07	1254,70	985,22	836,82	744,60	677,04

Suurim transient-taastuvpinge väärtus esineb juhul, kus võrgu induktiivsus on 0,25 H. Mida suurem on võrgu induktiivsus, seda madalam on transient-taastuvpinge amplituudväärtus. Võrgu induktiivsuse kasvades langeb taastuvpinge vabakomponendi sagedus. (Joonis 3.23.)



Joonis 3.23. Taastuvpinge suurima väärtuse sõltuvus võrgu induktiivsusest kolmefaasilise maata lühise väljalülitumisel

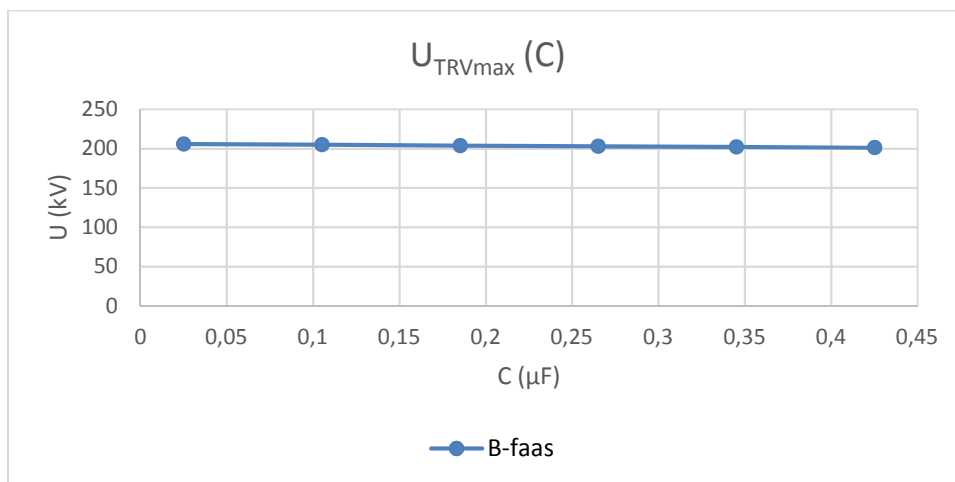


Joonis 3.24. Taastuvpinge vabakomponendi sageduse sõltuvus võrgu induktiivsusest kolmefaasilise maata lühise väljalülitumisel

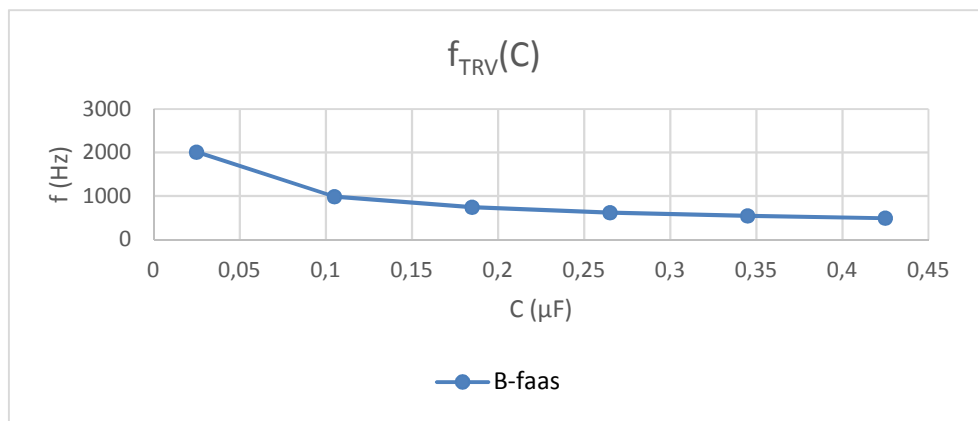
Tabel 3.8. Uurimistulemused põikimahtuvuse muutmisel kolmefaasilise maata lühise väljalülitamisel B-faasis

B-faas	C μF	0,025	0,105	0,185	0,265	0,345	0,425
	U_{TRVmax} kV	205,94	205,08	204,07	203,1	202,18	201,3
	t_{TRVmax1} s	0,302264	0,302522	0,302688	0,302816	0,302926	0,303027
	t_{TRVmax2} s	0,302761	0,303538	0,304032	0,304423	0,304757	0,305062
	f_{TRV} Hz	2012,07	984,25	744,04	622,27	546,14	491,40

Transient-taastuvpinge amplituudväärtus eriliselt nii väikse mahtuvuse muutuse juures ei muutu. See-eest mõjutab mahtuvuse muutus tugevamalt taastuvpinge vabakomponendi sagedust kui võrgu induktiivsuse muut. Mida suurem on põikimahtuvus, seda väiksem on taastuvpinge vabakomponendi sagedus.



Joonis 3.25. Taastuvpinge suurima väärtuse sõltuvus põikimahtuvusest kolmefaasilise maata lühise väljalülitumisel

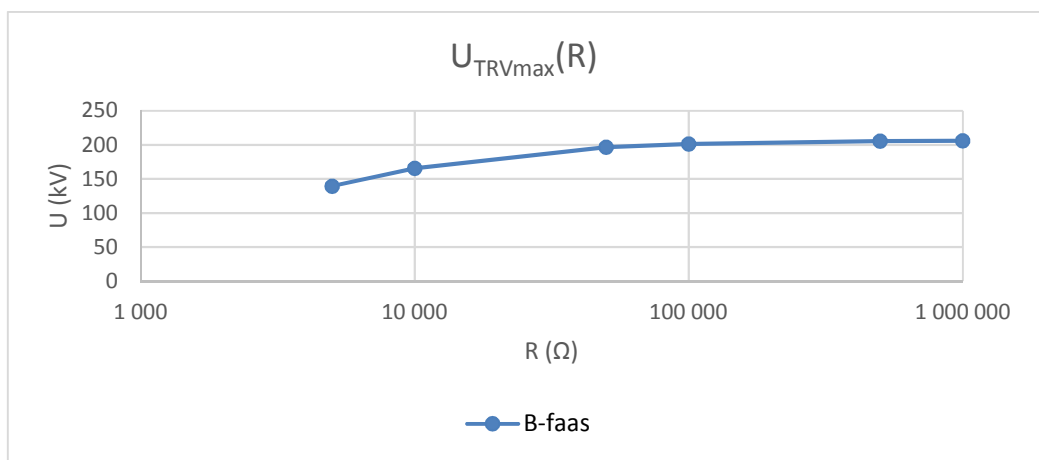


Joonis 3.26. Taastuvpinge vabakomponendi sageduse sõltuvus põikimahtuvusest kolmefaasilise maata lühise väljalülitumisel

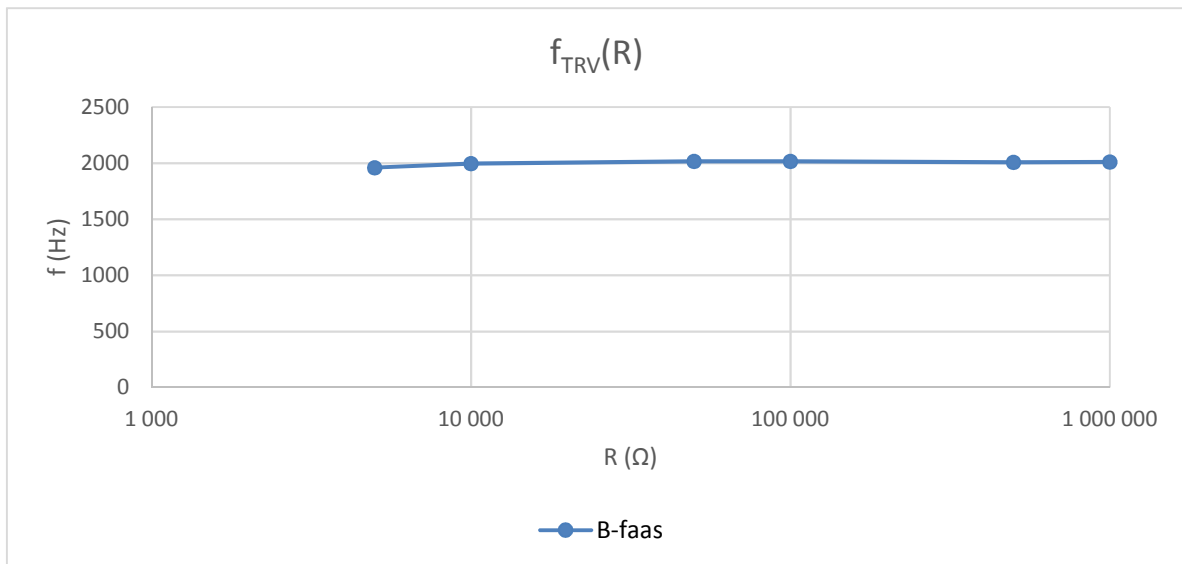
Tabel 3.9. Uurimistulemused lekketakistuse muutmisel kolmefaasilise maata lühise väljalülitamisel B-faasis

