



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**ÜLEKANDEVÕRGU ÜHISRIPUTUSEGA
VAHELDUVVOOLU ÕHULIINI PINGE
ASÜMMEETRIA UURIMINE**

**ASSESSMENT OF THE VOLTAGE UNBALANCE OF THE
MULTI-CIRCUIT AC OVERHEAD TRANSMISSION LINE**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Marcus Auväart
Üliõpilaskood: 213703
Juhendaja: professor Jako Kilter
Kaasjuhendaja: Andrus Reinson

Tallinn, 2024

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

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

Autor: Marcus Auväärt

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja: professor Jako Kilter

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Marcus Auväärt

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Ülekandevõrgu ühisriputusega vahelduvvoolu õhuliini pinge asümmeetria uurimine“, mille juhendajad on professor Jako Kilter ja Andrus Reinson.
 - 1.1 Reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
 - 1.2 Üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
 2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
 3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.
-

13.05.2024

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

<i>Autor:</i> Marcus Auväärt	<i>Lõputöö liik:</i> Bakalaureusetöö
<i>Töö pealkiri:</i> Ülekandevõrgu ühisriputusega vahelduvvoolu õhuliini pinge asümmeetria uurimine	
<i>Kuupäev:</i> 13.05.2024	76 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendajad:</i> professor Jako Kilter, Andrus Reinson	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Lõputöös uuritakse ülekandevõrgu õhuliinis tekkivat asümmeetriat ühe Eesti ülekandevõrgu ühisriputusega õhuliini näitel. Asümmeetriat analüüsitakse erinevatel talitlustel ning hinnatakse olemasoleva ja hüpoteetiliste transponeerimise meetodite korral tekkivat asümmeetriat. Vaadeldavate uurimisküsimuste lahendamiseks koostati Eesti elektrisüsteemi näitel PSCAD mudel, mis sisaldas vaadeldavat 330 kV ülekandeliini ja sellega ühisriputusel olevaid 110 kV võrgu õhuliine. Kõik lähteandmed on saadud Elering AS-lt.</p> <p>Tulemuste analüüsi põhjal saab välja tuua, et 30...50 % ülekandeliini pinge asümmeetriast on tingitud erinevatest liini mahtuvustest. Samuti on pinge asümmeetria oluliselt mõjutatud liinijuhtide vastastikustest induktiivsustest ning sõltuv voolu ja pinge faasinurgast. Saab järeldada, et hinnatava 330 kV ülekandeliiniga ühisriputusel olevad 110 kV õhuliinid osutusid 17...21 % ulatuses analüüsitava 330 kV õhuliini pinge asümmeetria põhjustajateks. Asümmeetria kompenseerimiseks kasutatakse õhuliini transponeerimist ja vaadeldaval juhtumil kompenseeritakse enamik tekkivast asümmeetriast. Täiendavate transponeerimistsüklite kasutamine ei võimalda saada suuremat pinge asümmeetria kompenseerimist. Ülekandeliini voolu asümmeetria väheneb täiendavate transponeerimistsüklite korral liini lõikes, kuid püsib liini otstes samasugune.</p> <p>Lõputöö raames teostatud analüüs on oluline ülekandeliinide projekteerijatele ja võrguoperaatoritele. Esitatud tulemuste alusel on võimalik hinnata asümmeetria tekkimise põhjuseid ja võimalikke lahendusmeetmeid asümmeetria taseme vähendamiseks.</p>	
<i>Märksõnad:</i> pinge asümmeetria, voolu asümmeetria, elektrikvaliteet, PSCAD, transpositsioon, õhuliinid, ühisriputus	

ABSTRACT

<i>Author:</i> Marcus Auväärt	<i>Type of the work:</i> Bachelor's Thesis
<i>Title:</i> Assessment of the voltage unbalance of the multi-circuit AC overhead transmission line	
<i>Date:</i> 13.05.2024	76 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisors of the thesis:</i> professor Jako Kilter, Andrus Reinson	
<i>Abstract:</i> <p>This bachelor's thesis investigates the voltage unbalance of an AC overhead multi-circuit transmission line. The voltage unbalance of such a transmission line was assessed in different configurations and transposition methods. To investigate such topics one Estonian multi-voltage and multi-circuit transmission line (Harku – Lihula – Sindi) was taken as an example. Data from Estonian TSO was used to configure a PSCAD model, which is the primary analysing method of this thesis.</p> <p>It was found that approx. 30...50 % of the resulting voltage unbalance is caused by capacitive coupling. Voltage asymmetry is greatly influenced by different mutual inductances with a variable load and the phase difference between the line voltage and current. 110 kV lines were the cause of 17...21 % of the resulting voltage asymmetry in the 330 kV transmission line. Today's transposition compensates most of the voltage asymmetry, compared to a non-transposed transmission line. More transposition cycles do not lower the voltage unbalance as much as the previous comparison. Conclusion was drawn that more transposition cycles are effective in lowering the voltage unbalance with a smaller load on the transmission line. Asymmetrical distances between transpositions can be used to optimise the voltage asymmetry based on the main transit of the transmission line.</p> <p>Based on the addressed topics the main objective of the thesis is to offer knowledge about voltage asymmetry in multi-circuit power lines and the voltage asymmetry forming in different transposition configurations.</p>	
<i>Keywords:</i> voltage asymmetry, current asymmetry, quality of electricity, PSCAD, transposition, transmission line, multi-circuit	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Marcus Auväart, 213703

Õppekava, peeriala: Elektroenergeetika ja mehhatroonika EAAB16/17,
elektroenergeetika

Juhendaja: professor Jako Kilter

Kaasjuhendaja: Andrus Reinson
(Releekaitse ja automaatika üksuse juht)

Lõputöö teema:

eesti keeles Ülekandevõrgu ühisriputusega vahelduvvoolu õhuliini pinge asümmeetria uurimine

inglise keeles Assessment of the voltage unbalance of the multi-circuit AC overhead transmission line

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Ühe Eesti ülekandevõrgu 330 kV ja 110 kV ühisriputusega elektriliinide modelleerimine ja talitluse analüüsimine pinge asümmeetria raamistikus.
2. Uurida liini juhtide vastastikustest induktiivsustest ja mahtuvustest põhjustatud asümmeetria osakaalu ülekandeliinis.
3. Selgitada kui suur osa resulteeruvast asümmeetriast 330 kV ülekandeliinis on põhjustatud selle vastastikmõjudest 110 kV elektriliinidega.
4. Liinide vastastikmõjudest tingitud resulteeruva asümmeetria sõltuvuse liinide koormustest uurimine.
5. Analüüsida transponeerimise efektiivsust ning selgitada, millises ulatuses leevendab liini transponeerimine tekkivat asümmeetriat ning millised oleksid optimaalsed transponeerimis asukohad analüüsitaval ülekandeliinil.
6. Analüüsida, et mil määral vähendavad täiendavad transpositsiooni tsüklit tekkivat pinge asümmeetriat, võrreldes normaalskeemiga tekkiva pinge asümmeetriaga.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Harku – Lihula – Sindi õhuliini kirjelduse valmimine ning PSCAD mudeli koostamisega alustamine	12.03
2.	Valdavas enamuses lõpliku PSCAD mudeli valmimine ning verifitseerimine	25.03
3.	Mudeli põhjal asümmeetria analüüsimine, paralleelselt korrigeerides mudelit (vastavalt vajadusele)	18.04
5.	Lõplik versioon asümmeetria analüüsist valmis	02.05
6.	Juhendajatele lugemiseks saatmine	05.05
7.	Korrektuuride sisse viimine	08.05
8.	Kokkuvõtte ning lühikirjelduste korrigeerimine	11.05

Töö keel: **Lõputöö esitamise tähtaeg:** ".....".....20.....a

Üliõpilane: ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendajad: ".....".....20.....a
/allkiri/

Programmijuht: ".....".....20.....a
/allkiri/

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	10
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	11
SISSEJUHATUS	14
1 ÜHISRIPUTUSEGA ÕHULIINID JA NENDE TALITLUS	16
1.1 Ühisriputusega õhuliinide eelised	16
1.2 Ühisriputusega elektriliinidel tekkiv asümmeetria	17
1.2.1 Vastastikune induktiivsus	18
1.2.2 Mahtuvuslik asümmeetria	19
1.3 Transpositsioon	20
1.4 Harku - Lihula - Sindi 330 kV ja 110 kV elektriliin	21
1.4.1 Masti geomeetriad	22
1.4.2 Faasi- ja neutraaljuhid	24
1.4.3 Ülekandeliini L503 transpositsioon	25
2 ÜHISRIPUTUSEGA ÕHULIINI MODELLEERIMINE	26
2.1 Ühisriputusega mudeli komponendid	26
2.1.1 Elektriliinid	26
2.1.2 Trafod	29
2.1.3 Toiteallikad	30
2.1.4 Asümmeetria mõõtmine	31
2.1.5 Koormused	32
2.2 Mudeli testimine	33
2.2.1 Süsteemiharude testimine	34
2.2.2 Liinide takistuste võrdlus	35
2.3 Mudeli verifitseerimine püsiseisundi mõõtmiste alusel	35
3 ASÜMMEETRIA ANALÜÜS	37
3.1 Asümmeetria normaalskeemiga	37
3.2 Mahtuvuslik asümmeetria ülekandeliinis	40
3.3 Vastastikinduktiivsuse mõjud ülekandeliini asümmeetriale	42
3.4 Ühisriputusest põhjustatud asümmeetria ülekandeliinis	44
4 TRANSPOSITSIIONI MÕJUD ASÜMMEETRIALE	47
4.1 Risti ja Lihula transpositsioonide eraldamine	47
4.2 Ülekandeliini transpositsiooni puudumine	49

4.3	Transpositsioonide asukohad ülekanaliinil.....	50
4.4	Transpositsioon vahetades korruga kaks juhet.....	55
4.5	Katsetatud transpositsiooni meetodite võrdlus.....	56
	KOKKUVÕTE	58
	SUMMARY.....	61
	KASUTATUD KIRJANDUS	64
	LISAD	66
	Lisa 1 110 kV elektriliinid enne ja pärast ühisriputust	67
	Lisa 2 Kaks täistsüklilist transpositsiooni.....	70
	Lisa 3 Neli täistsüklilist transpositsiooni	72
	Lisa 4 Skeemid.....	74

EESSÕNA

Esimene mõte lõputöö teema jaoks saadi Andrus Reinsonilt (Eleringi releekaitse ja automaatika üksuse juht). Järgnevalt sõnastati täpsem lõputöö teema ning raamistik koos Andrus Reinsoni ja professor Jako Kilteriga. Töötates Eleringis (ER) saadi vajaminevad andmed elektriliini modelleerimiseks ER materjalidest, dokumentatsioonidest, olemasolevatest võrgumudelitest jms ning vajadusel abi küsides ER töötajatelt. Põhilised isikud, kellega konsulteeriti ja/või kellelt saadi lõputöö jaoks vajalike andmeid olid: Karl Valge (ER, siirdetalitluse analüütik), Rain Maripuu (ER, elektrisüsteemi vanemanalüütik), Vegard Kmito (ER, analüütik), Kaur Krusell (ER, analüütik), Karin Lelle (ER, siirdetalitluse analüütik) ja Tanel Sarnet (Taltech, elektrisüsteemi dünaamika ekspert). Autor tänab lõputöö juhendajaid ning kõiki, kes aitasid heade mõtete ja soovitustega lõputöö valmimisele kaasa.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

a ja a^2	- pöördeoperaatorid: $a = 1\angle 120^\circ$ ja $a^2 = 1\angle 240^\circ$
ER	- Elering
β	- elektrostaatilise induktsiooni tegur
Ha->Si või Si->Ha	- transiit ülekandeliinil L503, kas Harkust Sindisse või Sindist Harkusse
I_{lub}	- elektriliini juhtmetele lubatud maksimaalne koormusvool, A
I_{kA1} , I_{kA2} ja I_{k0}	A faasi ühefaasilise lühise päri-, vastu- ja nulljärgnevus lühisvoolud [1], kA
$I_{k, \max}(1\text{ s})$	- juhtmele maksimaalselt lubatav lühisvool 1 s kestusega, kA
$I_k^{(3)}$	- kolmefaasiline mööduv lühisvool, kA
$I_k^{(1)}$	- ühefaasiline mööduv lühisvool, kA
I_2/I_1	- voolu vastujärgnevuskomponendi suhe pärijärgnevuskomponenti ehk voolu asümmeetriat väljendav parameeter
L503	- Harku - Lihula - Sindi 330 kV ülekandeliini operatiivtähis
M1 ja M2	- erinevad Harku – Lihula – Sindi elektriliini kirjeldamiseks keskmestatud faasi- ja neutraaljuhi geomeetrised paigutused
M0x	- eraldiseisvate 110 kV elektriliinide mastigeomeetriad (x = 1...5)
$R_{Alalis, \max}(20^\circ\text{C})$	- juhtme või piksekaitsetrossi maksimaalne alalistakistus 20°C juures, Ω
R_{kiud}	- elektrijuhtme alumiiniumist kiu raadius, mm
R_+ ja X_+	- pärijärgnevus aktiiv- ja reaktiivtakistus, Ω
R_0 ja X_0	- nulljärgnevus aktiiv- ja reaktiivtakistus, Ω
SK ja TK	- suvine ja talvine koormus nii 330 kV kui ka 110 kV võrgus, mida kasutati mudelis hinnanguliselt väiksema ja suurema koormuse kajastamiseks

S_x	- Harku – Lihula – Sindi 330/110 kV elektriliini tinglikult sektsioonideks jagav tähis ($x = 1...13$). Transponeerimise põhimõtteskeemidel joonis L2.1 ja L3.1 kasutatakse ka sektsioonide pikkustele viitamiseks
z_i	- ainult 110 kV elektriliinidest põhjustatud asümmeetrilise voolu suhe normaalskeemiga tekkivasse voolu asümmeetriasse
\underline{Z}_K	- koormus kompleksimpedants, Ω
Z_{ij}	- trafo lühispinge mähispaari kohta ($i = 1...3, j = 1...4$), %
z_u	- ainult 110 kV elektriliinidest ülekandeliinis põhjustatud asümmeetrilise pinge suhe normaalskeemiga tekkivasse pinge asümmeetriasse
\underline{Z}_+	- pärijärgnevus (indeksiga +) kompleksimpedants, Ω
\underline{Z}_0	- nulljärgnevus (indeksiga 0) kompleksimpedants, Ω
T_a	- ajakonstant [1]
TJ	- ülekandeliini tühijooksu talitlus
TP1	- modelleerimisel kasutatud transponeerimismeetod (TP), mille puhul transponeeritakse ülekandeliini L503 ainult Ristis
TP2	- modelleerimisel kasutatud transponeerimismeetod, mille puhul transponeeritakse ülekandeliini L503 ainult Lihulas
TP3	- modelleerimisel kasutatud transponeerimismeetod, mille puhul ei transponeerita ülekandeliini L503
TP4	- modelleerimisel kasutatud transponeerimismeetod, mille puhul vahetatakse korraga ülekandeliini kahe faasi positsioonid mastidel (Ristis ja Lihulas)
TP5	- modelleerimisel kasutatud transponeerimismeetod, mille puhul teostatakse ülekandeliinil L503 kaks täistsüklilist transpositsiooni
TP6	- modelleerimisel kasutatud transponeerimismeetod, mille puhul teostatakse ülekandeliinil L503 neli täistsüklilist transpositsiooni
TP 10km→ Si	- katsetatud transponeerimismeetod ülekandeliinil L503, mille puhul nihutatakse olemasolevad transpositsiooni kohad 10 km Sindi poole

TP Ri 10km→ Si või TP Li 10km→ Si	- katsetatud transponeerimismeetod ülekanaliinil L503, mille puhul nihutatakse, olemasolev kas Risti (Ri) või Lihula (Li) transpositsiooni kohta 10 km Sindi poole
TP 5km→< -	- katsetatud transponeerimismeetod ülekanaliinil L503, mille puhul nihutatakse olemasolevaid transpositsiooni kohtasid 5 km ülekanaliini keskme poole
TP 5km→ Si	- katsetatud transponeerimismeetod ülekanaliinil L503, mille puhul nihutatakse olemasolevaid transpositsiooni kohtasid 5 km Sindi poole
TP Ri 5km→ Si	- katsetatud transponeerimismeetod ülekanaliinil L503, mille puhul nihutatakse olemasolev Risti (Ri) transpositsiooni koht 5 km Sindi poole
U_a, U_b ja U_c	- elektriliini faaside A, B ja C faasipinged
U_{nTi}	- trafo nimipinge ($i = 1...4$), kV
U_2/U_1	- pinge vastujärgnevuskomponendi suhe pärijärgnevuskomponenti ehk pinge asümmeetriat väljendav parameeter
$\Delta I_2/I_1$	- normaalskeemiga saadud voolu asümmeetria ja teatud lülituses või konfiguratsioonis skeemiga saadud voolu asümmeetria vahe
ΔP_{ij}	- trafo vaseskadu mähispaari kohta ($i = 1...3, j = 1...4$), kW
$\Delta U_2/U_1$	- normaalskeemiga saadud pinge asümmeetria ja teatud lülituses või konfiguratsioonis skeemiga saadud pinge asümmeetria vahe
$100 \frac{E_2}{E_1}$	- protsentuaalne vastu- ja pärijärgnevuse suhe (indeksid 1, 2, 0 viitavad vastavalt päri-, vastu- ja nulljärgnevusele), %
1/3 TP	- katsetatud transponeerimismeetod ülekanaliinil L503, mille puhul teostatakse kaks transpositsiooni täpselt 1/3 ülekanaliini pikkuse tagant
Σ pikkus Harku poolt	- summaarne sektsioonide pikkus peale S_x ($x = 1...13$) vaadates ülekanaliini L503 Harku poolt, km
Σ pikkus Harku poolt	- summaarne sektsioonide pikkus peale S_x ($x = 1...13$) kogu ülekanaliini pikkuse suhtes, vaadatuna Harku poolt, %

SISSEJUHATUS

Üha kasvava elektrienergia vajadusega [2] tõuseb sellega proportsionaalselt ka elektri ülekandevõimsuste suurendamise vajalikkus. Selle teostamiseks õhuliinide puhul on mitmeid erinevaid lahendusi: uute üheaaheliste elektriliinide rajamine, olemasolevate elektriliinide ülekande võimsuse suurendamine (nt suurema ristlõikega juhtide paigaldamine) ja ka võimalusel pingeastme tõstmise (tüüpiline näide: 110 kV õhuliini pinget tõstmise 220 kV). Veel üks järjest populaarsem lahendus on ühisriputusega elektriliinide rajamine, mis on nii majanduslikult kui ka liini koridori optimaalse ruumikasutuse poolest hea lahendus.