	$R \ \Omega$	1 000 000	500 000	100 000	50 000	10 000	5000
B-faas	U_{TRVmax} kV	205,94	205,44	201,46	196,71	165,72	139,53
	$t_{TRVmax1}$ s	0,302264	0,302263	0,302265	0,302265	0,302265	0,302278
	$t_{TRVmax2}$ s	0,302761	0,302761	0,302761	0,302761	0,302766	0,302788
	f_{TRV} Hz	2012,07	2008,03	2016,12	2016,12	1996,01	1960,78

Lekketakistuse vähendamisel transient-taastuvpinge suurim väärtus langeb. Taastuvpinge vabakomponendi sagedust eriliselt lekketakistuse muutus ei mõjuta.



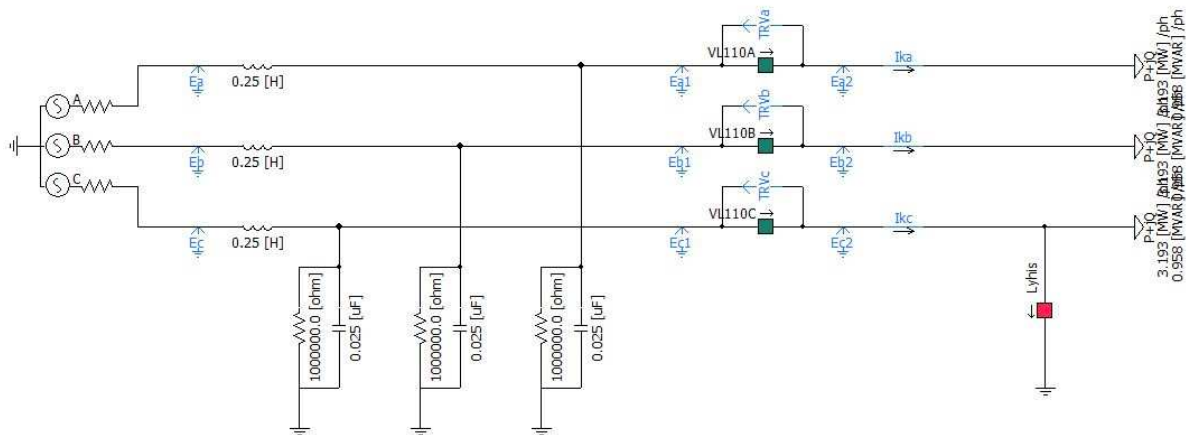
Joonis 3.27. Taastuvpinge suurima väärtuse sõltuvus lekketakistusest kolmefaasilise maata lühise väljalülitumisel



Joonis 3.28. Taastuvpinge vabakomponendi sageduse sõltuvus lekketakistusest kolmefaasilise maata lühise väljalülitumisel

3.4. Transient-taastuvpingete uurimine võimsuslüüti klemmidel ühefaasilise maaga lühise väljalülitumisel

Veel uuriti tekkivaid transient-taastuvpingeid lühise ühe faasi ja maa vahel väljalülitumisel. Selleks koostati järgmine uurimismudel (Joonis 3.28.)



Joonis 3.28. Uurimismudel ühefaasilise lühise väljalülitamisel tekkivate transient-taastuvpingete uurimiseks

Kolmefaasilise võrguosa konstantseks toimimiseks ühendati skeemi lõpuossa tarbimine 10 MVA, aktiiv-ja reaktiivvõimsuse suhet kirjeldavaks tangensiks võeti 0,3. Lühis genereeritakse ajahetkel 0,2s ja lülitatakse välja ajahetkel 0,3s. Kuna uurimise all on ühefaasiline lühis, siis lühis genereeriti ainult ühte faasi, milleks on faas C. Seega uurimistulemused toodi välja ainult C-faasi kohta.

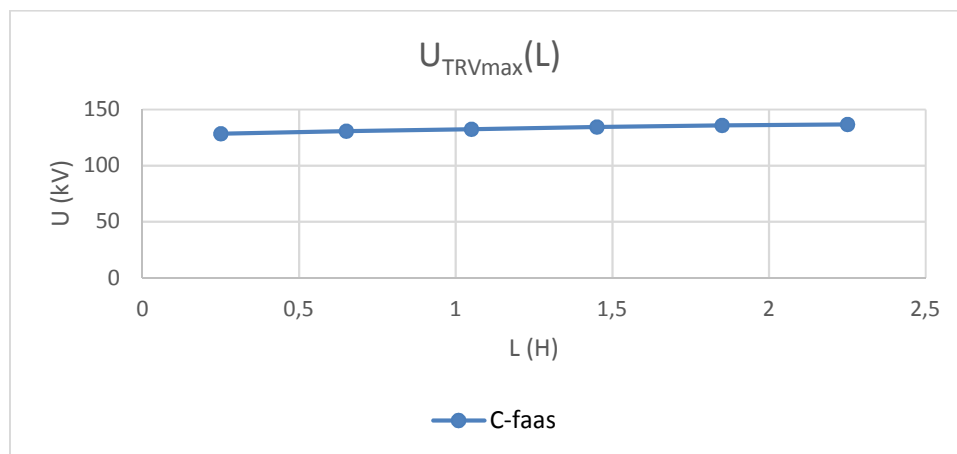
Muudetud võrguparameetrid on samad, mis eelnevates peatükkides.

Tabel 3.10. Uurimistulemused võrgu induktiivsuse muutmisel ühefaasilise lühise väljalülitamisel C-faasis

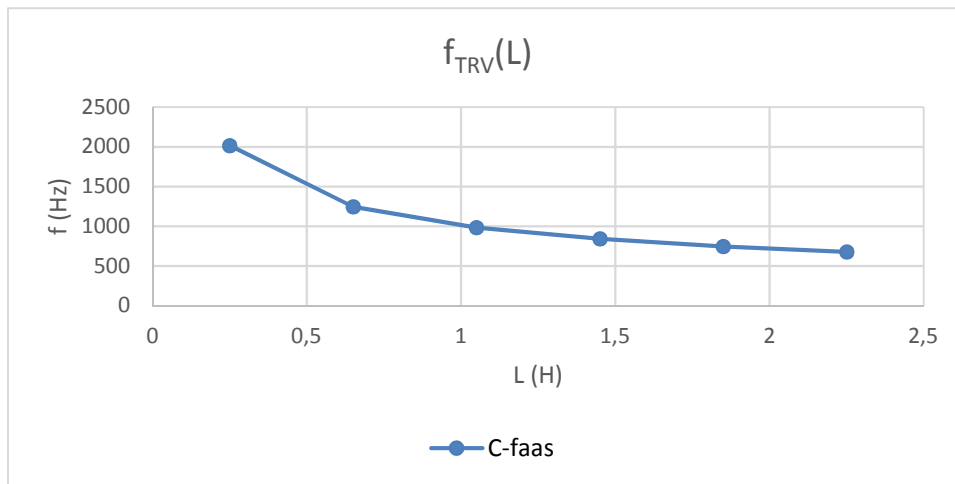
C-faas	L H	0,25	0,65	1,05	1,45	1,85	2,25
	U_{TRVmax} kV	128,49	130,63	132,48	134,52	135,88	136,68
	$t_{TRVmax1}$ s	0,308039	0,308179	0,30767	0,30792	0,30815	0,30836
	$t_{TRVmax2}$ s	0,308535	0,308982	0,30868	0,30911	0,30949	0,30984
	f_{TRV} kHz	2016,12903	1245,33001	984,252	840,336	746,269	675,676

On näha, et mida suuremaks on võrgu induktiivsus viidud, seda kõrgem on transient-taastuvpinge maksimaalväärtus. Taastuvpinge maksimaalväärtuse kasv on võrdlemisi lineaarne. Induktiivsuse kasv on täpselt 0,4 H võrra ja taastuvpinge maksimaalväärtuse kasv on ligemale 2 kV. (Joonis 3.29.)

Taastuvpinge vabakomponendi sagedus aga langeb võrgu induktiivsuse kasvamisel. Sageduse vähenemine on eksponentsiaalne. Algselt 0,25H pealt 0,65H peale võrgu induktiivsuse tõstmisel vähenes taastuvpinge vabakomponendi sagedus 770Hz. Kui tõsteti 1,85H pealt võrgu induktiivsus 2,25H peale siis taastuvpinge vabakomponent vähenes ligemale 70 Hz. (Joonis 3.30.)



Joonis 3.29. Taastuvpinge suurima väärtuse sõltuvus võrgu induktiivsusest ühefaasilise lühise väljalülitumisel



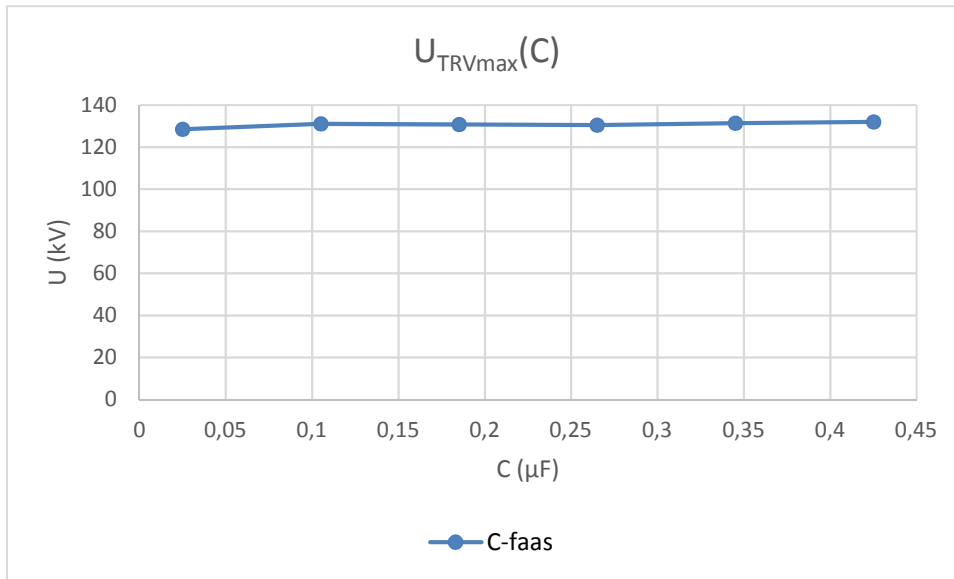
Joonis 3.30. Taastuvpinge vabakomponendi sageduse sõltuvus võrgu induktiivsusest ühefaasilise lühise väljalülitumisel

Tabel 3.11. Uurimistulemused põikimahtuvuse muutmisel ühefaasilise lühise väljalülitamisel C-faasis

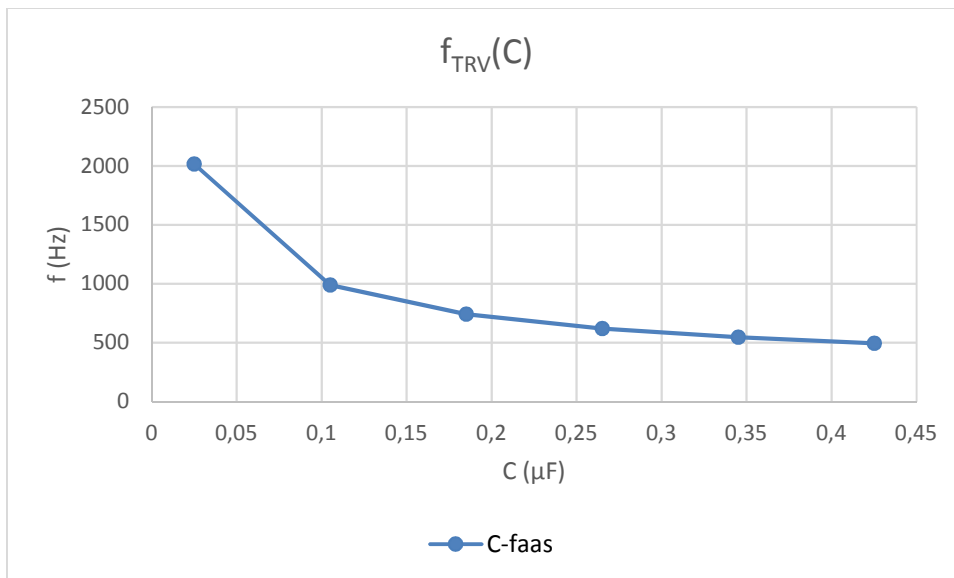
C-faas	C μF	0,025	0,105	0,185	0,265	0,345	0,425
	U_{TRVmax} kV	128,49	131,16	130,79	130,54	131,34	132
	t_{TRVmax1} s	0,308039	0,308326	0,30882	0,30761	0,30772	0,30783
	t_{TRVmax2} s	0,308535	0,309338	0,31017	0,30922	0,30956	0,30985
	f_{TRV} kHz	2016,12903	988,142292	741,84	619,963	545,852	495,05

Põikimahtuvuse suurendamisel transient-taastuvpinge maksimaalväärtus ei muutu selgelt kuhugi suunas. Selliste mahtuvuste muutuste juures on taastuvpinge muutus peaaegu märkamatu. Puudub selge suund kas taastuvpinge maksimaalväärtus kasvab põikimahtuvuse kasvades või kahaneb. (Joonis 3.31.)

Transient-taastuvpinge sagedus selgelt kahaneb põikimahtuvuse kasvamisega. Samamoodi nagu induktiivsuse kasvamisega kahaneb sagedus eksponentsiaalselt. Mahtuvuse kasvamisega 0,025 μF pealt 0,105 μF peale kahaneb taastuvpinge vabakomponendi sagedus ligemale 1 kHz. Suurendades põikimahtuvust 0,345 μF pealt 0,425 μF peale vähenes taastuvpinge vabakomponendi sagedus ligemale 50 Hz. (Joonis 3.32.)