Sellegi poolest kaasneb ühisriputusega elektriliinidega, võrreldes üheaaheliste elektriliinidega, täiendavaid komplikatsioone. Need võivad vajada uurimist, teadvustamist ning potentsiaalselt lisatähelepanu võrguettevõtjate või nende töövõtjate poolt. Selle lõputöö eesmärgiks on uurida ülekandevõrgus tekkivat asümmeetriat ühe Eesti ühisriputusega õhuliini näitel. Täpsemalt on Eestisse rajatud õhuliine, mille ülaosas paikneb 330 kV ülekandeliin ning alaosas üks või mitu 110 kV elektriliini. Uuritavaks elektriliiniks valiti Harku – Lihula - Sindi elektriliin, mille 330 kV ülekandeliin on täies ulatuses erinevate 110 kV elektriliinidega ühisriputusel.

Valitud elektriliinides tekkiva asümmeetria uurimise teostamiseks kasutatakse elektrivõrgu simuleerimiseks sobilikku arvutitarkvara PSCAD. Antud tarkvara võimaldab küllaltki lihtsalt ühisriputusega elektriliinide modelleerimist ning sisaldab funktsionaalsust, mille vahendusel saab asümmeetriat uurida.

Lõputöö esimeses osas tutvutakse põhiliste teguritega, mis elektriliinides (sealhulga ühisriputusega elektriliinides) asümmeetriat põhjustavad. Tutvutakse ka transponeerimise põhitõdedega, sest transponeerimine on üks teguritest, mis tekkivat asümmeetriat mõjutab ning võib analüüsimist vajada. Uurimismeetodi valikust tulenevalt kirjeldatakse Harku – Lihula – Sindi õhuliini eeskätt selle modelleerimise vaatest. Seejuures tuleb antud elektriliini küllaltki täpselt kirjeldada, sest sellest sõltub võrgumudeli vastavus õhuliiniga.

Lõputöö teises osas koostatakse PSCAD tarkvaras Harku – Lihula – Sindi 330 kV ülekandeliinist ja kõigist sellega ühisriputusel olevatest 110 kV elektriliinidest ning seonduvatest elementidest PSCAD võrgumudel. Mudeli koostamisel põhjendatakse ja kirjeldatakse valitud modelleerimismetoodikaid ning tuuakse välja modelleerimiseks vajalikud lisaandmed.

Lõputöö kolmandas osas analüüsitakse ülekandeliinis L503 tekkivat asümmeetriat. Esmalt vaadeldakse asümmeetriat tavatalitluses. Järgnevalt uuritakse mahtuvusliku pinge asümmeetria osakaalu kogu ülekandeliinis tekkivasse asümmeetriasse. Peale seda uuritakse vastastikinduktiivsuste poolt põhjustatud asümmeetria osakaalu ülekandeliinis, mida ilmestatakse tõstes ülekandeliini koormust. Viimaks uuritakse ühisriputusest põhjustatud asümmeetria osakaalu ülekandeliinis.

Lõputöö neljandas osas uuritakse transponeerimist. Esmalt vaadeldakse ülekandeliini olemasolevate transpositsioonide efekte resulteeruvasse asümmeetriasse. Järgnevalt analüüsitakse transpositsiooni optimaalseid asukohti ülekandeliinil. Peale seda modelleeritakse erinevaid transponeerimismeetodeid ja vahemaid, mille korral tekkivat asümmeetriat võrreldakse normaalskeemiga tekkiva asümmeetriaga.

Bakalaureuse töös käsitletavatest teemadest tulenevalt on lõputöö teemad eeskätt kasulikud võrguhaldus ettevõtetele (eelkõige põhivõrgu), sealhulgas Eleringile. Täiendavalt ei ole varasemalt Harku – Lihula – Sindi õhuliini sellise täpsusega, nagu käesolevas lõputöös, modelleeritud. Sellest tulenevalt teeb autor koostatud mudeli sellest huvitatud ER töötajatele kättesaadavaks. Olemasolev mudel loob võimaluse analüüsida aktuaalseid teemasid koheselt, kulutamata üleliigselt aega modelleerimisele. See võimaldab (potentsiaalselt) ER töötajatel laskuda protsesside/talitluste uurimisse, milleks neil ilma olemasoleva mudelita kohest võimalust poleks.

1 ÜHISRIPUTUSEGA ÕHULIINID JA NENDE TALITLUS

Ühisriputusega elektriliin on õhuliin, mis kasutab samasid maste mitme erineva elektriliini jaoks. Üks ühisriputusega elektriliini tüüpiline näide on paralleelliin, mille puhul paiknevad kaks sama pingestmelist elektriliini (mis võivad ka mõlemas otsas kokku ühendatud olla) samadel mastidel. Teine Eestis kasutusel olev ja ka selle lõputöö täpsemas fookuses olev ühisriputusega elektriliin on mitme pingestmeline ühisriputusega elektriliin, nimipingetega 330 kV ja 110 kV. Sellise liini puhul paigutatakse 330 kV elektrijuhid masti ülaosasse ning 110 kV elektrijuhid allaosasse, et 110 kV juhtide katkemisel vältida 330 kV liini riket.

1.1 Ühisriputusega õhuliinide eelised

Tüüpiline ja ilmselge elektri ülekandevõimsuste suurendamise meetod on uute elektriliinide rajamine [3]. Pikas perspektiivis võib selline lähenemine osutada ebaefektiivseks, sest uute elektriliinide ehitamisega kaasnevad tõsised administratiivsed, seaduslikud ja keskkondlikud piirangud [3]. Sellest tulenevalt ei saa tihtipeale eelistatud marsruudil elamurajoonide, keskkonnatingimuste ja maastiku tingimuste tõttu elektriliini ehitada [3].

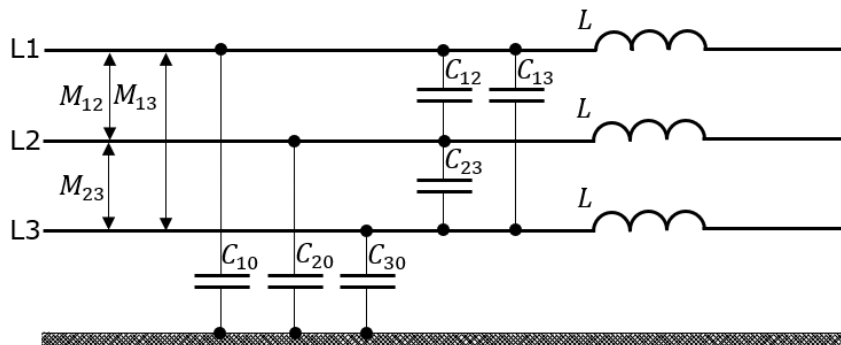
Laius, mida elektriliin vajab on kompromiss erinevate tehniliste parameetrite vahel, mis tagavad liini normaaltalitlust. Ühisriputusega elektriliini kasutamine ja liini nimipingete tõstmine aitavad suures ulatuses liinikoridori laiust vähendada (eeldades konstantset ülekantavat võimsust) [3]. Näiteks 2000 MW ülekandmiseks oleks vaja rakendada 15 üheaheelalist 110 kV elektriliini, mille kogu laius oleks 450 m. Selle asemel saaks kasutada nelja 220 kV elektriliini, mille kogu laius oleks 200 m või ühte 400 kV elektriliini, kogu laiusega 70 m. Liini ehitamiseks vajalikust suurest maa-alast tulenevalt on tüüpiline, et mitmed üheaheelalised elektriliinid jagavad teatud ulatuses sama marsruuti, sellisel juhul aitaks ühisriputusega elektriliini kasutamine liinikoridori laiust vähendada. Näiteks mitme pingestmeline ühisriputusega elektriliin nimipingetega 400 kV ja 220 kV vähendab liinikoridori laiust 25% võrreldes üheaheelaliste kõrvuti paiknevate 400 kV ja 220 kV elektriliinide kogulaiusega [3]. Sama või isegi suurema võimsuse ülekandmise ja liinikoridori laiuse vähenemise efekt suureneb veelgi kui rohkem (sama või erineva pingestmelisi) elektriliine samadele mastidele paigutada.

1.2 Ühisriputusega elektriliinidel tekkiv asümmeetria

Ühisriputusega elektriliinis ja üheaheelalises elektriliinis tekkivat asümmeetriat põhjustavad efektid on kontseptuaalselt sarnased. Selle erinevusega, et ühisriputusega elektriliini puhul on ühel elektriliinil rohkem vastastikmõjusid teiste liini faaside mõjul. Sellest tulenevalt võib (lihtsuse mõttes) vaadelda üheaheelalist liini ning samu kontseptsioone laiendada ühisriputusega elektriliini kirjeldamiseks.

Voolu ja pinge sõltuvustest tulenevalt on neli parameetrit elektriliinil selle kogu pikkuses jaotatud (nn jaotatud parameetrid): aktiivtakistus, induktiivsus, mahtuvus ja põiki-aktiivjuhtivus (mis tihti kõrgepinge elektriliinide kirjeldamisel jäetakse arvestamata, nii ka joonis 1.1 puhul) [4]. Üheaheelalist õhuliini kirjeldavad joonisel 1.1 toodud parameetrid, kus:

- M_{ij} – erinevate faaside vahelised vastastikused induktiivsused
- C_{ij} – erinevate faaside vahelised mahtuvused
- C_{i0} – erinevate faaside ja maa vahelised mahtuvused
- L – faasi omainduktiivsused



Joonis 1.1 Üheaheelalist (ilma piksekaitsetrossita) elektriliini kirjeldav põhimõtteskeem

Juba üheaheelalise elektriliini puhul on ilmne, et ühtlaselt jaotatult parameetreid on keeruline saavutada. Näiteks oleks võimalus faasid sümmeetrilise kolmnurga tippudesse paigutada, mille korral oleksid faaside vahelised mahtuvused ja vastastikused induktiivsused ligilähedaselt samaväärsed, kuid erinevate faaside maa vahelised mahtuvused C_{i0} on erineva väärtustega, mis toob sisse asümmeetria [5] [6]. Põhiline asümmeetrilise voolu ja/või pinge põhjus on kas asümmeetriline koormus ja/või ebapiisavast transponeerimisest tingitud asümmeetrilised elektriliini impedantsid [6]. Asümmeetria elektriliinis võib põhjustada releekaitse väärtoimet, lisa võimsus- ja energiakadusid ning elektrimootorite anormaalset talitlemist nende liigse kuumenemise tagajärjel [4].

Samasugune kontseptsioon, mille puhul igal faasil on mahtuvused iga teise faasiga (C_{ij}) ja maaga (C_{i0}) ning vastastikused induktiivsused M_{ij} iga teise faasiga, rakendub ka ühisriputusega elektriliinide puhul. Lihtsalt iga faasi talitlust kirjeldavaid parameetreid on rohkem.

1.2.1 Vastastikune induktiivsus

Kolme faasilise liini igas juhtmes indutseeritakse mitte ainult endainduktsiooni elektromotoorjõud (emj.), mis on tingitud vahelduvvoolust samas juhtmes, vaid ka vastastikuse induktsiooni emj., mis on tingitud liini teiste juhtmete vooludest. Harilikult on kõigi kolme juhtme aktiivtakistused r ja induktiivsused L ühesugused (nii ka joonis 1.1 puhul). Kuid juhtmete vahelised vastastikused induktiivsused M_{12} , M_{13} ja M_{23} on juhtmete mittersümmeetrilise asetuse puhul üksteisest erinevad. Eeldusel, et liini voolud moodustavad sümmeetrilise süsteemi avalduvad juhtmete pingelangud [5]:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = [r + j\omega(L + a^2M_{12} + aM_{13})]I_1 \\ \underline{U}_2 = [r + j\omega(L + a^2M_{23} + aM_{21})]I_2 \\ \underline{U}_3 = [r + j\omega(L + a^2M_{31} + aM_{32})]I_3 \end{cases} \quad (1.1)$$

kus pöördeoperaatorid $a = 1 \angle 120^\circ$ ja $a^2 = 1 \angle -120^\circ$.

Horizontaalse paigutusega elektriliinide, mille paigutus on geomeetriliselt asümmeetriline, kehtib $M_{12} \neq M_{13} \neq M_{23}$. Samamoodi (ainult avaldises on rohkem vastastikinduktiivsuseid ning eri pingetega juhtmete parameetrid on erinevad) ühisriputusega elektriliinide korral, kus sümmeetriline juhtmete paigutus ei ole praktiliselt teostatav. Mittersümmeetrilises kolme faasilises liinis leiavad voolu läbimisel aset omapäraseid elektrilised protsessid. Kui kehtib $M_{12} \neq M_{13} \neq M_{23}$, on võrrandites (1.1) ümarsulgudes seisvad avaldised kompleksuurused. Nende avaldiste imaginaarosad annavad peale korrutamise $j\omega$ reaalsuurused, mis on sisuliselt aktiivtakistused. Põhjusel, et $a^2 + a = -1$ on kõigi kolme faasi lisaaktiivtakistuste summa võrdne nulliga s. t. kui need lisaaktiivtakistused on mõnedes faasides positiivsed, siis on nad teistes faasides negatiivsed. Teiste sõnadega, kui ühtedest faasidest antakse energiat välja, siis teistesse faasidesse siseneb energia samas koguses, s.o. toimub energia ülekandmine ühest faasist teise elektromagnetilise induktsiooni teel [5].

Selleks, et saavutada ligilähedaselt sümmeetrilist liini sektsiooni oleks vajalik iga ahelat 1/3 liini pikkuse tagant transponeerida. Seda nimetatakse ka täielikuks transpositsiooniks. Elektrijuhtide konfiguratsiooni ja sektsiooni erinevate pingeastmete tõttu osutub see tehniliselt ja logistiliselt keerukaks [2]. Samuti mängib teatavat rolli liini(de) rajamise maksumus, sest kirjeldatult liinide transponeerimine vajaks lisa masti(e), mis tõstaks elektriliinide ehituse hinda. Nende põhjuste tõttu ei kaalutleta

tüüpiliselt sellisel meetodil ühisriputusega elektriliinide transponeerimist [3]. Sellest tulenevalt on ka Eesti ülekandevõrgus väljakujunenud valdavalt ainult 330 kV elektriliinide transponeerimine. Selle tõttu on elektriliini kirjeldava impedantside või juhtivuste maatriksis kõik liikmed esindatud [7] (nii-öelda ideaalselt transponeeritud elektriliinide puhul saaks osad vastastikused impedantsid arvestamata jätta).