Joonis 3.31. Taastuvpinge suurima väärtuse sõltuvus põikimahtuvusest ühefaasilise lühise väljalülitumisel



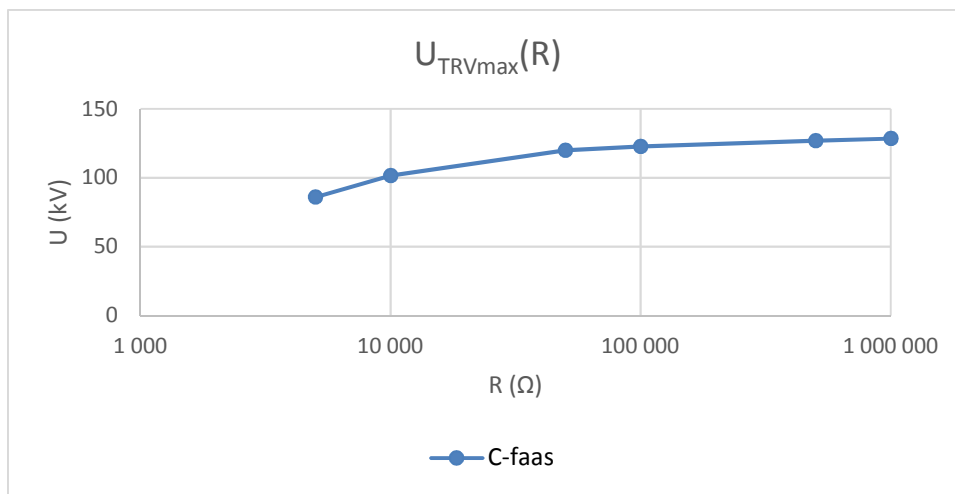
Joonis 3.32. Taastuvpinge vabakomponendi sageduse sõltuvus põikimahtuvusest ühefaasilise lühise väljalülitumisel

Tabel 3.12. Uurimistulemused lekketakistuse muutmisel ühefaasilise lühise väljalülitamisel C-faasis

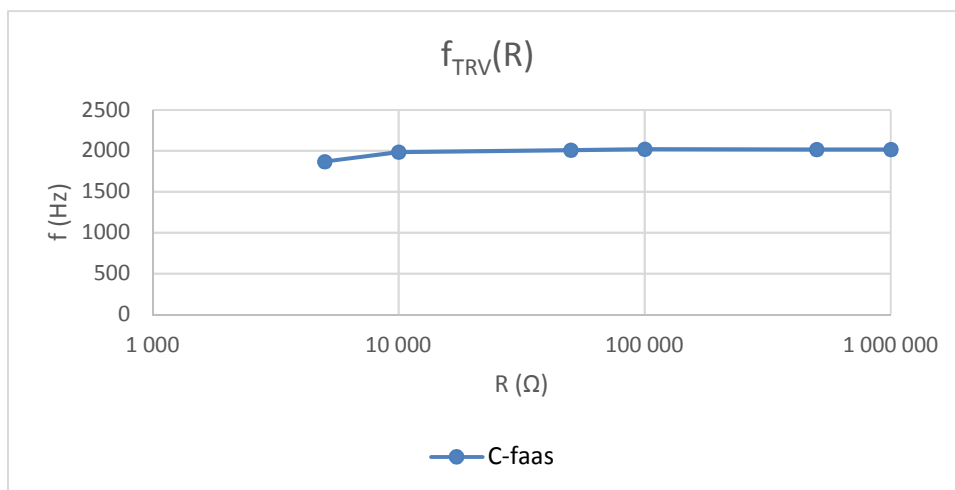
C-faas	R	Ω	1 000 000	500 000	100 000	50 000	10 000	5000
	U_{TRVmax}	kV	128,49	127,05	122,87	120,02	101,52	85,96
	$t_{TRVmax1}$	s	0,308039	0,308039	0,30705	0,30705	0,30708	0,30711
	$t_{TRVmax2}$	s	0,308535	0,308535	0,30754	0,30755	0,30758	0,30762
	f_{TRV}	kHz	2016,12903	2016,12903	2020,2	2008,03	1984,13	1953,13

Lekketakistuse vähendamisel transient-taastuvpinge maksimaalväärtus kahaneb. (Joonis 3.33.)

Taastuvpinge vabakomponendi sagedust lekketakistuse muutus eriti ei mõjuta. (Joonis 3.34.)



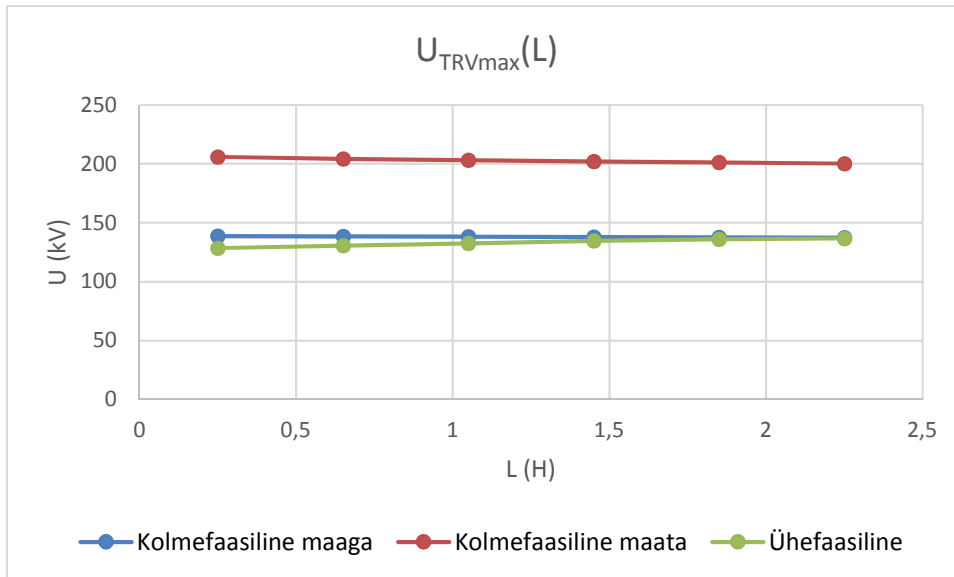
Joonis 3.33. Taastuvpinge suurima väärtuse sõltuvus lekketakistusest ühefaasilise lühise väljalülitumisel



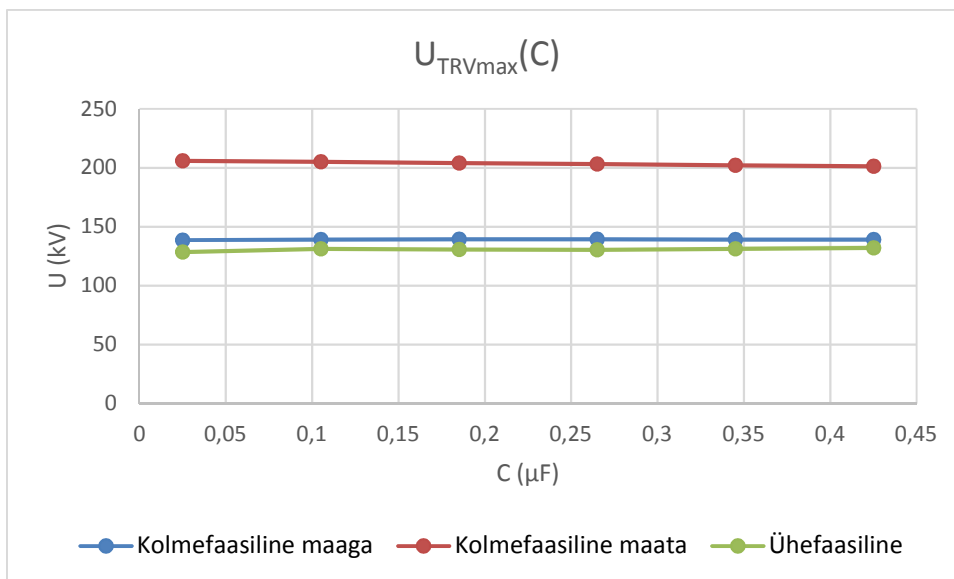
Joonis 3.34. Taastuvpinge vabakomponendi sageduse sõltuvus lekketakistusest ühefaasilise lühise väljalülitumisel

3.5. Transient-taastuvpingete võrdlus erinevat liiki lühiste väljalülitumisel

Taastuvpingete uurimiste esimeses, kolmandas ja neljandas osas uuriti transient-taastuvpingeid kolmefaasilise maaiühendusega, kolmefaasilise maaiühendusega ja ühefaasilise lühise väljalülitamisel. Peale uurimistulemuste selgumist leiti, et võrguahela induktiivsuse muutus ega põikimahtuvuse muutus transient-taastuvpinge suurimat väärtust ühelgi juhul oluliselt ei muuda (Joonis 3.35. ja Joonis 3.36.)



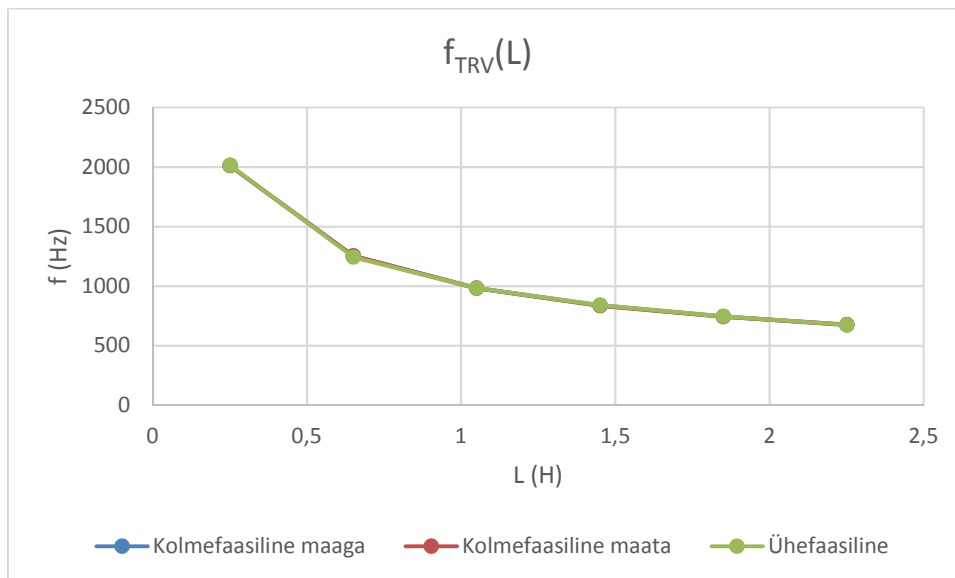
Joonis 3.35. Transient-taastuvpinge maksimaalväärtus erinevat liiki lühiste puhul võrgu induktiivsuse muutusel



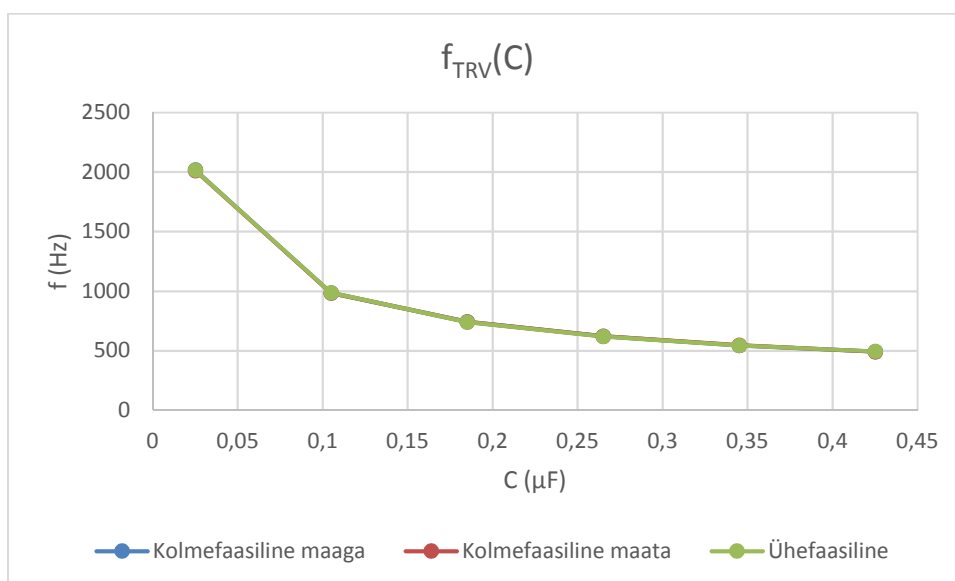
Joonis 3.36. Transient-taastuvpinge maksimaalväärtus erinevat liiki lühiste puhul põikimahtuvuse muutusel

Kolmefaasilise maata lühise väljalülitumisel tekkinud taastuvpingete maksimaalväärtused on suuremad kui ühefaasilise lühise või kolmefaasilise maahendusega lühise puhul, suurusjärk jääb 200-205kV lähedale. Kolmefaasilise maaga ja ühefaasilise lühise väljalülitamisel tekkinud taastuvpingete suurimad väärtuse jäävad samasse suurusjärku ehk 128 – 136kV.

Taastuvpinge vabakomponendi sagedust mõjutab võrguinduktiivsuse ja põikimahtuvuse muutus. Mahtuvuse ja induktiivsuse kasvades taastuvpinge vabakomponendi sagedus langeb. (Joonis.3.37. ja Joonis 3.38.)

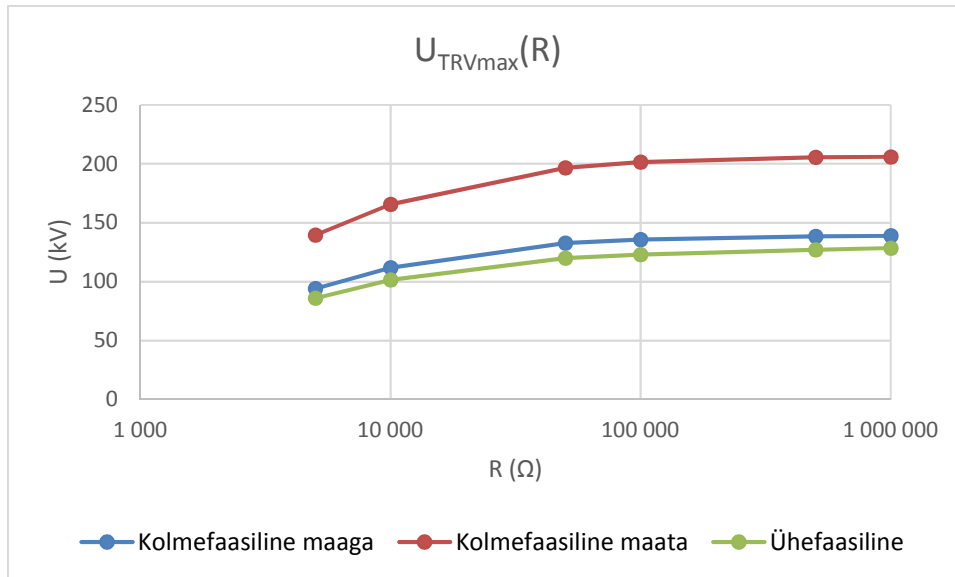


Joonis 3.37. Transient-taastuvpinge vabakomponendi sagedus erinevat liiki lühiste puhul võrgu induktiivsuse muutusel



Joonis 3.38. Transient-taastuvpinge vabakomponendi sagedus erinevat liiki lühiste puhul põikimahtuvuse muutusel

Lekketakistuse muutus mõjutab taastuvpinge suurimat väärtus. Mida väiksem on lekketakistus, seda madalam on taastuvpinge suurim väärtus (Joonis 3.39.)



Joonis 3.39. Transient-taastuvpinge maksimaalväärtus erinevate lühisliikide puhul lekketakistuse muutusel

4. Lõputöö kokkuvõte

Antud töö ülesanne oli uurida 110kV kõrgepingevõrgus tekkivate lühiste väljalülitamisel tekkinud transient-taastuvpingeid.

Uuriti kirjandusallikaid seoses varasemate transient-taastuvpingete uurimisega kõrgepinge- ja keskpinge võrkudes. Sellega seoses kõigepealt tehti selgeks taastuvpingeid mõjutavad võrguparameetrid ja taastuvpinge parameetrid, mis võrguseadmetele ohtlikult mõjuvad.

Transient-taastuvpingete uurimiseks vajaliku arvutusmudeli koostamiseks tutvuti programmiga PSCAD/EMTDC. Arvutusmudeli koostamisel tekkinud probleemidele aitas lahendusi leida instituudis töötav nooremteadur, härra Tanel Sarnet. Mudelis koostatud 110kV kõrgepingeliini modelleerimisel kasutati Elering AS omandisse kuuluva 110kV liini L186 „Kohila – Rapla“ füüsilisi ja elektrilisi andmeid.