1.2.2 Mahtvuslik asümmeetria

Liini põikimahtvuste puhul on mahtvuslik asümmeetria põhjustatud faaside asümmeetrilisest paigutusest. Ühisriputusega eri pingeastmetega elektriliini korral on mahtvuslikku asümmeetriat peamiselt märgata madalaima pingega elektriliini puhul. Isoleeritud neutraaliga elektrivõrkude puhul võib mahtvuslik asümmeetria põhjustada suuri nulljärgnevuspingeid. Kõrgepingeelektriliinide puhul võib mahtvuslikust asümmeetriast põhjustatud lisa pinge põhjustada nulljärgnevuskaitsete ebakorrektsed tööd, sest lisapinge võib põhjustada ka normaaltalitusel märgatavaid nulljärgnevusvoole [3].

Kriteeriumiks, mille põhjal vahelduvat elektrivälja liini juhtmete lähedal üksikutel hetkedel võiks ligikaudselt vaadelda elektrostaatiliselt väljana, saab võtta vahekorra elektromagnetilise laine pikkuse ja selle piirkonna joonmõõtmete vahel, milles välja vaadeldakse. Lainepikkuse ulatusel muutub väljatugevuse võnkumise faas 2π võrra. Lainepikkusest λ tunduvalt väiksemate joonmõõtmega piirkonnas saab väljatugevuse võnkumise faasis lugeda kõikides piirkonna punktides ühesuguseks ja vaadelda välja suure täpsusega igal hetkel elektrostaatilisena. Oletades, et pinged \underline{U}_1 , \underline{U}_2 ja \underline{U}_3 moodustavad sümmeetrilise süsteemi saab siinusrežiimi korral laengute ja pingete kompleksefektüväärtustele kirjutada võrrandid [5]:

$$\begin{cases} q_1 = (\beta_{11} + a^2\beta_{12} + a\beta_{13})\underline{U}_1 \\ q_2 = (\beta_{22} + a^2\beta_{23} + a\beta_{21})\underline{U}_2 \\ q_3 = (\beta_{33} + a^2\beta_{31} + a\beta_{32})\underline{U}_3 \end{cases} \quad (1.2)$$

kus β on elektrostaatiliselt induksiooni tegur.

Võrrandites (1.2) sulgudes olevad suurused on reaalsed tingimusel, et liini juhtmed on paigutatud üksteise suhtes sümmeetriliselt, s.t. kui $\beta_{12} = \beta_{23} = \beta_{31}$, sest $(a^2 + a) = -1$ on reaalarv. Seejuures kujutavad sulgudes olevad suurused juhtmete mahtvusi maa suhtes ehk liini mahtvust ühe faasi kohta tähtühenduse puhul.

Juhtmete mittesümmeetrilisel paigutusel s.t. kui $\beta_{12} \neq \beta_{23} \neq \beta_{31}$, osutuvad sulgudes olevad suurused kompleksuurusteks [5]. Nende reaalosad kujutavad juhtmete mahtvusi maa suhtes, sest nad määravad pingega faasis muutuva laenguosa ja järelikult määravad nad pinge suhtes faasilt nurga $\pi/2$ võrra nihutatud reaktiivse voolukomponendi [5]. Sulgudes asuvate suuruste imaginaarosad määravad pingetega

faasis või vastasfaasis olevad aktiivsed voolukomponendid juhtmetes [5]. Kusjuures kõigi kolme faasi imaginaarosade summa võrdub nulliga, sest summeerimisel saame kõikide tegurite β_{12} , β_{23} ja β_{31} ette reaalsed kordajad [5]. See tähendab, et kui nad ühtedes faasides määravad positiivse aktiivvõimsuse, siis teistes faasides määravad nad absoluutväärtuselt samasuguse, kuid negatiivse aktiivvõimsuse. Füüsikaliselt tähendab see seda, et juhtmete mittesümmeetrilise paigutuse korral kantakse perioodi vältel mingi hulk energiat elektrostaatilise induktsiooni teel ühest faasist teise. See omapärane nähtus avaldub sümmeetriliste pingete puhul voolude asümmeetrias [5].

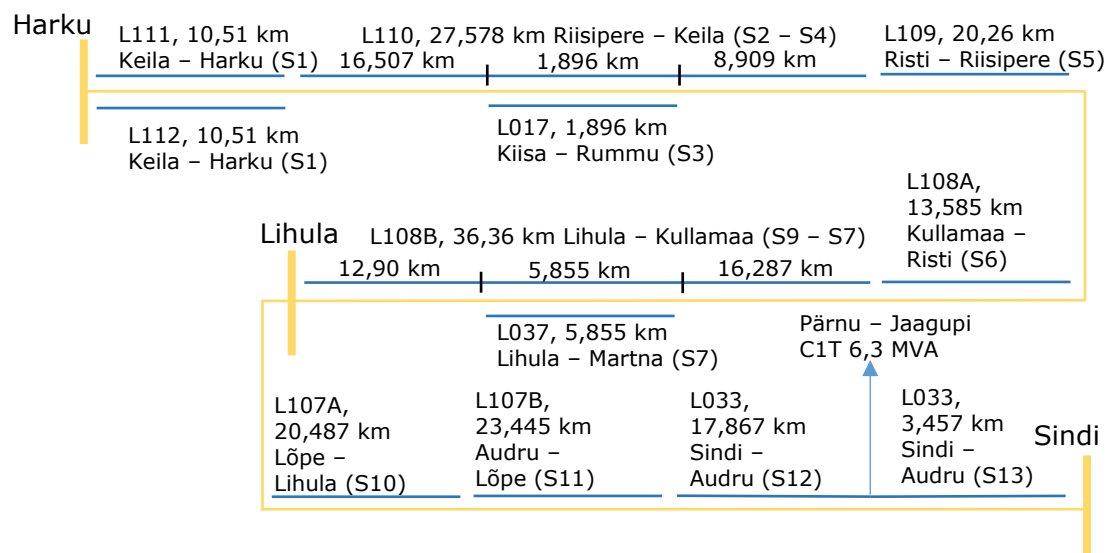
1.3 Transpositsioon

Elektriliin peab olema balansseeritud elektriahel, see tähendab, et elektriliin peab olema ekvivalentne elektriahel, mis võtab arvesse jaotatud parameetreid elektriliini ulatuses. Elektrienergia ülekandel pikkade vahemaade vahel osutub vajalikuks vaadelda mahtuvuslike efekte, sest igal faasil olev erinev mahtuvus põhjustab asümmeetriat [4]. Olemasoleva kontseptsiooni kohaselt transponeeritakse elektriliine, et vähendada voolude ja pingete asümmeetriat normaaltalitusel ning vähendamaks häireid madalasageduslikele kommunikatsioonikanalitele [6]. Transpositsiooni korral saadakse kogu liini kõikide faaside parameetrite keskväärtused ühesugused ja liini tervikuna võib vaadelda ligilähedaselt sümmeetrilisena [5].

Transpositsiooni tsükli all mõistetakse tüüpiliselt elektriliini lõiku, mille vältel teostatakse kaks transpositsiooni ning mille tulemusena on iga elektriliini faas elektriliini mastidel keskmise paigutusega $1/3$ elektriliini lõigu pikkusest. Üheahelalise elektriliini ühe täis tsüklilise transpositsiooni sektsiooni pikkus, horisontaalse või kolmnurkse paigutuse puhul, ei tohiks ületada vastavalt 24 km või 48 km selleks, et vastastikmõjud oleksid marginaalsed ning nendega poleks vaja arvestada. Nii-öelda tihe transponeerimine elektriliini pikkuse vältel toob kaasa täiendavaid komplikatsioone elektrimastide ja elektriliini ehitamise maksumuse osas. Sellest tulenevalt on mõistlik leida tasakaalupunkt transpositsiooni sageduse ja majanduslike kulutuste vahel. See juures tuleb täheldada, et liigne transpositsioonide vahelise vahemaa pikendamine pika elektriliini puhul, millest voolab märkamisväärne mahtuvuslik vool, võib põhjustada probleeme kogu elektrisüsteemi voolude ja pingete asümmeetriaga. Asümmeetria väljendub vastu- ja nulljärgnevuskomponentide tekke või olemasoluga pinges ja/või voolus [4] [6].

1.4 Harku - Lihula - Sindi 330 kV ja 110 kV elektriliin

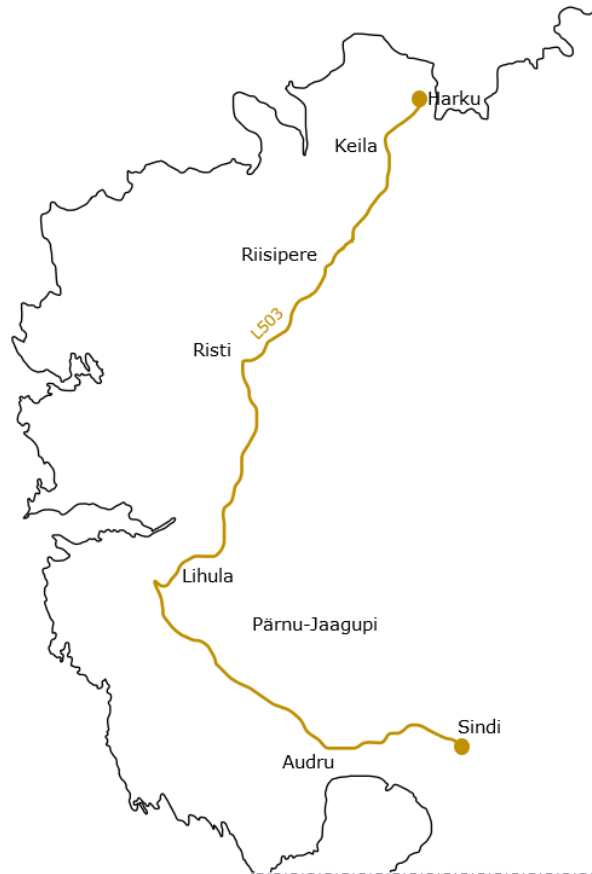
Selles töö osas kirjeldatakse ühisriputusega elektriliini masti geometriaid ning andmeid eeskätt selle modelleerimise vaatest. Antud elektriliini kirjeldavad andmed saadi Elering AS-ilt [8] [9] [10]. Harku - Lihula - Sindi ülekandeliin L503 liinipingega 330 kV kulgeb terviklikult Harkust kuni Sindini (vt joonis 1.2 ja 1.3). Kogu 171,97 km ulatuses on 330 kV liiniga samade mastide peal ehk ühisriputusel sektsiooniti erinevad 110 kV elektriliinid. 330 kV ülekandeliini L503 (kollase värviga) ning erinevate 110 kV elektriliinide (sinise värviga) järjestust ja pikkust ühisriputusega sektsioonidel illustreerib joonis 1.2 (kus on igale sektsioonile antud viitenumber S1...S13, mida kasutatakse ka mudeli ülesehitamisel sektsioonidele viitamiseks). Täiendavalt on joonisel 1.2 toodud fiktiivne Lihula latt, mida kasutatakse mudeli testimiseks.



Joonis 1.2 Harku - Lihula - Sindi 330 kV ja 110 kV ühisriputusega elektriliini osa põhimõtteskeem

Tabel 1.1 Ülekandeliini L503 kirjeldavate sektsioonide pikkused

Sektsioon	S1	S2	S3	S4	S5	Transpositsioon Ristis	S6	S7	
Pikkus	10,510	16,507	1,896	8,909	20,260			13,585	16,287
Σ pikkus Harku poolt, km	10,510	27,017	28,913	37,822	58,082			71,667	87,954
Σ pikkus Harku poolt, %	6,110	15,710	16,81	21,99	33,780		41,680	51,150	
Sektsioon	S8	S9	Transpositsioon Lihulas	S10	S11	S12	S13		
Pikkus	5,8550	12,900			20,487	23,445	17,867	3,457	
Σ pikkus Harku poolt, km	93,809	106,709			127,196	150,641	168,508	171,965	
Σ pikkus Harku poolt, %	54,550	62,050		73,970	87,600	97,990	100		

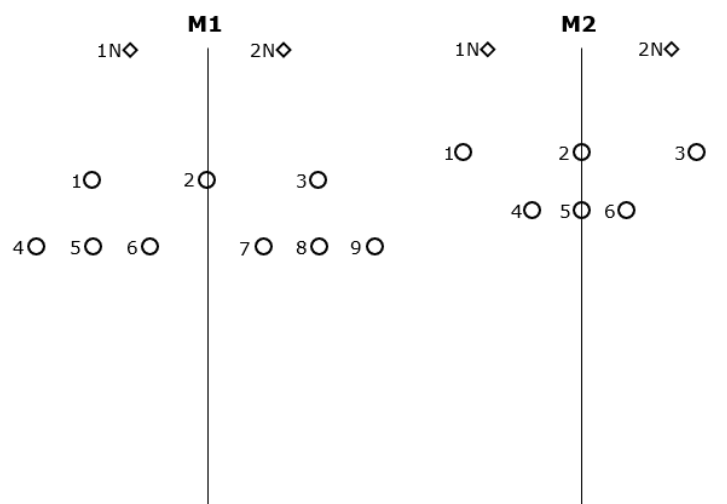


Joonis 1.3 Harku – Lihula – Sindi 330 kV õhuliin L503 Eesti kaardil [11]

1.4.1 Masti geomeetriad

Nagu jooniselt 1.2 selgub on Harku – Lihula - Sindi elektriliin valdavalt kaheahelaline (330 kV + 110 kV) ning kolmes sektsioonis (S1, S3, S7) ka kolmeahelaline (330 kV + 2x110 kV). Terve elektriliini ulatuses on palju erinevate tüüpide ja geomeetriaatega maste. Elektriliini modelleerimisel erinevat tüüpi mastid suurt rolli ei mängi. Kõige olulisem on faasi- ja neutraaljuhtide omavaheline geomeetiline paiknemine, mis on valdavas enamuses samasugune (olenevalt mitu ahelat on liinil). Mastide puhul on enim varieeruv mõõde masti (sellega ühtlasi juhtide) kõrgus, samaaegselt juhtide omavaheline geomeetria on valdavalt samasugune. Täiendavalt on masti kõrgus mõneti seotud maapinna reljeefiga (mida modelleerimiskeskkonnas ei saa arvestada). Sellest tulenevalt on faasi- ja neutraaljuhtide paiknemist kirjeldatud kahe erineva geomeetrilise paigutusega M1 ja M2, mille kõrgusteks on võetud keskmine vastava masti kõrgus. Vastavalt M1 kolmeahelaliste liinide jaoks ning M2 kaheahelaliste liinide jaoks (vt joonis 1.4).

Osad 110 kV elektriliinid on enne ja pärast ülekandeliiniga L503 ühisriputust eraldiseisvad. Täpsuse huvides modelleeriti ka eraldiseisvaid 110 kV elektriliini sektsioone enne või pärast ülekandeliiniga L503 ühisriputusel olemist (vt Lisa 1).



Joonis 1.4 Kolmeahelalise (M1) ja kaheaahelalise (M2) elektriliini masti faasi- ja neutraaljuhtide geomeetrilist paiknemist kirjeldavad skeemid [10]

Piksekaitsetrosside ja faasijuhtide paiknemist kirjeldavad nende keskpunktide koordinaadid referentstelgedes suhtes (vt tabel 1.2 ja 1.3). Esimeseks nii-öelda nullreferentsiks on maapind ning teiseks masti ristlõike keset läbiv sirge (referentse ilmestavad joonisel 1.4 olevad mustad teljed). Koordinaadid erinevate faasi juhtide puhul on toodud tabelis 1.2, 330 kV elektrijuhtmed paiknevad kõrgemal ehk geomeetrilistel positsioonidel 1, 2, 3 ning 110 kV elektrijuhtmed paiknevad ülejäänud geomeetrilistel faasijuhtide positsioonidel (4...6 või 4...9). Täiendavalt ei ole skeemil näidatud osajuhtmeid kuigi realsuses on L503 kolmeks lõhestatud (vt joonis 1.5) ning 110 kV elektriliinid valdavalt kaheks lõhestatud faasijuhtidega (vt joonis 1.6).