Arvutusmudeliga transient-taastuvpinge uurimiste juhiste aluseks võeti õppeaines „Kõrgepingeseadmed“ laborijuhendid. Senistes laborijuhendites uuriti ühefaasilisi võrguskeeme, kuid antud magistritöös uuriti lisaks kolmefaasilisi võrguskeemi ja lisaks tegelikel reaalsetel andmetel tuginev kõrgepingeliini mudel. Sellest tulenevalt on magistritöö üheks väljundiks uus laboratoorne töö aines „Kõrgepingeseadmed“.

Töö uurimise osa tulemused on väljatoodud nii tabelite kujul kui graafiliselt illustreerimiseks erinevate võrguparameetrite ja transient-taastuvpinge omavahelist sõltuvust.

Uurimus koosnes kahest peamisest osast:

- 1) Esimeses osas uuriti, kuidas avaldab mõju võimsuslüliti klemmide vahetus läheduses tekkinud kolmefaasiliste maaga, maata ja ühefaasiliste lühiste väljalülitumisel tekkinud transient-taastuvpingete tippväärtusele ja taastuvpinge vabakomponendi sagedusele võrguahela induktiivsuse muutus, põikimahtuvuse muutus ja aktiivlekketaktuse muutus.

Leiti, et transient-taastuvpinge suurim amplituudväärtus esineb kolmefaasilise maata lühise väljalülitumisel, keskmiselt umbes 2,9 p.u. Kolmefaasilise maaga ja ühefaasilise lühise väljalülitumisel jäid taastuvpinge suurimad väärtuse samasse suurusjärku, ligemale 1,9 p.u. Võrgu induktiivsuse ja põikimahtuvuse suurenemisel taastuvpinge amplituudväärtus ei muutunud. Transient-taastuvpinge vabakomponendi sagedus võrgu induktiivsuse ja põikimahtuvuse kasvades aga väheneb ja sumbuvus kasvab. Antud võrguparameetrite puhul olid kõikide lühisliikide väljalülitumisel transient-

taastuvpinge sagedused samas suurusklassis, 0,68 kHz – 2kHz. Lekketakistuse muutmisel aga muutus taastuvpinge amplituudväärtus - mida väiksem lekketakistus, seda madalam transient-taastuvpinge amplituudväärtus. Taastuvpinge vabakomponendi sagedusele lekketakistuse muutus mõju ei avaldanud.

- 2) Teises osas uuriti liini pikkuse mõju lühisvoolu ja erinevatele taastuvpinge iseloomustavatele suurustele lähilühiste puhul. Uuritavad suurused oli lühise löökvool, lühisvoolu efektiivväärtus, taastuvpinge tippväärtus, tippväärtusaega, taastuvpinge esimesele suurima tõusukiirusega lõigu tipp-pinget, taastuvpinge suurimat tõusukiirust, võimsuslüliti liinipoolsete kontaktidel peegeldunud saehammaspinge sagedust, et seda võrrelda teoreetilise sagedusega.

Leiti, et transient-taastuvpinge amplituudväärtus liini pikkuse kasvades 1,6 km kuni 2,8 km märgatavalt ei muutu, keskmiselt 1,45 p.u. Suurim on taastuvpinge amplituudväärtus faasis, kus voolukatkestus toimub esimesena. Transient-taastuvpinge tõusukiirus liini pikkuse kasvades väheneb. Samuti kahaneb ka taastuvpinge vabakomponendi sagedus liini pikkuse kasvades, 44kHz – 26kHz. Viimaks leiti ka, et löökvool ja lühisvool vähenevad liini pikkuse kasvades.

Kirjandus

- [1] L. v. d. Sluis, *Transients in Power Systems*, John Wiley & Sons, Ltd, 2001.
- [2] E. AS, „Elering AS,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://elering.ee/vorguteenuste-kvaliteedinaitajad/>. [Kasutatud Mai 2017].
- [3] Ü. Treufeldt, *Kõrgepingeseadmete loengumaterjal*, Tallinn, 2014.
- [4] D. B. Mork, H. Bahirat, M. Ali ja P. KK, „Effects of Transient Recovery Voltages on Circuit Breaker Ratings,“ 2008.
- [5] J.-H. P. Y.-G. K. Hee-Cheol Lee, „Study on transient recovery voltage for testing of high-voltage circuit breakers,“ IEEE, Busan, 2015.
- [6] C.-i. OÜ, „www.c-intrade.ee,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://www.c-intrade.ee/public/Piirikud/piirikute_valik_ja_kasutamine_EPP-0888.pdf. [Kasutatud Mai 2017].
- [7] J. A. Martinez-Velasco, *Transient Analysis of Power Systems Solution Techniques, Tools and Applications*, New Delhi: John Wiley and Sons, Ltd, 2015.
- [8] I. S. Association, *IEEE Guide for the Application of Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers C37.011-2011*, New York: IEEE, 2011.
- [9] I. 60071-2, „Insulation co-ordination Part 2: Application guide,“ IEC, 1996.
- [10] ABB, „ABB toodete koduleht,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://new.abb.com/high-voltage/AIS/selector/ltb-d>. [Kasutatud 2017].
- [11] E. AS, Elering.
- [12] PSCAD™/EMTDC™, „PSCAD koduleht,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://hvdc.ca/knowledge-base/v:>.

Lisad

. L.1. Kõrgepinge seadmete labori juhendid

L.1. Kõrgepingeseadmete labori juhendid

KPS LABORATOORNE TÖÖ nr. 1

Töö ülesanne

- 1) Koostada kolmefaasilises ahelas taastuvpinge uurimiseks PSCAD mudel vastavalt etteantud skeemile
- 2) Uurida ahela parameetrite mõju taastuvpinge tippväärtusele ja sagedusele vastavalt tabelites toodud väärtustele
- 3) Joonistada sõltuvusi iseloomustavad graafikud.

A. Lühis tekib ajahetkel $t = 0$ s ; Kontaktid avanevad ajahetkel $t = 0,3$ s ; kaare kustumine voolu väärtusel 0 A

1) Muutub induktiivsus L : $U_{TRVmax} = U_{TRVmax}(L)$; $f_{TRV} = f_{TRV}(L)$

$$C = 0,025 \mu\text{F} \text{ ja } R = 1\,000\,000 \Omega ; f_{TRV} = \frac{1}{t_{TRVmax2} - t_{TRVmax1}} \text{ Hz}$$

A - faas

L H	0,25	0,65	1,05	1,45	1,85	2,25
U_{TRVmax} kV	138,89	138,28	137,78	137,34	136,94	136,55
$t_{TRVmax1}$ s	0,305248	0,305401	0,30551	0,3056	0,30567	0,30574
$t_{TRVmax2}$ s	0,305745	0,306199	0,30652	0,30679	0,30702	0,30722
f_{TRV} kHz	2012,07243	1253,13283	985,222	838,223	742,942	674,764

B - faas

L H	0,25	0,65	1,05	1,45	1,85	2,25
U_{TRVmax} kV	137,47	136,49	135,74	135,09	134,51	133,98
$t_{TRVmax1}$ s	0,302264	0,302417	0,30252	0,30261	0,30269	0,30276
$t_{TRVmax2}$ s	0,302761	0,303216	0,30354	0,3038	0,30403	0,30424
f_{TRV} kHz	2012,07243	1251,56446	985,222	838,926	744,048	674,764

C – faas

L H	0,25	0,65	1,05	1,45	1,85	2,25
U_{TRVmax} kV	138,65	138,39	138,16	137,93	137,71	137,48
$t_{TRVmax1}$ s	0,308233	0,308384	0,30849	0,30858	0,30866	0,30873
$t_{TRVmax2}$ s	0,308728	0,309183	0,30951	0,30977	0,31	0,31021
f_{TRV} kHz	2020,20202	1251,56446	985,222	838,926	743,494	675,219