Tabel 1.2 Kolmeahelalise (M1) ja kaheaahelalise (M2) elektriliini masti faasijuhtide koordinaadid [8] [10]

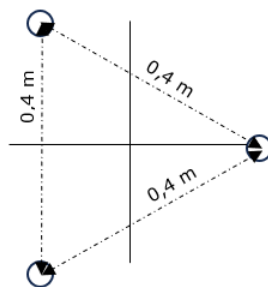
Faasijuhtide paiknemine				
Masti tähis	M1		M2	
Positsioon	X, m	Y, m	X, m	Y, m
1	-9,4	27,6	-9,9	31
2	0	27,6	0	31
3	9,6	27,6	9,7	31
4	-12,4	21,7	-4,1	26
5	-8,4	21,7	0	26
6	-4,4	21,7	4,1	26
7	3,1	21,7	-	-
8	7,1	21,7	-	-
9	11,1	21,7	-	-

Tabel 1.3 Kolmeahelalise (M1) ja kaheaahelalise (M2) elektriliini masti neutraaljuhtide koordinaadid [8]

Neutraaljuhtide paiknemine				
Masti tähis	M1		M2	
Positsioon	X, m	Y, m	X, m	Y, m
1N	-6,3	37,9	-7,8	39,5
2N	6,3	37,9	7,8	39,5

1.4.2 Faasi- ja neutraaljuhid

Harku – Lihula – Sindi 330 kV ülekandeliin L503 kasutab sümmeetriliselt kolmeks lõhestatud faase [10], kus iga osajuhe on CONDOR ACSR 402/52 elektrijuhe. Terve elektriliini ulatuses (S1...S13) on kõik kolm faasi lõhestatud ning teineteisest 0,4 m vahekaugusega (vt joonis 1.5).



Joonis 1.5 L503 osajuhtmete paiknemine lõhestatud faasis

ACSR 402/52 tehnilised parameetrid [12]:

- $d = 27,7 \text{ mm}$
- $R_{\text{Alalis, max}}(20^\circ\text{C}) = 0,0719 \text{ } \Omega/\text{km}$
- $I_{\text{lub}} = 1000 \text{ A}$
- $I_{k, \text{max}}(1 \text{ s}) = 43,7 \text{ kA}$
- $R_{\text{kiud}} = 0,00154 \text{ m}$

L503 kasutab piksekaitsetrossiks AACSR/AW SS-nF 58/39, mille tehnilised parameetrid saadi Elering AS-lt [8]:

- $d = 15,0 \text{ mm}$
- $R_{\text{Alatis, max}}(20^\circ\text{C}) = 0,46 \text{ } \Omega/\text{km}$

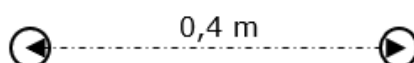
Harku – Lihula – Sindi 330 kV elektriliiniga ühisriputusel olevate 110 kV elektriliinide puhul on kasutuses kolme tüüpi juhtmeid: ACSR 242/39, AC 240/32 ning AC 240/39 (vt tabel 1.4 ja 1.5) [8]. Kõik elektriliinid peale L017 kasutavad kaheks lõhestatud faasi (vt jooni 1.6), mille osajuhtmete vaheline kaugus on 0,4 m.

Tabel 1.4 Harku – Lihula – Sindi 110 kV ühisriputusega elektriliinide juhtmete tehnilised parameetrid [13]

Juhte	ACSR 242/39	AC 240/32	AC 240/39
d , mm	21,8	21,6	21,6
$R_{Alalis, max (20^{\circ}C)}$, Ω/km	0,12	0,1182	0,1222
I_{lub} , A	745	605	610
$I_{k, max (1 s)}$, kA	26,1	-	-
R_{kiud} , m	0,00172	0,0017	0,0018
Alumiinium kiud, tk	26	24	26
Teras kiud, tk	7	7	7

Tabel 1.5 Ülekandeliinil L503 olevad ühisriputusega 110 kV elektriliinide juhtmed

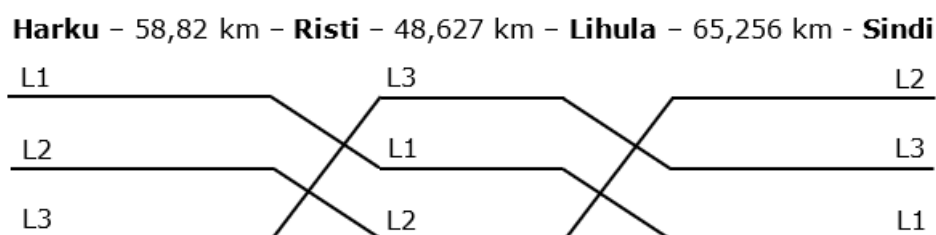
Elektriliin	Elektrijuhtme tüüp	Osajuhtmete arv (osajuhtmete vaheline kaugus, m)
L111	ACSR 242/39	x2 (0,4)
L112	ACSR 242/39	x2 (0,4)
L110	ACSR 242/39	x2 (0,4)
L017	AC 240/32	x2 (0,4)
L109	ACSR 242/39	x2 (0,4)
L108A	ACSR 242/39	x2 (0,4)
L108B	ACSR 242/39	x2 (0,4)
L037	ACSR 242/39	x1 (0,4)
L107A	AC 240/39	x2 (0,4)
L107B	AC 240/39	x2 (0,4)
L033	AC 240/39	x2 (0,4)



Joonis 1.6 Ülekandeliini L503-ga ühisriputusel olevate 110 kV elektriliinide osajuhtmete paiknemine lõhistatud faasis

1.4.3 Ülekandeliini L503 transpositsioon

Ülekandeliin L503 on transponeeritud Ristis ja Lihulas [9], mis on Harkust vastavalt 58,082 km ja 106,709 km (vt joonis 1.7 ja joonis L4.1). Mõlemal korral vahetatakse ära kõigi kolme elektrijuhtme positsioonid elektrimastidel.



Joonis 1.7 L503 transponeerimise põhimõtteskeem

2 ÜHISRIPUTUSEGA ÕHULIINI MODELLEERIMINE

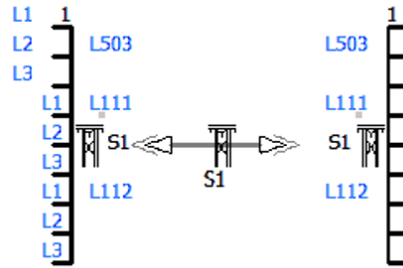
Soovitud talitluste, efektide ja protsesside uurimiseks osutus heaks tarkvaraks PSCAD. Antud tarkvara on mitmekülgne, mis tuleb kasuks põhjalikul analüüsil, kui ei ole veel täpselt teada milliseid parameetreid või efekte uurida vaja on. Lisaks on mitme pingeastmelise ühisriputusega elektriliini modelleerimine antud tarkvaras küllaltki lihtne ning väga täpne. See on soovitatavate efektide uurimiseks vajalik, sest ühisriputusega elektriliinis tekkivat asümmeetriat kirjeldavad keerukad võrrandid ja seosed. Eelnevalt punktides 1.2.1 ja 1.2.2 vaadeldud lihtsa üheaahelalise liini vastastikmõjude kirjeldamiseks eeldati kas voolu või pinge sümmeetriat, mis reaalsuses ei pruugi tõeks osutada ning lisab liini matemaatilisse kirjeldamisse täiendavat keerukust. Sellest tulenevalt osutus mõneti lihtsamaks meetodiks elektriliini modelleerimine tarkvaraga, mille vahendusel on soovitatavad efektid kergesti katseliselt uuritavad.

2.1 Ühisriputusega mudeli komponendid

2.1.1 Elektriliinid

Vajalik oli modelleerida kolme- ja kaheaahelalisi elektriliine, millest ülekandeliini L503 oli vaja Ristis ja Lihulas transponeerida. Sellest lähtuvalt modelleeriti elektriliini sektiioone (S1 – S13) PSCAD-i elektriliini segmendi elemendiga nii-öelda virtuaalsete otsadega konfiguratsioonis (*Remote ends*). Antud liini elemendi lõppu ja algust (tinglikult) väljendavad nn liini otsad (mis on omavahel nimede, joonis 2.1 puhul S1, vahendusel seotud), mille vahendusel saab vajalike ühendusi teha. Iga elektriliini igat faasi modelleeriti skeemil eraldi, et õigetes kohtades L503 juhtmed transpositsiooni kohaselt ümber ühendada ning 110 kV elektriliinid õige pikkusega modelleerida. Täiendavalt modelleeriti elektriliinide erinevate faaside paigutused Lisa 1 ja Lisa 4.1 toodud faseeringute järgi. Skeemi lihtsustamise huvides võeti liini faasid, mida polnud tarvis eraldi faasidena kirjeldada, ühejoonekonfiguratsiooniks kokku.

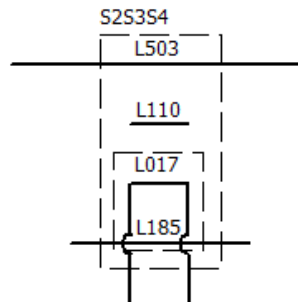
PSCAD võimaldab erinevaid (110 kV ja 330 kV) elektriliine ühe sama liini segmendina modelleerida, mille puhul tuli igale juhtmele määrata segmendi definitsioonis, (segmendi piires) nn faasi number (*Connection Phasing*). Faasi number määrab juhtme järjestuse liini virtuaalsel otsal, kus skeemi elemendil olevast nr ühest edasi faasi numbrid liiguvad kasvavas järjekorras. Joonisel 2.1 on näide, kus esimest kolme ühenduskohta (faasi numbritega: 1, 2 ja 3) on kasutatud L503 faaside L1, L2 ja L3 modelleerimiseks ning sarnaselt ka L111 (faasi numbritega: 4, 5, 6) ja L112 (faasi numbritega: 7, 8, 9).



Joonis 2.1 Näide esimese sektsiooni liini segmendist ja liini otsadest

Joonisel 2.1 on ka näha, et segmentide kõrvale vastava liini alguskohale segmenti peal on liini numbrid kirjutatud, et skeem oleks üheselt mõistetav. Täiendavalt on selguse huvides segmentide juures faasidele (L1, L2 ja L3) viidatud, mille juures hoiti 110 kV elektriliinide faasijärjestust segmentil alati L1, L2, L3 ning L503-l vastavalt faseeringule.

Liitsustamise huvides võeti võimaluse korral elektriliini sektsioonid üheks ühejooneskeemi komponendiks kokku (vt joonis 2.2). Mille puhul jäi võimalus ka komponendi siseselt faasi kaupa toiminguid teha, sest komponendid koosnevad endiselt joonis 2.1 ilmestatud faaside kaupa modelleeritud liini segmentidest.



Joonis 2.2 Näide liini komponendist

Elektriliini juhtme ja piksekaitse trossi parameetrid, faaside geomeetriselised paigutused (sellega ühtlasi ka faseering) määrati liini definitsioonis punkti 1.4 kohaselt. Kasutati nn manuaalse sisestuse meetodit, sest masti geomeetriad ei olnud Y0 telje suhtes sümmeetrilised ning antud meetod võimaldas geomeetriaid ka asümmeetriliselt sisestada. Maa takistusena kasutati PSCAD tarkvara poolt vaikimisi määratud väärtust 100 Ω m. Joonisel 2.3 on toodud näide S1 liini defineerimisvaatest, kus on ka eelnevalt mainitud faasi numbrid (*Connection Phasing*).

Definition Canvas (S1_3)

Segment Name: S1

Steady State Frequency: 50 [Hz]

Length of Line: 10.527 [km]

Number of Conductors: 9

Frequency Dependent (Phase) Model Options

Travel Time Interpolation: On

Curve Fitting Starting Frequency: 0.5

Curve Fitting End Frequency: 1.056

Total Number of Frequency Increments: 100

Maximum Order of Fitting for Yc: 20

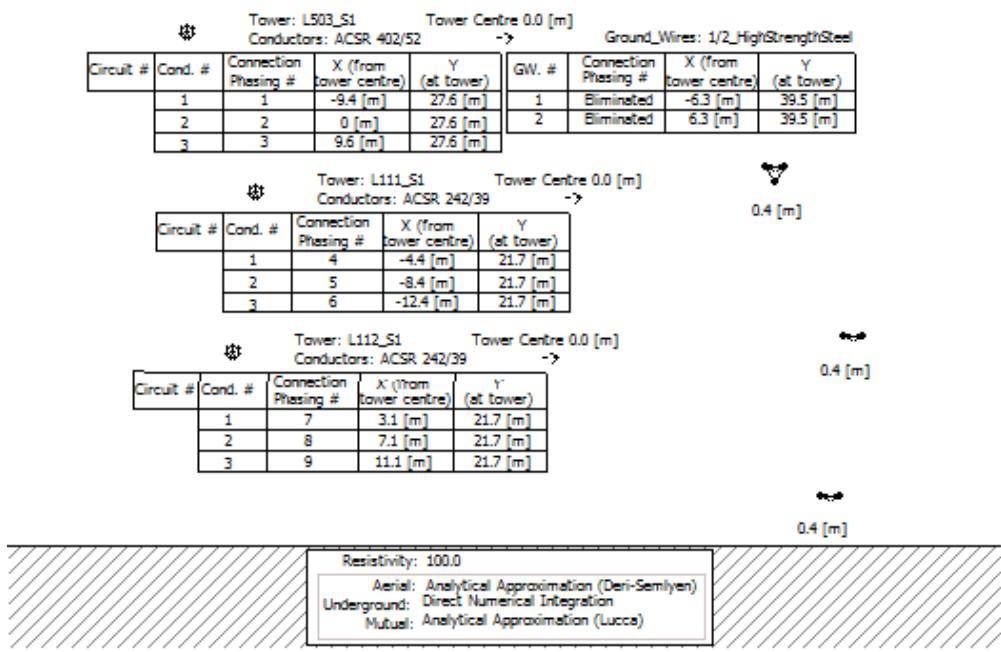
Maximum Fitting Error for Yc: 0.2

Max. Order per Delay Grp. for Prop. Func.: 20

Maximum Fitting Error for Prop. Func.: 0.2

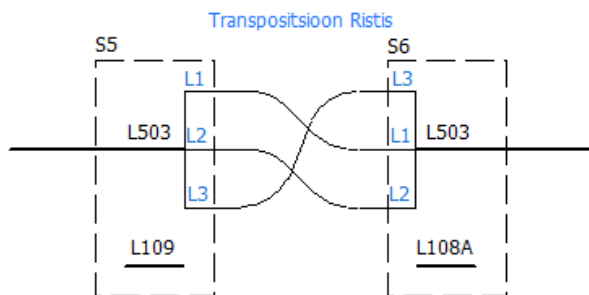
DC Correction: Disabled

Passivity Checking: Disabled



Joonis 2.3 Näide liini segmenti definitsioonist

Transponeerimist oleks võimalik PSCAD tarkvaras teostada mitmete meetoditega nt: faasi numbrite ära vahetamisega, liini juhtmete ümber ühendamisega jne. Antud mudeli puhul on ülekandeliini L503 faaside segmenti komponendid defineeritud ühendusena ning põhiskeemil on juhtmeid ümber ühendatud. Sellega on tagatud, et transponeerimine on põhiskeemilt näha.

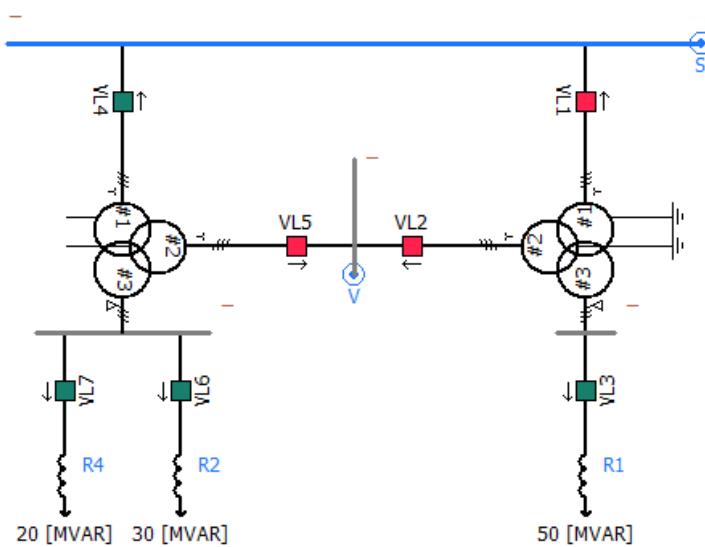


Joonis 2.4 Näide modelleeritud Risti transponeerimisest

Peale või enne transpositsiooni jätkub L503 kirjeldamine põhiskeemil ühejooneskeemina (vt joonis L4.2), kuid segmentides on faasi paigutused vastavalt faseeringule (vt joonis L4.1).

2.1.2 Trafod

Trafosid modelleeriti tarkvara PSCAD tüüpilise trafo mudelina (vt joonis 2.5), mille puhul määrati tabel 2.1 toodud parameetrid. Nii Harkus kui ka Sindis on kaks jõutrafoot ning mõlema alajaama trafodest maandati mudelis ühe trafo neutraal. Kasutatud trafo mudeli puuduseks on asjaolu, et trafo võimsus kehtis iga mähise kohta. Trafo keskpinge (20 kV) mähis oli tüüpiliselt 1/3 või 2/3 trafo nimivõimsusest. Küll aga antud asjaolu tulemusi, mida mudelist liini analüüsiks tarvilik saada oli, oluliselt ei mõjuta.



Joonis 2.5 Näide modelleeritud Harku jõutrafodest

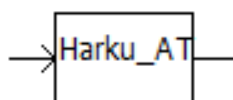
Tabel 2.1 Harku ja Sindi trafode parameetrid kolme mähispaari kohta [8]

Parameeter	Harku		Sindi	
	A1T	A2T	A1T	A2T
S_{nT} , MVA	200	200	200	200
U_{nT1} , kV	347	347	347	347
U_{nT2} , kV	117,5	117,5	117,5	117,5
U_{nT3} , kV	21	21	21	21
$Z_{12\%}$, %	14,35	14,37	14,58	15,36
$Z_{13\%}$, %	27,63	27,73	33,88	22,9
$Z_{23\%}$, %	43,34	43,52	51,54	43,69
ΔP_{12} , kW	423,94	425,58	423,07	325,9
ΔP_{13} , kW	114,73	117,62	153,79	72,9
ΔP_{23} , kW	126,05	130,75	166,1	89,8

Tabel 2.2 Sindi A2T neljanda mähise ja selle mähispaaride parameetrid [8]

U_{nT4} , kV	$Z_{14\%}$, %	$Z_{24\%}$, %	$Z_{34\%}$, %	ΔP_{14} , kW	ΔP_{24} , kW	ΔP_{34} , kW
21	32,17	53,39	11	73,7	109,9	0

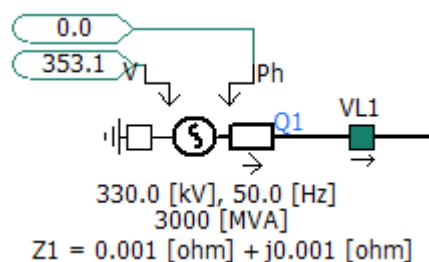
Põhilise vaatuse all on Harku – Lihula - Sindi elektriliin ning mitte trafod, küll aga oli soov võimalikult täpselt antud elektrivõrgu osa modelleerida, mille pärast peeti vajalikuks ka trafosid mudelis kajastada. Trafode modelleerimine (hüpoteetiliselt) arvestab 330 kV ja 110 kV osade ühenduses olemisega, mis võimaldab mudelis kajastada asümmeetria ülekandumist ühelt pingestmelt teisele. Lisaks trafode kajastamine jätab võimaluse hilisemas analüüsis vajadusel reaktiivvõimsuse kompenseerimist korrektselt modelleerida. Sellest tulenevalt osutus heaks variandiks trafod üheks komponendiks kokku võtta. Põhiskeemi sai selle arvelt lihtsustada (vt joonis L4.2), kuid jäi võimalus soovi korral teha trafode skeemis vajalikke muudatusi. Trafo nn plokis (vt joonis 2.6) on joonisel 2.5 toodud skeem ning plokil on 330 kV sisend ja 110 kV väljund, et põhiskeemiga ühendusi luua. Soovi korral sai lülitusi või toiminguid teostada trafo ploki sees.



Joonis 2.6 Harku trafode plokkskeem

2.1.3 Toiteallikad

Toiteallikatena otsustati kasutada kolmeefaasilist lihtsat generaatori mudelit (vt joonis 2.7). Antud generaatori hea omadus seisneb selles, et generaatorile saab määrata jadamisi päri- ja nulljärgnevustakistust, mida saab rikketalitluse uurimisel kasutada. Täpsemalt lühistalitluste uurimiseks sisestati generaatori jadamisi takistusteks Elering AS-lt saadud süsteemi ekvivalentne takistus vaadeldavas elektrivõrgu punktis (vt tabel 2.3) [8]. Selle eesmärgiks on arvestada ülejäänud elektrivõrguga. Püsitalitlust uurides pandi generaatori takistuseks vähimad võimalikud väärtused. Nii 330 kV kui ka 110 kV generaatorite puhul eeldati pingetegurit $c = 1,07$, mis teeb generaatorite klemmipingeteks 353,1 kV ja 117,7 kV. Pingeteguriga $c = 1,07$ arvestati ligilähedasel modelleerimisel, kui imiteeriti mudeliga võrgu püsiseisundit võrgu mõõtmiste põhjal (vt punkt 2.1.3), pandi generaatori klemmipingest vastava AJ latipinge kohaselt.



Joonis 2.7 Näide 330 kV lati toitmiseks kasutatud generaatori mudelist

Tabel 2.3 Süsteemiharude takistused

Alajaam	Pinge, kV	Tähis	R_+, Ω	X_+, Ω	R_0, Ω	X_0, Ω
Harku	330	Q1	2,6311	16,534	1,6754	13,9193
Sindi	330	Q2	2,578	18,865	2,3413	13,1572
Lihula	110	Q3	2,789	9,8195	1,6131	7,0216

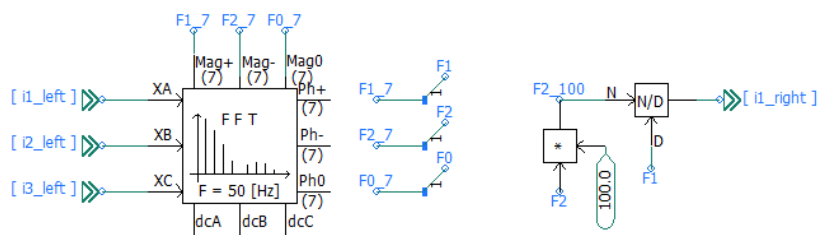
2.1.4 Asümmeetria mõõtmine

Liini asümmeetria väljendamiseks oli vaja pinget ja voolu väärtused sümmeetrilisteks komponentideks teisendada. Selleks kasutati joonisel 2.8 näidatud skeemi, mille õigsuses ei olnud algselt kõige kindlam. Sellest lähtuvalt modelleeriti järgnevuste poolest teada talitlust, nt ühefaasiline lühis, mille puhul [14]:

$$I_{kA1} = I_{kA2} = I_{k0} = \frac{1}{3} I_{kA} \quad (2.1)$$

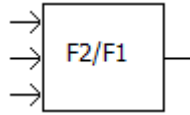
Järgnevalt kontrolliti valemi (2.1) kehtivust lihtsa mudeliga (ideaalne generaator ja S1 330 kV osa), ühefaasilist lühist liini lõpus modelleerides. Antud katsetuse puhul valem (2.1) kehtis. Sellest järeldub voolu või pingete sümmeetrilisteks komponentideks teisendamise õigsus.

Asümmeetriat väljendatakse tihtipeale vastujärgnevuskomponendi suhtena pärijärgnevuskomponendi, mida kasutatakse ka antud lõputöös nii voolu kui ka pinget asümmeetria väljendamiseks. Vooludest suurus I_2/I_1 ning pingetest suurus U_2/U_1 moodustavad nn asümmeetria parameetrid. Teatud tüüpi rikete või talitluste korral tuleb ka nulljärgnevuskomponenti vaadelda, kuid tavakoormusega talitluse asümmeetriat kirjeldab $100 \frac{E_2}{E_1}$ hästi.



Joonis 2.8 Protsentuaalse vastujärgnevus ja pärijärgnevus suhte saamiseks kasutatud funktsioonide skeem

Põhjusel, et sarnase meetodiga asümmeetria mõõtmist kasutatakse paljude erinevate elektrivõrgu punktide asümmeetria väljendamiseks, oli otstarbekas antud skeem joonisel 2.8 üheks mooduliks kokku võtta (vt joonis 2.9). Antud moodul võtab faasikaupa sisendid (faasid L1, L2 ja L3 vastavalt ülevalt lugedes esimene, teine ja kolmas ühendus) ning väljastab protsentuaalse vastujärgnevuse suhte pärijärgnevusse $100 \frac{E_2}{E_1}$.



Joonis 2.9 Moodul voolude või pingete väärtuste sümmeetrilisteks komponentideks teisendamiseks ja vastujärgnevus suhte pärijärgnevusse arvutamiseks

2.1.5 Koormused

Koormuseid modelleeriti Elering AS-lt saadud võrgumõõtmiste [15] järgi. Mõõtmised võeti ühe talvise püsiseisundi järgi kajastamiseks suurt koormust ning ühe suvise püsiseisundi järgi kajastamiseks väikest koormust. Lihtsaim oli antud mudeli jaoks koormuseid nii-öelda läbijooksvate alajaamade jaoks võtta, sest sealne tarbimine koormabki ainult modelleeritud 110 kV elektriliine. 110 kV alajaamade puhul, mis ei ole läbijooksvad, saadi koormus liini(de) ja trafo(de) koormuste järgi. Koormuse mõõteandmed võeti alajaamades olevate trafode ning liinide samal ajal mõõdetud võimsuste järgi. Täiendavalt eraldiseisvate 110 kV elektriliinide (nt L017 ja L185) puhul vaadeldi võimsusvoo suunda, millele vastavalt koormati õigest alajaamast (liini koormuse alusel) ning toideti oma (ideaalse) generaatoriga liini vastasotsast. Antud põhimõtete kohaselt saadud koormused on toodud tabelis 2.4. Erinevate komplikatsioonide tõttu ei saadud 110 kV elektriliine talitlema mõõdetud koormuste järgi. Küll aga on koormuste suurusjärgud mõõtmiste alusel arvatud. Tulemusi see suuresti ei mõjuta, sest samu koormuseid kasutatakse valdavalt kõigi katsetuste jaoks, mis tagab katsetuste tulemuste omavaheliste võrreldavuse.

Tabel 2.4 Modelleerimiseks kasutatud koormused

Alajaam	Talvine (TK)		Suvine (SK)	
	P, MW	Q, Mvar	P, MW	Q, Mvar
Harku L503 (330 kV)	-217,3	-13,0	-58,64	-51,25
Sindi L503 (330 kV)	219,3	-53,1	58,18	-33,76
Harku	-30,77	-15,79	-13,04	-2,13
Keila	5,4	2,0	-1,78	-2,46
Riisipere	-1,7	-0,5	-0,12	-0,03
Rummu	-4,29	-5,05	-1,65	0
Kohila	-4,89	-6,43	-0,45	-0,34
Risti	-2,89	0,20	-0,19	0,06
Martna	-10,9	-0,58	-0,3	0,1
Vigala	-	-	-	-
Kullamaa	-	-	-	-
Lihula	3,12	-0,51	-0,06	0,39
Audru	2,14	-0,9	-2,9	0
Pärnu Jaagupi	-0,98	-0,6	-0,74	0,49

Koormuseid otsustati modelleerida aktiivtakistite ja vastavalt induktiivsele või mahtuvuslikule koormusele induktiivpoolide või kondensaatoritena. Antud meetodiga jääb võimalus faasi kaupa mõõtmisi teostada (mida läheb vaja, kui tekib vajadus sümmeetriliste komponentide meetodi kasutamiseks) ning vajadusel asümmeetrilist koormust modelleerida. Aktiiv- ja reaktiivvõimsused teisendati koormusimpedantsiks \underline{Z}_K valemi (2.2) alusel:

$$\underline{Z}_K = \frac{U^2}{\underline{S}^*} \quad (2.2)$$

Kus U on koormusele rakenduv liinipinge

\underline{S}^* on koormuse näivvõimsuse kaaskompleks

Millest vastavalt positiivsele või negatiivsele reaktiivtakistusele arvutati koormuse induktiivsus L_K :

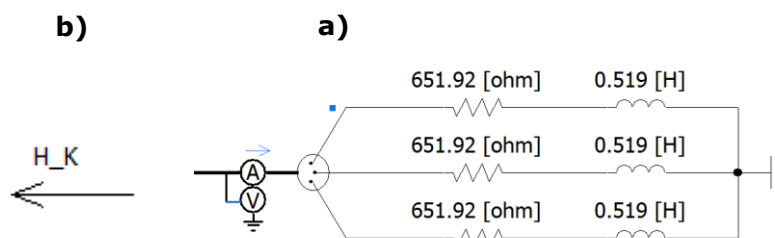
$$L_K = \frac{X_K}{\omega} \quad (2.3)$$

või mahtuvus C_K :

$$C_K = \frac{1}{\omega X_K} \quad (2.4)$$

Kus X_K on \underline{Z}_K imaginaaros

$\omega = 314$ on nurksagedus



Joonis 2.10 a) näide mudelis kasutatud koormusest, b) põhiskeemil koormuse mooduli sümbol.

Koormus võeti lihtsustamise huvides üheks mooduliks kokku (vt joonis 2.10 b) ning joonis L4.2).

2.2 Mudeli testimine

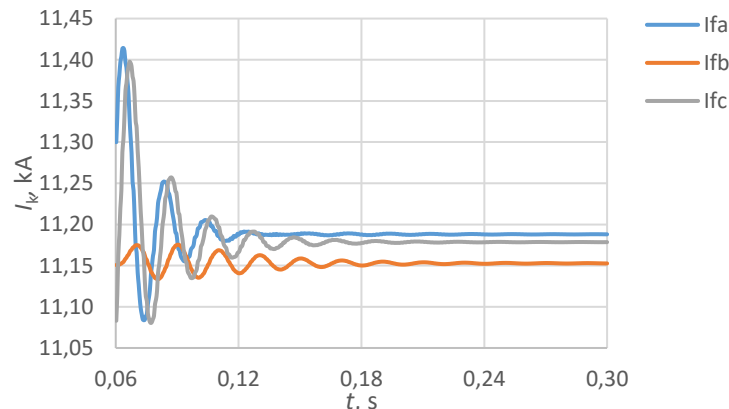
Põhjused, et koostati (vähemalt autori jaoks) küllaltki keeruline skeem, milles võib eksimusi esineda, oli mõistlik mudeli tulemusi võrrelda teiste allikate tulemustega. Täiendavalt on mõistlik mudeli testimine erinevates talitlustes ja lülitustes, et verifitseerida sellest hiljem saadavaid tulemusi.

2.2.1 Süsteemiharude testimine

Süsteemi harusid modelleeriti generaatorite päri- ja nulljärgnevustakistuste kaudu. Nende testimiseks on üks variant võrrelda koostatud PSCAD mudelist ja Elering AS-i poolt kasutatava lühiste arvutamise tarkvarast [8] saadud lühisvoolusid. Siinkohal oli oluline vaadelda samaväärseid lühisvoolusid, milleks valiti mööduva talitluse lühisvool, mida on mõneti lihtsam mõlema mudeli puhul võrrelda. Siirdeprotsessi (aperioodilise voolu komponendi puhul) loetakse tavaliselt lõppenuks kolmekordse ajakonstandi jooksul [1] ning võttes suurima aktiiv- ja reaktiivtakistuse suhte ajakonstandi arvutamiseks, saab olla kindel mööduva talitluse vaatlemises. Suurim x/r suhe on 330 kV elektriliinil, millel $\varphi = 85^\circ$:

$$T_a = \frac{3X}{R\omega} = \frac{3 \cdot \sin 85}{314 \cdot \cos 85} = 109 \text{ ms} \quad (2.5)$$

Ehk 109 ms möödudes võib tarkvaradest PSCAD ja CAPE mööduvaid lühisvoole võrrelda (eeldusel, et lühist simuleeritakse juba võrdlemisi stabiliseerunud olukorras, sest muidu on lühisvool generaatorite initsialiseerimisomadustest mõjutatud). Jooniselt 2.11 on näha kuidas u 100 ms möödudes on lühisvoolud valdavalt stabiliseerunud. Täiendavalt on tabel 2.5 toodud erinevate mudelite lühisvoolud küllaltki sarnased, et lugeda süsteemiharusid õigesti modelleerituteks.