2) Muutub mahtuvus C : $U_{TRVmax} = U_{TRVmax}(C)$; $f_{TRV} = f_{TRV}(C)$

$$L = 0,25 \text{ H ja } R = 1\,000\,000 \, \Omega$$

A - faas

C μF	0,025	0,105	0,185	0,265	0,345	0,425
U_{TRVmax} kV	138,89	138,85	138,54	138,18	137,82	139,32
$t_{TRVmax1}$ s	0,305248	0,305508	0,30567	0,3058	0,30592	0,31524
$t_{TRVmax2}$ s	0,305745	0,306524	0,30702	0,30741	0,30775	0,31727
f_{TRV} kHz	2012,07243	984,251969	742,942	621,504	545,852	493,097

B – faas

C μF	0,025	0,105	0,185	0,265	0,345	0,425
U_{TRVmax} kV	137,47	136,81	136,33	137,69	138,02	137,93
t_{TRVmax1} s	0,302264	0,302523	0,30269	0,31172	0,31124	0,31225
t_{TRVmax2} s	0,302761	0,303539	0,30403	0,31332	0,31307	0,31428
f_{TRV} kHz	2012,07243	984,251969	743,494	622,665	546,448	493,097

C – faas

C μF	0,025	0,105	0,185	0,265	0,345	0,425
U_{TRVmax} kV	138,65	139,23	139,31	139,27	139,17	139,07
t_{TRVmax1} s	0,308233	0,308493	0,30866	0,30879	0,3089	0,31823
t_{TRVmax2} s	0,308728	0,309509	0,31001	0,3104	0,31074	0,32026
f_{TRV} kHz	2020,20202	984,251969	742,942	622,278	545,852	493,097

3) Muutub aktiivtakistus R : $U_{\text{TRVmax}} = U_{\text{TRVmax}}(R)$; $f_{\text{TRV}} = f_{\text{TRV}}(R)$

$L = 0,25 \text{ H}$ ja $C = 0,025 \mu\text{F}$

A – faas

R Ω	1 000 000	500 000	100 000	50 000	10 000	5000
U_{TRVmax} kV	138,89	138,55	135,87	132,67	111,77	94,12
t_{TRVmax1} s	0,305248	0,305248	0,30525	0,30525	0,30525	0,30526
t_{TRVmax2} s	0,305745	0,305745	0,30575	0,30575	0,30575	0,30578
f_{TRV} kHz	2012,07243	2012,07243	2016,13	2012,07	1992,03	1945,53

B – faas

R	Ω	1 000 000	500 000	100 000	50 000	10 000	5000
U_{TRVmax}	kV	137,47	137,13	134,47	131,29	110,59	93,09
$t_{TRVmax1}$	s	0,302264	0,302264	0,30226	0,30226	0,30227	0,30228
$t_{TRVmax2}$	s	0,302761	0,30276	0,30276	0,30276	0,30277	0,30279
f_{TRV}	kHz	2012,07243	2016,12903	2016,13	2012,07	1996,01	1956,95

C – faas

R	Ω	1 000 000	500 000	100 000	50 000	10 000	5000
U_{TRVmax}	kV	138,65	138,31	135,64	132,44	111,6	94,02
$t_{TRVmax1}$	s	0,308233	0,308232	0,30823	0,30823	0,30824	0,30825
$t_{TRVmax2}$	s	0,308728	0,308728	0,30873	0,30873	0,30874	0,30877
f_{TRV}	kHz	2020,20202	2016,12903	2016,13	2012,07	1988,07	1926,78

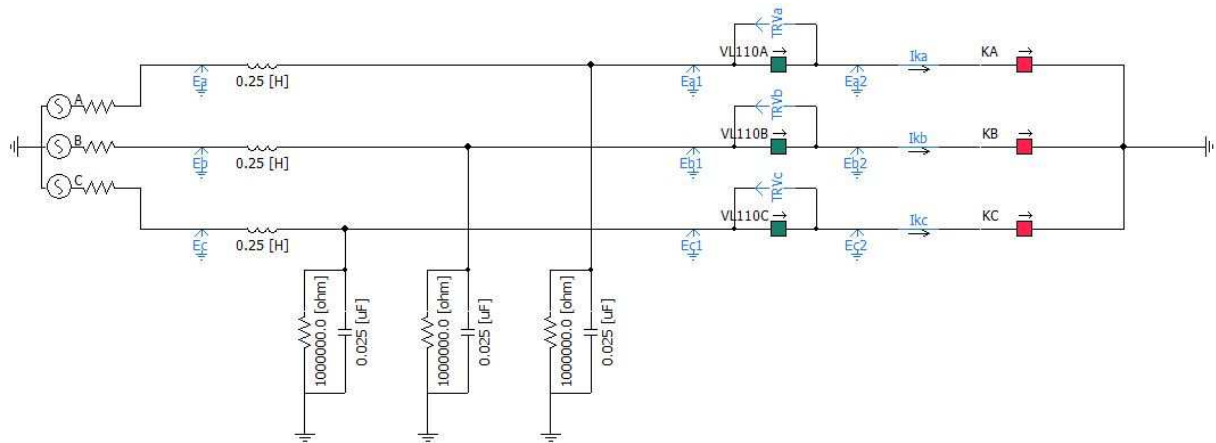
B. Kaare kustumine voolu väärtusel ca 100 A

Parameetrid: $L = 0,25$ H ; $C = 0,025$ μ F ja $R = 1\,000\,000$ Ω

	A (faas)	B (faas)	C (faas)	
U_{TRVmax}	kV	390,08	389,59	389,54
$t_{TRVmax1}$	s	0,304996	0,302012	0,307976
$t_{TRVmax2}$	s	0,305492	0,302509	0,308472
f_{TRV}	kHz	2016,12903	2012,07243	2016,12903

Selleks määrata esiteks antud voolulõikele vastav ajahetk, kui lahutamine toimub voolu nullväärtushetkel ja seejärel sundida lülitit avanema leitud ajahetkel.

Võrrelda saadud tulemusi osas A olevate tabelite esimese veeru tulemustega.



Joonis 1 Kolmefaasiline skeem taastuvpingete uurimiseks

4.1.1 Mahtuvuse muutus

Põikimahtuvuse muutmisel esinesid taastuvpinge maksimumväärtused sundkomponendi esimese perioodi teisel poolel.

Vabakomponendi sumbuvus vähenes suuresti põikimahtuvuse suurendamisel.

4.1.2 Lekketakistuse muutus

Põikitakistuse suurendamisel vähenes vabakomponendi sumbuvus suuresti. 5000 oomi juures eksisteerist sisuliselt vabakomponenti kõigest 1 periood.

Töö ülesanne

- 1) Kasutada kolmefaasilises ahelas taastuvpinge uurimiseks lähilühiste korral PSCAD mudelit vastavalt etteantud skeemile ja parameetritele
- 2) Uurida liini pikkuse l mõju lühisvoolu ja taastuvpinget iseloomustavatele suurustele
- 3) Joonistada sõltuvusi iseloomustavad graafikud: $i_m(l)$; $I_k(l)$; $U_{TRVmax}(l)$; $t_{TRVmax}(l)$; $U_{TRVmax1}(l)$; $S(l)$; $f_{k2}(l)$; $f_{k2teor}(l)$

Tingimused:

- Lühis tekib lühikese õhuliini lõpus hetkel 0,2 s
- Lüliti kontaktid hakkavad avanema hetkel 0,3 s
- Kaar kustub voolu nullväärtusel