Joonis 2.11 Näide Harku 330 kV lati kolmefaasilise lühise lühisvooludest

Tabel 2.5 Kolmefaasiliste ja ühefaasiliste mööduvate lühisvoolude võrdlus mudelite vahel

Alajaam	Pinge, kV	$I_k^{(3)'}$, kA		$I_k^{(1)'}$, kA	
		PSCAD	CAPE	PSCAD	CAPE
Harku	330	11,170	11,141	12,080	12,100
Lihula	110	6,650	6,639	7,450	7,452
Sindi	330	9,480	9,495	10,100	9,900

2.2.2 Liinide takistuste võrdlus

PSCAD tarkvaras koostatud mudelis takistuse väärtuste saamiseks kasutati sagedusest sõltuvat takistuse mõõtmisfunktsiooni plokki (*Harmonic Impedance*), ühendades see vaadeldavale liinile (vajadusel liin eraldati tehes vastavad lahti ühendused) ning šunteerides liin vaadeldava liinilõigu lõpus. Esmalt vaadeldakse kahe ülekandeliini L503 lõigu takistusi ning kui nendes peaks suuri lahkkelisid esinema, saab täpsemalt sektsiooni kaupa analüüsi teha. Tuleb tähele panna, et lõputöö koostamise hetkel ei ole Lihulas 330 kV alajaama ning takistusi vaadeldakse kahes sektsioonis, sest CAPE mudelis [8] on perspektiivselt Lihula alajaamaga arvestatud. Täiendavalt on kahe sektsiooni takistuste võrdlemine mõnevõrra täpsem kui terve liini takistuste võrdlemine, millest potentsiaalselt tuleks välja, millisel lõigul on takistuste erinevus suurem.

Tabel 2.6 Liini lõikude takistuste võrdlused kahe mudeli vahel

Liini lõik	CAPE		PSCAD	
	\underline{Z}_+, Ω	\underline{Z}_0, Ω	\underline{Z}_+, Ω	\underline{Z}_0, Ω
Harku - Lihula	31,15∠85,08°	79,76∠74,71°	31,08∠85,04°	87,35∠74,06°
Lihula - Sindi	18,80∠85,03°	47,69∠75,08°	19,49∠85,04°	53,05∠73,78°

Vaadeldakse ka ühe 110 kV elektriliini takistusi, sest kõik 110 kV elektriliinid on samade põhimõtete alusel modelleeritud. Kuna 110 kV elektriliinide kohta on olemas võrgu mõõtmistulemused [15] (takistuste protokollid), oli otstarbekas pigem nendega võrrelda:

- L111 takistuste võrdlus
 - Mõõdetud [16]: $\underline{Z}_+ = 3,101\angle 78,15^\circ \Omega$ ja $\underline{Z}_0 = 10,192\angle 74,29^\circ \Omega$
 - PSCAD mudelist: $\underline{Z}_+ = 3,021\angle 77,73^\circ \Omega$ ja $\underline{Z}_0 = 13,03\angle 76,16^\circ \Omega$

Nii 110 kV elektriliinide takistuste kui ka 330 kV ülekandeliini takistuste (vt tabel 2.6) võrdlusest teiste allikatega selgub, et liinide pärijärgnevustakistused on tarkvaras PSCAD koostatud mudelis antud lõputöö eesmärkideks piisavalt täpsed, kuid nulljärgnevustakistus on PSCAD mudelis liialt suur. Küll aga ei ole püsiseisundi analüüsil täpne nulljärgnevustakistuse kajastamise täpsus nii oluline.

2.3 Mudeli verifitseerimine püsiseisundi mõõtmiste alusel

Mudeli verifitseerimiseks saadi püsiseisundi parameetrid vaadeldavate võrguelementide kohta Elering AS-lt [15]. Esialguses lähenemises eeldatakse võrgu parameetrite sümmeetriat ning verifitseeritakse ainult ülekandeliini L503, et saada indikatsiooni põhivaatuse all oleva liini ligilähedaselt õiges talitlemises. Selle

teostamiseks vaadeldakse ülekandeliini L503 võimsuseid Harkus ja Sindis (vt tabel 2.7), määratakse võimsusvoo suund, mille alusel koormatakse liini ühest alajaamast ning toidetakse teisest. Täiendavalt on Harku ja Sindi 330/110/20 kV trafod välja lülitatud, et vaadelda ainult ülekandeliini L503.

Tabel 2.7 L503 Koormused, latipinged ning liini voolud Harku ja Sindi alajaamades ülekandeliinilt mõõdetuna

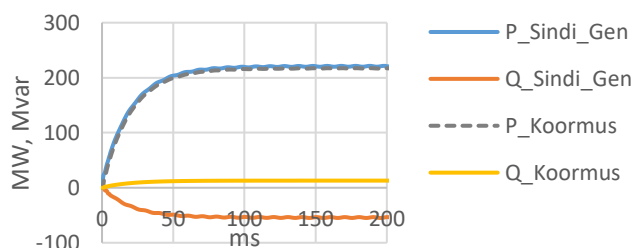
Mõõtepunkt	P, MW	Q, Mvar	U, kV	I, A
Harku	-217,27	-12,97	352,78	356,22
Sindi	219,27	-53,09	352,61	369,40

Negatiivne koormus tähendab võimsuse nii-öelda alajaama sisse tulemist ning positiivne välja minemist. Antud olukorras toidab Sindi Harkut, kus on ca 217 MW aktiivkoormust ning ca 13 Mvar reaktiivkoormust. Sellest lähtuvalt arvutatakse koormustakistus ning induktiivsus Harkusse:

$$\underline{Z}_K = \frac{352,78^2}{217,27 - j12,97} = 570,77 + j34,07 \Omega \quad (2.2)$$

Ning koormuse induktiivsus:

$$L_K = \frac{34,07}{314} = 0,1085 \text{ H} \quad (2.3)$$



Joonis 2.12 Simuleeritud ülekandeliini L503 koormus püsiseisundi mõõteandmete põhjal

Joonise 2.12 põhjal on hinnanguliselt siirdeprotsess peale 100 ms valdavalt möödunud, kuid selleks, et püsiseisundi talitluses kindel olla, võrreldakse mõõdetud parameetreid ja modelleeritud parameetrite väärtuseid ajahetkel 200 ms. Ajahetk parameetrite vaatlemiseks on mõneti fiktiivne ning tuleneb mudeli initsialiseerimise omapärast.

Tabel 2.8 Modelleeritud ülekandeliini parameetrid L503 koormatud lülituses

Mõõtepunkt	P, MW	Q, Mvar	U, kV	I, A
Harku	-217,19	-12,96	352,57	356,0
Sindi	221,49	-53,90	352,60	373,0

Nagu tabeli 2.7 ja tabeli 2.8 väärtuste võrdlemisest selgub, on mudeli tulemused väga ligilähedased mõõdetud parameetritega, mis annab kinnitust mudeli (vähemalt 330 kV osa) õigesti talitlemises. Mudeli õige talitlemise kontroll lihtsas püsitalitluses tagab ka mudeliga saadavate katsetuste tulemuste usaldusvärsuse.

3 ASÜMMEETRIA ANALÜÜS

Asümmeetria väljendamiseks kasutatakse eelnevalt käsitletud vastujärgnevuse suhet pärijärgnevusse, seda nii asümmeetrilise voolu kui pinge väljendamiseks. Standardi EVS-EN 50160 [17] kohaselt peab igas nädalases ajavahemikus 95 % toitepinge vastujärgnevuskomponendi 10-minutilisest keskmestatud efektiivväärtustest jääma vahemikku 0 % kuni 2 % pärijärgnevuskomponendist (ülikõrgepingetoite tunnussuuruste kohaselt). Täiendavalt on samas standardis samad väärtused ka kõrgepingetoite (mille alla kuuluvad 110 kV elektriliinid) kohta toodud. Küll aga on ülekandeliinid disainitud talitlema maksimaalse sümmeetrilise kolmefaasilise koormusega, millest tulenevalt võib osutuda mõistlikuks ülekandeliini asümmeetrilise pinge lubatavat väärtust veelgi piirata.

Peale selle modelleeritakse ainult vaadeldavat elektriliini (Harku – Lihula – Sindi), mille puhul ei ole ülejäänud võrgu panust resulteeruvasse asümmeetriasse arvestatud. Arvestades pinge asümmeetria kumulatiivse omapäraga [18], on mõistlik ainult ühes elektriliinis tekkivat pinge asümmeetriat käsitleda rangemas vahemikus kui standardis kehtestatud väärtused. Sellest hoolimata annavad standardis toodud väärtused tulemuste võrdlemiseks pidepunkti. Selle pärast lähtutakse standardis toodud suurustest ning katsetatakse erinevaid võrgu topoloogiaid, lülitusi ja talitlusi, millest potentsiaalsed kitsaskohad, probleemsed või mitteprobleemsed kohad välja tulevad.

Katsetuste juures tuuakse välja ka voolu vastujärgnevuskomponendi suhe pärijärgnevuskomponenti. Küll aga ei ole elektriliinide asümmeetrilist voolu standardites kehtestatud. Olemas on standard 60043-1 [19], mis kehtestab asümmeetrilise voolu väärtused elektrimasinate jaoks, kuid sellest pole suurt kasu ülekandeliini asümmeetrilise voolu hindamise juures. Järeldub, et asümmeetrilist voolu ei saa sama rangelt (etteantud vahemikus) kui asümmeetrilist pinget vaadelda, sellest hoolimata annavad asümmeetrilise voolu väärtused erinevate tendentside ja korrelatsioonidega aimdust võrgus toimivate efektide kohta.

3.1 Asümmeetria normaalskeemiga

Esmalt uuritakse asümmeetriat koormates võrku punktis 2.1.5 toodud koormustega, et esimest aimdust tekkivast asümmeetriast saada ning hinnanguliselt suure ja väikese koormusega tekkivat asümmeetriat võrrelda. Liini faasipingeid ja voole mõõdetakse ülekandeliini L503 pealt Harkus, Lihulas ja Sindis faasi kaupa ning sümmeetriliste

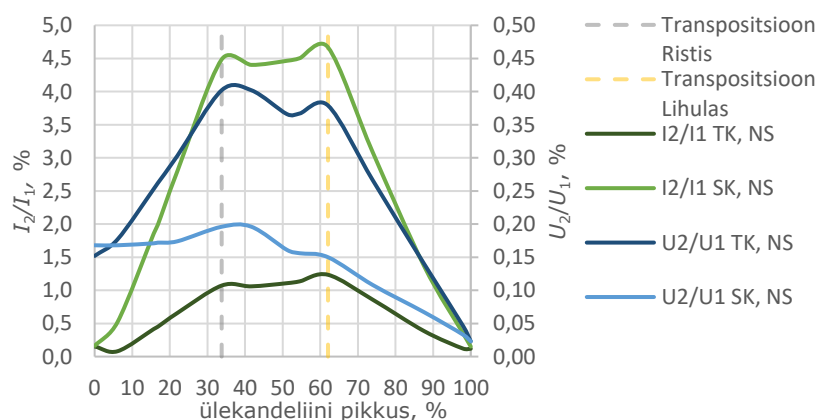
komponentide meetodiga arvutatakse voolu ja pinge vastujärgnevuskomponendi suhe pärijärgnevuskomponenti (vt tabel 3.1).

Tabel 3.1 Ülekandeliini L503 asümmeetria parameetrid normaalskeemiga erinevate koormuste korral

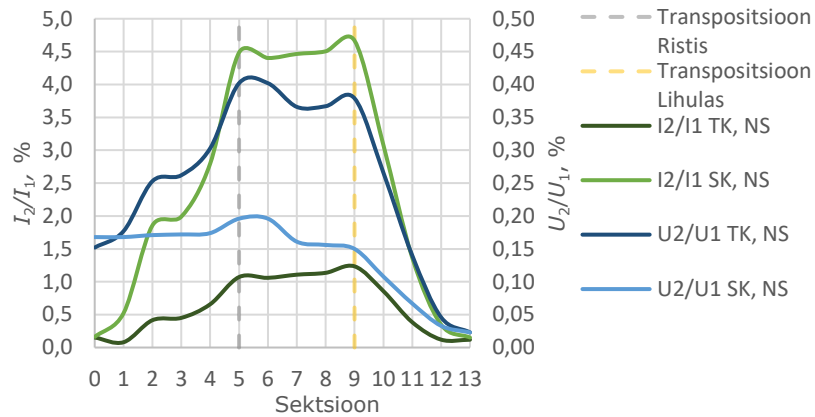
Mõõtepunkt	Talvine koormus		Suvine koormus	
	$U_2/U_1, \%$	$I_2/I_1, \%$	$U_2/U_1, \%$	$I_2/I_1, \%$
Sindi	0,023	0,119	0,023	0,162
Lihula	0,379	1,235	0,150	4,668
Harku	0,152	0,153	0,168	0,152

Antud katsetusest selgub, et tekkiv pinge asümmeetria mõneti sõltub koormusest. Täiendavalt leiab kinnitust I_2/I_1 suuremad väärtused väiksema koormuse puhul, sest I_2/I_1 on suhteline suurus ehk suurema koormuse korral paistab voolu vastujärgnevuskomponent suhteliselt väiksem kui väiksema koormuse korral. Samuti viitab see teatavale püsivale (koormusest sõltumatule) voolu vastujärgnevuskomponendile.

Kolme mõõtekoha vaatlemine annab aimdust tekkivast asümmeetriast, kuid täpsema analüüsi teostamiseks oleks vajalik mõõtepunktide resolutsiooni suurendamine. Selle saavutamiseks mõõdetakse pingeid ja voole peale (Harku poolt) igat sektsiooni ning Harkus ja Sindis. Selle kaudu saadakse liini otste ning iga sektsiooni vahelised asümmeetria parameetrid. Antud parameetreid kuvatakse ülekandeliini pikkuse suhtes, alustades Harkust ehk 0 % ülekandeliini pikkusest ning lõpetades Sindis ehk 100 % ülekandeliini pikkusest (vt joonis 3.1). Tulemusi joonistel väljendatakse edaspidi kirjeldatud moel ülekandeliini pikkuse suhtes (va joonis 3.2). Indikatsiooni asümmeetria parameetrite väärtuste kohta sektsioonide lõikes annab joonis 3.2, kus sektsioon 0 ja 13 viitavad vastavalt Harku ja Sindi alajaamadele.



Joonis 3.1 Ülekandeliinis L503 tekkiv asümmeetria ülekandeliini pikkuse lõikes



Joonis 3.2 Ülekandeliinis L503 tekkiv asümmeetria modelleeritud seksioonide lõikes

Analüüsidest joonisel 3.1 toodud asümmeetria parameetreid, esineb üsna selge korrelatsioon talvise koormusega asümmeetria parameetrite ja transponeeritud kohtade vahel. Nimelt asümmeetria parameetrid tõusevad liikudes liini keskme poole ning liini keskmes (võrreldes eelneva tõusuga) stabiliseeruvad. Joonisel 3.1 toodud asümmeetria parameetritest saavad nii-öelda referentsparameetrid (nn normaalskeemiga - NS), mille vastu järgnevaid katsetusi võrreldakse.

Eelnevad tulemused saadi toites elektriliine ideaalsete generaatoritega ning mitte süsteemiharudega. Huvi võib pakkuda ka nn süsteemi tugevus, mis väljendub nt mingi sõlme lühisvõimsuses ehk väljendab toite tugevust teatud alajaamas ning on elektrivõrgu konfiguratsioonist sõltuv (mida väiksem ekvivalentne süsteemi takistus, seda „tugevam võrk“). Süsteemi tugevuse hindamiseks toidetakse esmalt ülekandeliini L503 punktis 2.1.3 toodud süsteemiharuga. Järgnevalt toidetakse Sindi 330 kV alajaama Elering-AS tarkvarast [8] saadud nõrgendatud võrgu ekvivalentse takistusega (miinimum konfiguratsioon: Sindi - Kilingi-Nõmme 330 kV liin L510 tööst väljas): $Z_{Q, \min.rez} = 5,41 + j31,70 \Omega$.

Tabel 3.2 Ülekandeliinis L503 tekkiv asümmeetria toites seda Sindist erinevate süsteemiharudega

„Tugev võrk“				
Mõõtepunkt	Talvine koormus		Suvine koormus	
	$U_2/U_1, \%$	$I_2/I_1, \%$	$U_2/U_1, \%$	$I_2/I_1, \%$
Sindi	0,024	0,109	0,020	0,165
Lihula	0,369	1,265	0,119	4,633
Harku	0,112	0,113	0,122	0,524
„Nõrk võrk“				
Sindi	0,025	0,103	0,019	0,172
Lihula	0,372	1,261	0,119	4,629
Harku	0,113	0,113	0,123	0,525

Katsetuse (vt tabel 3.2) puhul ei ole märgatavat erinevust tabelis 3.1 toodud väärtustega, millest võib järeldada, et süsteemi tugevuse väljendamine süsteemiharudega asümmeeria mõjude uurimiseks osutub ebasobivaks. Oodata on, et tekkiv asümmeeria on „süsteemi tugevusest“ mõjutatud. Järeldub, et soovi korral kajastada mudelis „süsteemi tugevuse“ mõjusid ülekandeliinis tekkivasse asümmeetriasse on vajalik ülejäänud 330 kV elektriliinid modelleerida.

3.2 Mahtvuslik asümmeeria ülekandeliinis

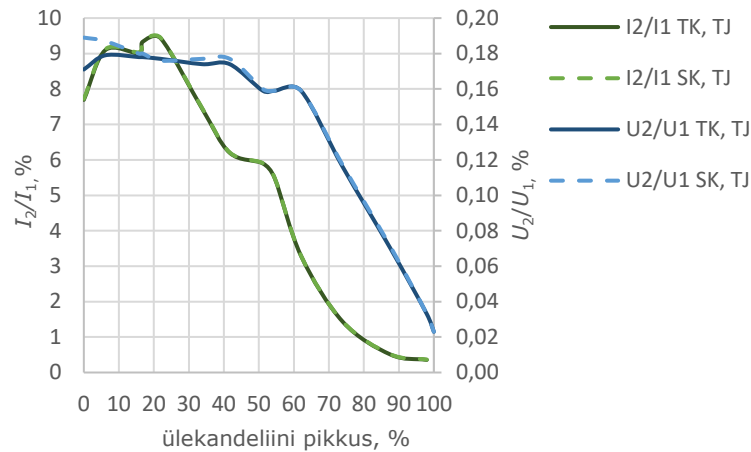
Asümmeeria on valdavalt põhjustatud elektriliini(de) omavahelistest vastastikustest induktiivsustest ja mahtvustest [2] (lisaks on ka liinide ja maa vahel mahtvused). Selleks et, selgitada umbkaudselt mõlema efekti osakaalu resulteeruvasse asümmeetriasse, lähenetakse katseliselt. Nimelt eelnevalt punktis 3.1 koormatud talitluses on asümmeeria põhjustajateks mõlemad, kuid ülekandeliini L503 koormuse skeemist eraldamisega saavutatakse nii-öelda tühijooksu talitus (TJ), millepuhul liini vool on ainult elektriliini mahtvuste poolt genereeritavast reaktiivvõimsusest tingitud (vt joonis 3.3). Väiksema voolu korral on ka vastastikustest induktiivsustest põhjustatud asümmeeria osakaal väiksem ning pinge asümmeetriat mõõtes saab mahtvusliku asümmeeria osakaalu hinnata.

Tabel 3.3 Ülekandeliinis L503 tühijooksul tekkiv asümmeeria

Mõõtepunkt	Talvine koormus		Suvine koormus	
	$U_2/U_1, \%$	$I_2/I_1, \%$	$U_2/U_1, \%$	$I_2/I_1, \%$
Sindi	0,023	0,356	0,023	0,365
Lihula	0,159	5,477	0,159	5,482
Harku	0,171	-	0,189	-



Joonis 3.3 Ülekandeliini L503 tühijooksu liinivool



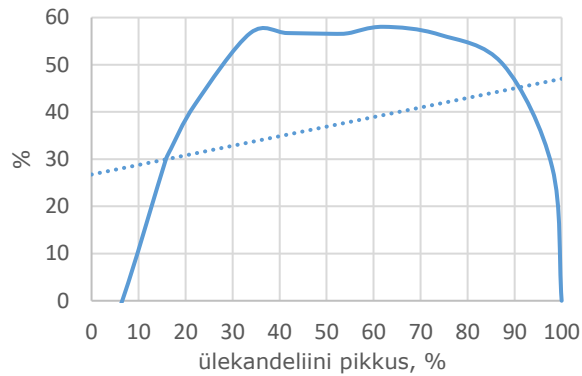
Joonis 3.4 Ülekandeliinil L503 tühijooksul tekkiv asümmeetria

Tabelis 3.3 ning joonisel 3.4 toodi välja nii talvise kui suvise koormusega asümmeetria parameetrid, et vaadelda 110 kV elektriliinide koormuse ja ülekandeliinis L503 tekkiva asümmeetria sõltuvust. Antud väärtustest võib järeldada, et 110 kV erinevad koormused suuresti ülekandeliini L503 pinge ega voolu asümmeetriat ei mõjuta. Antud järeldus ühtib ka [3] toodud põhimõttega, mille kohaselt mahtuvuslikku asümmeetriat on põhiliselt märgata ühisriputuse madalaima pingeastmega liinis. Antud katsetuses genereerib ülekandeliin L503 u 87 Mvar reaktiivvõimsust ning liinivool pürgib generaatori läheduses (Sindis) 140 A, mis ei välista vastastikuse induktiivsuse osakaalu asümmeetriasse, vaid mingil määral vähendab seda.

Indikatsiooni mahtuvustest põhjustatud pinge asümmeetria osakaalust kogu tekkivasse pinge asümmeetriasse (normaalskeemiga talvise koormusega) annab joonis 3.5. Seal on toodud normaalskeemiga talvise koormuse korral saadud U_2/U_1 ja tühijooksul modelleeritud U_2/U_1 parameetrite jagatis ülekandeliini pikkuse lõikes, mis avaldub:

$$A_{\text{mahtuvuslik}} = 100 \frac{A_{330 \text{ eraldi}}}{A_{\text{TK normaalskeemiga}}}, \% \quad (3.1)$$

- Kus $A_{\text{TK normaalskeemiga}}$ on nn normaalskeemiga ja talvise koormusega ülekandeliinis L503 tekkiv F_2/F_1
- $A_{330 \text{ eraldi}}$ on 330 kV osa eraldi modelleerides ülekandeliinis L503 tekkiv F_2/F_1
- F_2/F_1 on kas voolu või pinge vastujärgnevuskomponendi suhe pärijärgnevuskomponenti



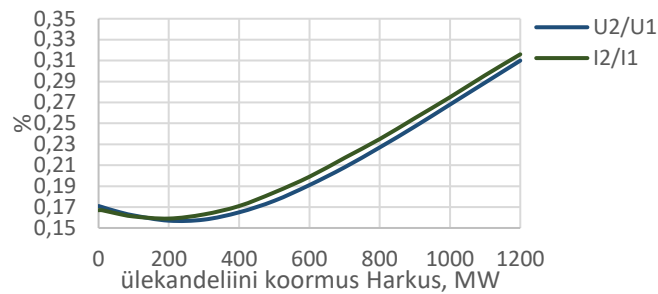
Joonis 3.5 Ülekandeliinis L503 mahtvusliku asümmeetria osakaal valemi (3.1) kohaselt

Katsetusest (vt joonis 3.5) selgub, et suur osa (u 30...50%) ülekandeliinis L503 tekkivast pingest asümmeetriast talvise koormuse korral on mahtvustest tingitud. Küll aga ei laiene antud katsetuse tulemused teistele talitlustele, mille korral nn normaalskeemiga pingest asümmeetria võib omada teistsuguseid väärtuseid.

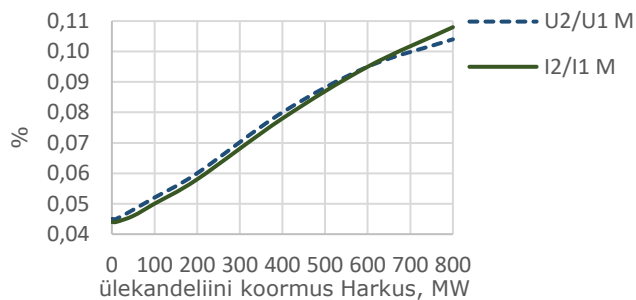
3.3 Vastastikinduktiivsuse mõjud ülekandeliini asümmeetriale

Eelnevad katsetused on tehtud võrgu mõõtmiste põhjal arvutatud koormustega. Huvi pakub ka tekkiv asümmeetria vahetult enne koormust erinevate koormuse väärtuste korral. Sellisest katsetusest saaks asümmeetria tõusust või langusest järeldada vastastikinduktiivsusest põhjustatud asümmeetria muutust, sest mahtvusliku pingest asümmeetriat võib lugeda ligilähedaselt konstantseks. Selleks koormatakse ülekandeliini L503 Harkust üha kasvava koormusega, kuni ekstreemumini. Selleks et antud katsetusega kajastada võrgu reaalset talitlemist valiti ekstreemumiks pingest nivoo. Sellest tulenevalt tehti katsetused kuni esimese Harku pingest väärtuse väljumiseni vahemikust 90...110 % nimipingest.

Joonise 3.6 analüüsimisest selgub, et asümmeetriiline vool ja pingest on otseses korrelatsioonis omavahel, sest need omavad väga sarnaseid tendentse ning langust või tõusu. Täiendavalt selgub, et asümmeetria parameetrid tõusevad (alates 250 MW koormusest) aktiivkoormuse tõustes ehk on positiivses korrelatsioonis. Lahutades joonisel 3.6 toodud väärtustest asümmeetria parameetrid, mis on saadud 330 kV ülekandeliini segmentide nihutamisel 10 km kaugusele 110 kV liinidest eemale nihutamise ja 330 kV faaside paigutamisega üksteise suhtes erinevatele kaugustele (: 1 km, 0 km, -1 km), saab indikatsiooni vastastikkustes induktiivsustest põhjustatud asümmeetria tendentsidest (vt joonis 3.7).

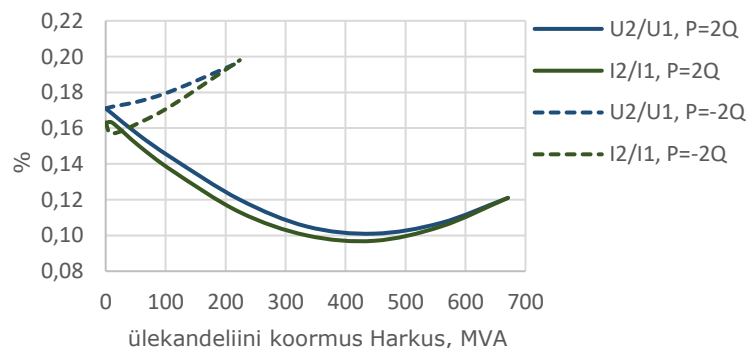


Joonis 3.6 Ülekandeliinis tekkivad asümmeetria parameetrid Harku aktiivkoormuse tõustes



Joonis 3.7 Ülekandeliinis L503 tekkivad asümmeetria parameetrid Harkus, 330 kV võrgu osa vastastikuste induktiivsuste mõjul, Harku aktiivkoormuse tõustes

Vaadeldes joonist 3.7 selgub, et 330 kV võrgu vastastikustel induktiivsustel on arvestatav osakaal resulteeruvasse asümmeetria parameetritesse. Järgnevalt katsetatakse asümmeetria muutust koormates Harku 330 kV latte lisaks aktiivkoormusele ka induktiivse või mahtvusliku koormusega. Seejuures modelleeriti näivvõimsust suhete $P = 2Q$ ja $P = -2Q$ alusel, mis väljendavad poole väiksemat reaktiivvõimsust võrreldes aktiivvõimsusega ning on vastavalt induktiivse või mahtvusliku iseloomuga.



Joonis 3.8 Ülekandeliinis tekkivad asümmeetria parameetrid Harku näivkoormuse tõustes

Analüüsid katsetust aktiiv- ja reaktiivkoormusega (vt joonis 3.8) selgub, et asümmeetria parameetrid vähenevad induktiivse koormuse puhul kuni umbes 400 MVA-ni, peale mida hakkavad sarnase tõusuga nagu joonisel 3.6 tõusma. Ainult aktiiv-

ja näivkoormusega katsetustest selgub, et faasis olevate pingete ja voolude korral tekib ülekanaliinis L503 suurem asümmeetria kui mitte faasis olevate voolude ja pingete puhul. Täiendavalt induktiivse iseloomuga koormusega on võimalik tekkivat asümmeetriat vähendada. Sellest lähtuvalt katsetatakse järgnevalt kõigi Harku reaktorite (summaarne võimsus 100 Mvar) sisse lülitamise mõju Harku lattidelt mõõdetud asümmeetria parameetritele.

Tabel 3.4 Harku Reaktorite mõju ülekanaliinis L503 tekkivale asümmeetriale

Mõõtepunkt	Harku reaktorid	Talvine koormus		Suvine koormus	
		$U_2/U_1, \%$	$I_2/I_1, \%$	$U_2/U_1, \%$	$I_2/I_1, \%$
Harku	väljas	0,152	0,153	0,168	0,152
	sees	0,062	0,048	0,091	0,077

Tabelis 3.4 toodud väärtuste võrdlusest selgub, et Harku reaktoritel on ülekanaliinist põhjustatud asümmeetria parameetritele Harkus suur mõju. Talvise koormuse korral vähenevad asümmeetria parameetrid Harku reaktorite sisse lülitamisest ligi kolmekordselt, võrreldes normaalskeemi asümmeetria parameetritega. Suvise koormuse korral on mõju ligi kahekordne. Sellest järeldub, et transiidil Sindist Harkusse (valdavalt on viimase kahe aasta jooksul L503 transiit sellise suunaga olnud) on võimalik tekkivat asümmeetriat Harku reaktorite sisse lülitamisega vähendada.

Katsetuste juures vaadeldi asümmeetria muutust erinevate koormuste tõustes ühesuunalise transiidi korral (Sindi -> Harku). Vastassuunalise transiidiga samade katsetuste läbi modelleerimine näitab, kas leitud tulemused on spetsiifilise konfiguratsiooni põhised või laienevad ka üldisemaks.

Modelleerides transiidil Harkust Sindisse leiti, et ainult aktiivkoormuse korral on üldine tendents Sindi asümmeetria parameetritel samasugune nagu joonisel 3.6. Samuti oli märgata asümmeetria parameetrite tõusu aktiiv- ja mahtvusliku koormuse väärtuste tõustes. Modelleerides aga aktiiv- ja induktiivkoormustega esines asümmeetria parameetrite tõus koormuste kasvamisel. Sellest järeldub, et eelnevalt leitud korrelatsioon induktiivse koormuse tõustes asümmeetria parameetrite vähenemisel on transiidi suunast sõltuv ning ei laiene üldisemaks.