Mõõta ja arvutada

1. Mõõta lühise löökvool i_m
2. Mõõta ja arvutada lühisvoolu perioodilise komponendi amplituud
$$I_{km} = \frac{i_{kmax} - i_{kmin}}{2}$$
 viimasel täisperioodil
3. Arvutada lühisvoolu efektiivväärtus $I_k = \frac{I_{km}}{\sqrt{2}}$
4. Mõõta taastuvpinge tippväärtust U_{TRVmax} ja tippväärtusaega t_{TRVmax}
5. Mõõta taastuvpinge esimesele suurima tõusukiirusega löigu tipp-pinget U_{TRV-1} ja sellele vastavat aega t_{TRV-1}
6. Mõõta kaare kustumise hetke t_{TRV-0} ($U_{TRV-0} = 0$)
7. Arvutada taastuvpinge suurim tõusukiirus $S = \frac{U_{TRVmax1}}{t_{TRVmax1} - t_{TRV0}}$
8. Mõõta kontaktidel k2 peegeldunud saehammaspinge täisperioodi algus- ja lõpuaega t_{k2-1} ja t_{k2-2} (aega mõõta kahe järjestikuse naabermaksimumi kohal)
9. Arvutada saehammaspinge sagedus $f_{k2} = \frac{1}{t_{k2-2} - t_{k2-1}}$
10. Arvutada saehammaspinge sagedus teoreetiliselt, võttes pingelaine levimiskiiruseks liinis $v = 290\,000$ km/s ning arvestades, et:

$$\frac{T}{4} = \frac{l}{v} \quad \text{ja} \quad f_{kteor} = \frac{1}{T}$$

A-faas

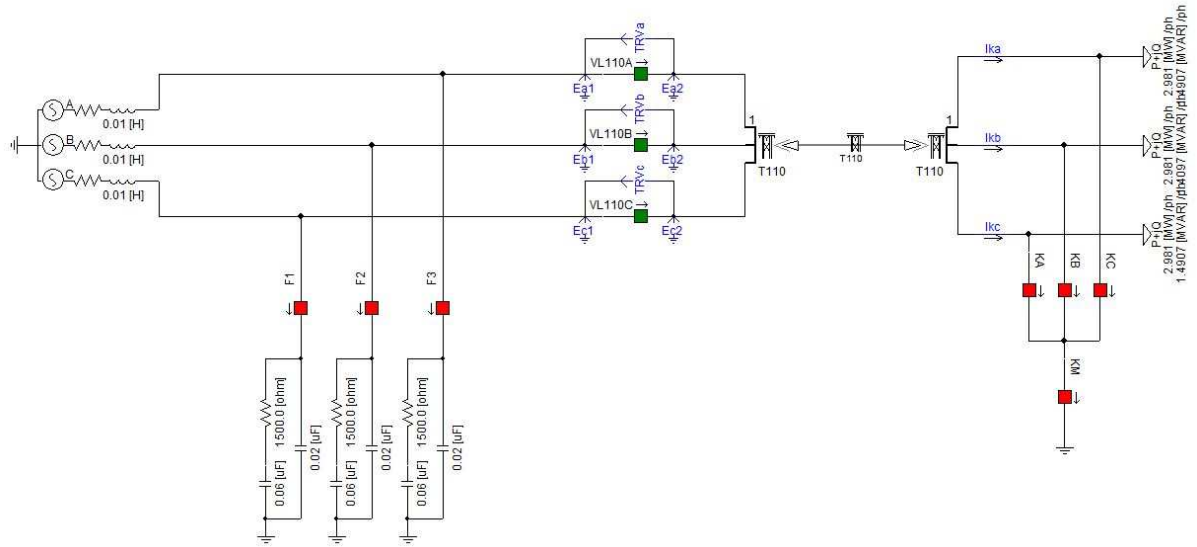
l	km	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8
Löökvool	i_m kA	26,15	25,39	24,62	23,96	23,22	22,59	22,02
Vool	i_{kmax} kA	18,15	17,68	17,34	16,71	16,59	16,32	15,81
Vool	i_{kmin} kA	18,08	17,75	17,34	17,27	16,68	16,24	16,14
Lühisvool	i_k kA	12,81	12,53	12,26	12,01	11,76	11,51	11,30
U_{TRVmax}	kV	101,14	100,64	104,13	106,26	105,85	104,81	102,17
t_{TRVmax}	s	0,304498	0,304486	0,304475	0,304525	0,304480	0,304446	0,304481
U_{TRV-1}	kV	37,18	43,15	46,80	51,41	57,81	62,72	67,87
t_{TRV-1}	kV	0,304456	0,304461	0,304446	0,304494	0,304448	0,304410	0,304444
t_{TRV-0}	kV	0,304445	0,304448	0,304432	0,304479	0,304431	0,304492	0,304424
S	kV/ μ s	9194545	7741538	7437857	7084000	6226471	5516316	5108500
t_{k2-1}	s	0,304455	0,304461	0,304446	0,304494	0,304448	0,304410	0,304444
t_{k2-2}	s	0,304478	0,304485	0,304475	0,304525	0,304480	0,304429	0,304482
f_{k2}	Hz	43478,26	41666,67	34482,76	32258,06	31250	52631,58	26315,79
f_{k2teor}	Hz	45312,5	40277,78	36250	32954,55	30208,33	27884,62	25892,86

B-faas

l km	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8
Löökvool i_m kA	21,32	20,72	20,13	19,63	19,06	18,57	18,13
Vool i_{kmax} kA	18,14	17,74	17,34	17,13	16,65	16,26	16,05
Vool i_{kmin} kA	18,09	17,7	17,34	16,84	16,6	16,3	15,88
Lühisvool i_k kA	12,81	12,53	12,26	12,01	11,76	11,51	11,29
U_{TRVmax} kV	106,42	106,29	110,11	113,21	112,57	111,55	108,86
t_{TRVmax} s	0,300892	0,300849	0,300820	0,300824	0,300780	0,300745	0,300748
U_{TRV-1} kV	38,69	43,39	49,33	54,28	60,58	65,34	71,28
t_{TRV-1} kV	0,300849	0,300823	0,300792	0,300793	0,300748	0,300710	0,300711
t_{TRV-0} kV	0,300838	0,300811	0,300779	0,300779	0,300732	0,300692	0,300692
S kV/ μ s	3517272	3615833	3794615	3877143	3786250	3630000	3751579
t_{k2-1} s	0,300849	0,300823	0,300792	0,300793	0,300748	0,300710	0,300711
t_{k2-2} s	0,300869	0,300848	0,300819	0,300824	0,300780	0,300746	0,300749
f_{k2} Hz	50000	40000	37037,04	32258,06	31250	27777,78	26315,79
f_{k2teor} Hz	45312,5	40277,78	36250	32954,55	30208,33	27884,62	25892,86

C-faas

l km	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8
Löökvool i_m kA	22,34	21,74	21,16	20,62	20,07	19,58	19,11
Vool i_{kmax} kA	18,13	16,98	16,55	16,32	15,82	15,41	15,19
Vool i_{kmin} kA	17,38	17,7	17,33	16,85	16,61	16,29	15,89
Lühisvool i_k kA	12,55	12,26	11,98	11,73	11,47	11,21	10,99
U_{TRVmax} kV	92,56	92,26	94,58	95,60	94,17	92,87	89,82
t_{TRVmax} s	0,307556	0,307515	0,307489	0,307489	0,307456	0,307425	0,307434
U_{TRV-1} kV	34,75	39,82	44,86	48,07	57,96	58,29	63,01
t_{TRV-1} kV	0,307514	0,307488	0,307462	0,307459	0,307423	0,307391	0,307397
t_{TRV-0} kV	0,307503	0,307476	0,307448	0,307443	0,307407	0,307373	0,307377
S kV/ μ s	3159090	3318333	3204286	3004375	3622500	3238333	3150500
t_{k2-1} s	0,307514	0,307488	0,307462	0,307459	0,307423	0,307391	0,307397
t_{k2-2} s	0,307536	0,307513	0,307489	0,307489	0,307457	0,307427	0,307434
f_{k2} Hz	45454,54	40000	37037,04	33333,33	29411,76	27777,78	27027,03
f_{k2teor} Hz	45312,5	40277,78	36250	32954,55	30208,33	27884,62	25892,86



Joonis 1 Kolmefaasiline skeem taastuvpingete uurimiseks