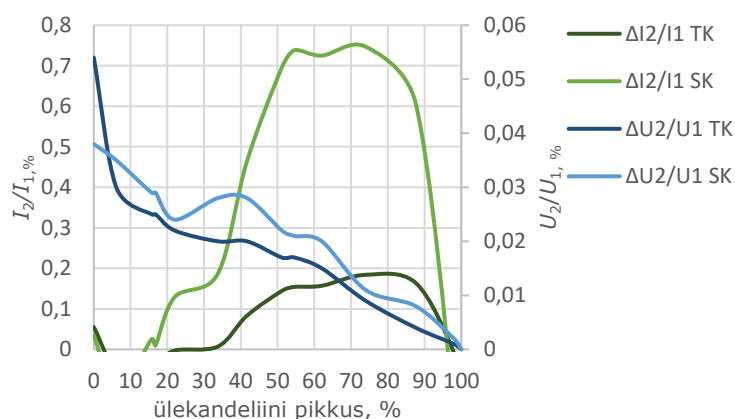
3.4 Ühisriputusest põhjustatud asümmeetria ülekanaliinis

Selleks, et saada indikatsiooni ühisriputusel olevate 110 kV elektriliinide panuse kohta tekkivasse ülekanaliini L503 asümmeetriasse, vaadeldakse ülekanaliinil L503 tekkivat asümmeetriat eraldi. Järgnevalt saab punktis 3.1 saadud asümmeetria parameetritest eraldatud ülekanaliinis L503 tekkiva asümmeetria parameetrid

lahutada, et jääks järgi 330 kV ja 110 kV elektriliinide ühisriputusest põhjustatud asümmeetria 330 kV ülekandeliinis. Selleks, et ülekandeliini L503 käsitleda 110 kV elektriliinidest eraldi, nihutatakse modelleeritud L503 kõik liini segmendid 1000 m võrra 110 kV elektriliinidest eemale, et minimiseerida nende vahelisi vastastikmõjusid ning mõõdetakse sellise skeemiga ülekandeliinis tekkivat asümmeetriat (vt joonis 3.9). Katseliselt avaldub ülekandeliinis L503 ühisriputuse mõjudest tekkiv asümmeetria:

$$A_{\text{ühisriputusest}} = A_{\text{normaalskeemiga}} - A_{330 \text{ eraldi}} \quad (3.2)$$

kus $A_{\text{ühisriputusest}}$ on ühisriputuse mõjudest ülekandeliinis L503 tekkiv $\Delta F_2/F_1$
 $A_{\text{normaalskeemiga}}$ on nn normaalskeemiga ülekandeliinis L503 tekkiv F_2/F_1

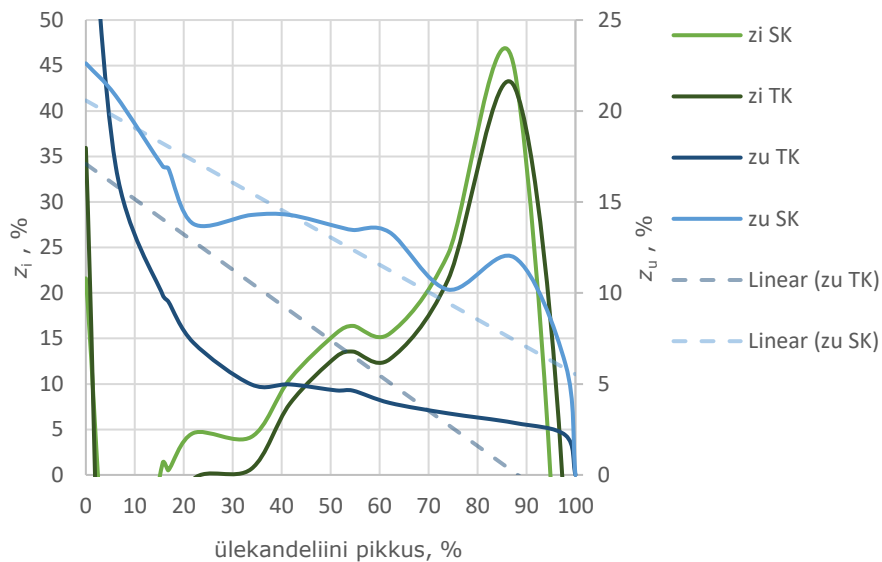


Joonis 3.9 Ülekandeliinis L503 tekkivad asümmeetria parameetrid ühisriputuse mõjudest valemi (3.2) kohaselt

Selleks, et saada paremat aimdust 110 kV elektriliinide poolt põhjustatud asümmeetriast võetakse kasutusele tegurid z_i ja z_u . Need väljendavad ainult 110 kV elektriliinide poolt põhjustatud asümmeetria parameetrite suhet normaalskeemiga asümmeetria parameetritesse ülekandeliini pikkuse lõikes (vt joonis 3.10) ning avalduvad:

$$z = 100 \frac{A_{\text{ühisriputusest}}}{A_{\text{normaalskeemiga}}} \% \quad (3.3)$$

kus z on z_i või z_u



Joonis 3.10 Ülekandeliinis L503 ühisriputusest põhjustatud asümmeeria parameetrid valemi 3.3 kohaselt

Antud analüüsist järeldub, et ühisriputusest on 330 kV ülekandeliinis põhjustatud arvestatav asümmeeria. Joonis 3.10 puhul on koormuseni jõudes pinge asümmeeria ülekandeliinis L503 ühisriputuse mõjudest tõusnud 17,5...21 %, mis on ligi 1/4 kogu ülekandeliinis tekkivast pinge asümmeetriast. Täiendavalt on märgata suurimat ühisriputusest põhjustatud pinge asümmeetriat suvise koormuse puhul, mis on samamoodi nagu joonisel 3.1 toodud talvise ja suvise koormuse pinge asümmeeria korral.

Küll aga on ülejäänud ca 3/4 tekkivast pinge asümmeetriast ülekandeliinis põhjustatud teistest teguritest. Nendest tõenäolisem on 330 kV elektriliini oma vastastikmõjudest põhjustatud „ülejäanud“ pinge asümmeeria. Sellest järeldub vajadus uurida 330 kV elektriliinis tekkivat asümmeetriat oma vastastikmõjude vaatest ning selle vähendamist elektrijuhtide geomeetrilise paigutuse vahetamise ehk transponeerimisega.

4 TRANSPOSITSIIONI MÕJUD ASÜMMEETRIALE

Eelnevas põhi jaotises leiti, et suurem osa asümmeetriast ülekanaliinis on ülekanaliini enda faasijuhtide vastastikmõjudest tingitud. Ülekanaliini oma vastastikmõjudest tekkivat asümmeetriat nii-öelda kompenseerib selle transponeerimine. Sellest järeldub tekkiva resulteeruva asümmeetria efektide ja tendentside mõistmiseks transpositsiooni analüüsi vajadus.

Olemasolevate transpositsioonide uurimiseks on otstarbekas vaadeldav transpositsioon koostatud mudelis nii-öelda eraldada. Selle teostamiseks võetakse üks transpositsioon skeemist ära, et teist transpositsiooni uurida ja vastupidi. Selleks, et lõplikult transpositsiooni efektiivsust analüüsida võetakse mõlemad transpositsioonid skeemist välja ning võrreldakse tekkivat asümmeetriat normaalskeemi omaga.

Transpositsiooni puhul on üks olulisemaid parameetreid liini lõpus kujunev pinge asümmeetria. Sellest lähtutakse ülekanaliinil olevate transpositsiooni asukohtade analüüsimisel. Nimelt katsetatakse olemasolevate transpositsioonide nihutamist ülekanaliinil ning selgitatakse antud meetodi efektiivsust ülekanaliini lõpus kujuneva pinge asümmeetria põhjal. Täiendavalt on optimaalsete asukohtade uurimisel vaja vaadelda mõlemasuunalise transiidi korral liini lõpus kujunevat pinge asümmeetriat.

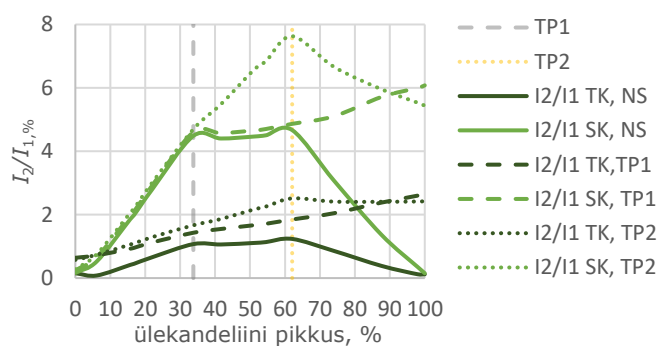
Katsetatakse ka erinevaid transpositsiooni meetodeid. Neist esimene seisneb ühe transpositsiooni puhul vaid kahe juhtme vahetamises. Järgnevalt kajastatakse mudelis kahte ja nelja täistsüklilist transpositsiooni, et näha mil määral selliselt ülekanaliini transponeerides asümmeetria väheneb. Täiendavate transpositsiooni tsüklite modelleerimisega uuritakse, kas need on võrreldes praeguse transpositsiooniga põhjendatud.

4.1 Risti ja Lihula transpositsioonide eraldamine

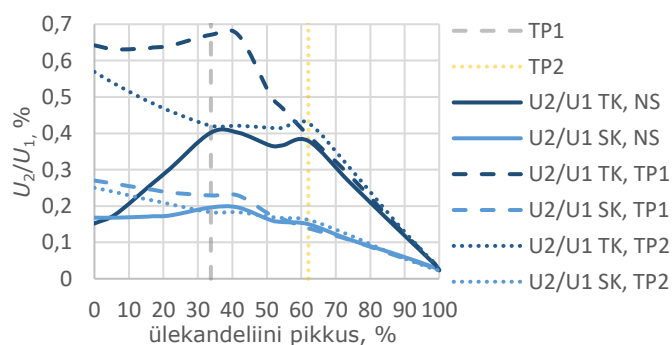
Normaalskeemiga transponeeritakse ülekanaliini L503 Ristis ja Lihulas. Selleks, et mõlema transpositsiooni efekte tekkivasse asümmeetriasse eraldi vaadelda, on otstarbekas üks transponeerimistest mudelist välja võtta ning võrrelda sellise lülitusega tekkivat asümmeetriat normaalskeemiga tekkiva omaga. Selle teostamiseks ühendatakse mudelis ühe transpositsiooni koha jaoks mõeldud ühendused otse.

Tabel 4.1 Transponeerimislülituste TP1 ja TP2 korral ülekandeliinis L503 tekkivad asümmeetria parameetrid

Transponeerimine Lihulast ära võetud – TP1				
Mõõtepunkt	Talvine koormus		Suvine koormus	
	$U_2/U_1, \%$	$I_2/I_1, \%$	$U_2/U_1, \%$	$I_2/I_1, \%$
Harku	0,642	0,640	0,270	0,246
Lihula	0,394	1,848	0,139	4,865
Sindi	0,024	2,668	0,024	6,079
Transponeerimine Ristist ära võetud – TP2				
Harku	0,250	0,276	0,569	5,438
Lihula	0,162	7,630	0,428	7,630
Sindi	0,023	5,438	0,023	0,749



Joonis 4.1 Transponeerimislülitustega TP1 ja TP2 ning normaalskeemiga tekkiv voolu asümmeetria ülekandeliinis



Joonis 4.2 Transponeerimislülitustega TP1 ja TP2 ning normaalskeemiga tekkiv pinget asümmeetria ülekandeliinis

Vaadeldes joonist 4.1 ja joonist 4.2 on märgata üldist tendentsi asümmeetria parameetrite stabiliseerumise näol vahetult pärast transpositsiooni. Pinget asümmeetria tendentsidest on märgata, et TP2 puhul on pinget asümmeetria väärtused Harkus väiksemad kui TP1 puhul. Sellest saab järeldada, et Lihula transpositsioonil on suurem mõju Harku pinget asümmeetria vähendamisele, kuid transpositsioonid ei ole sama pikkade vahemaadega ning erinevused pinget asümmeetriates on küllaltki väikesed. Joonis 4.2 puhul on märgata TP1 ja TP2 Harku pinget asümmeetria suuri

erinevusi erinevate koormuste korral võrreldes normaalskeemiga tekkiva pinge asümmeetriaga. Sellest saab järeldada tekkiva pinge asümmeetria sõltuvust liinikoormusest. Joonis 4.2 näitel vaadeldes aegrida U_2/U_1 TK, TP2 on näha, et järgmine transpositsioon on teostatud (kahe transpositsiooni puhul) optimaalsel kohal, just enne pinge asümmeetria tõusu. Sellest selgub hea meetod optimaalsete transpositsiooni asukohtade leidmiseks. Katsetusest selgub, et ainult ühe transponeerimise teostamine ei ole asümmeetria parameetrite vähendamise vaatest optimaalne, sest efekt kahe transpositsiooniga lülituses, kus asümmeetria langeb liinistesse jõudes, ei avaldu TP1 ja TP2 korral.

4.2 Ülekandeliini transpositsiooni puudumine

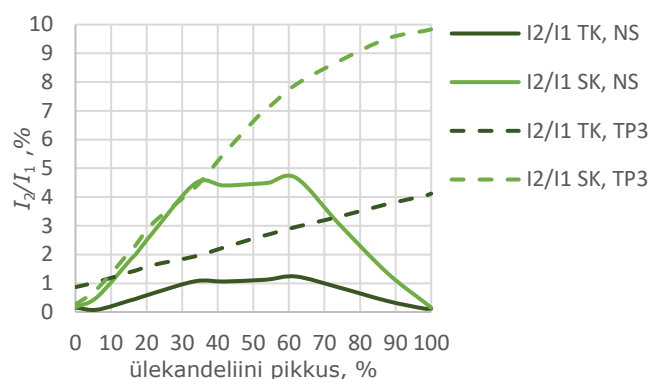
Lihtsaks katsetuseks transponeerimise efektiivsuse uurimisel on koostatud mudelist transponeerimise välja võtmine – TP3. Järgnevalt saab fiktiivselt transponeerimata mudelist saadud tulemusi teiste tulemustega võrrelda.

Tabel 4.2 Ülekandeliinis L503 tekkiv asümmeetria transponeerimata skeemi korral

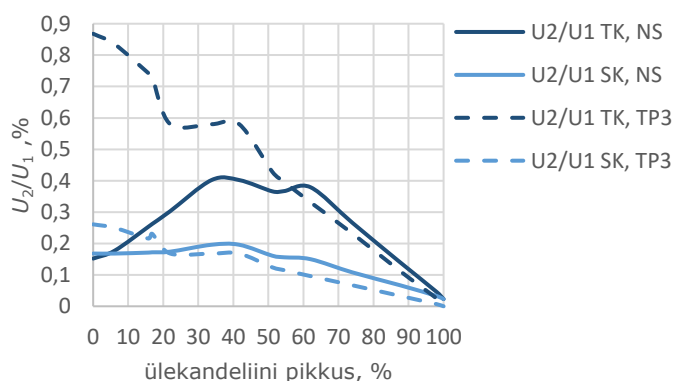
Mõõtepunkt	Talvine koormus		Suvine koormus	
	$U_2/U_1, \%$	$I_2/I_1, \%$	$U_2/U_1, \%$	$I_2/I_1, \%$
Harku	0,868	0,867	0,261	0,260
Lihula	0,331	2,962	0,096	7,921
Sindi	~0	4,118	~0	9,835

Tabeli 3.1 ja tabeli 4.2 tulemuste võrdlemisest selgub, et transpositsioon on efektiivne. Transpositsiooni tulemusel on suurem osa (ilma transponeeritud skeemi katsetuse puhul) pingeasümmeetriast nii-öelda kompenseeritud. Pinge asümmeetria ilma transponeerimata skeemi korral on ühes sektsioonis (talvise koormuse korral) ligi üks protsent, mis on ohtlikult lähedal pinge tunnussuuruste standardis [17] toodud väärtusele. Eriti kui arvestada, et Harku ja Sindi 330 kV alajaamades ei ole modelleeritud teisi 330 kV elektriliine, mis hüpoteetiliselt ka pinge- ja voolu asümmeetriasse panustaksid. Täiendavalt on koormuseid modelleeritud sümmeetrilistena, mis reaalsuses nii ei pruugi olla.

Vaadeldes joonist 4.3 ja joonist 4.4 on märgata asümmeetria parameetrite valdavalt lineaarset tõusu. Kusjuures tõuseb I_2/I_1 0...100 %, sest ülekandeliini asümmeetriline olemus rakendub voolu asümmeetria järk-järgult ning toite alajaam peab kogu tekkivat vooluasümmeetriat toitma. Pinge asümmeetria tõuseb 100 %-st (kus on ideaalne toiteallikas) kuni 0 %-ni, sest Sindis on ideaalne pingeallikas.



Joonis 4.3 Ülekandeliinis L503 lülituses TP3 erinevate koormuste korral tekkiv voolu asümmeetria



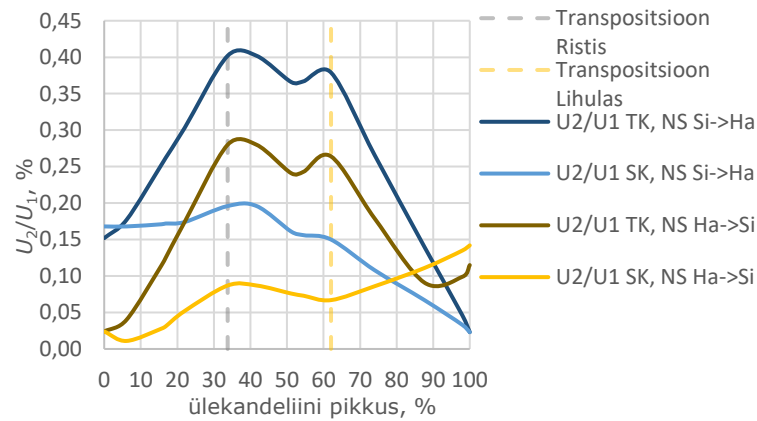
Joonis 4.4 Ülekandeliinis L503 lülituses TP3 erinevate koormuste korral tekkiv pinge asümmeetria

4.3 Transpositsioonide asukohad ülekandeliinil

Ülekandeliini L503 olemasoleva transpositsioonide puhul on suure tähtsusega transponeerimise kohtade asukoht ülekandeliinil. Sellest sõltub tekkiv pinge ja voolu asümmeetria liini otstes. Varasemate modelleerimiste korral toideti ülekandeliini Sindi alajaamast ning koormati Harku alajaamast, kuid optimaalsete transponeerimise asukohtade uurimiseks on vaja vaadelda transiiti mõlemat pidi. Selle teostamiseks vahetatakse mudelis ülekandeliini otstes asuvate generaatore ja koormuse asukohad ringi.

Tabel 4.3 Ülekandeliini L503 erinevate transiitide ja normaalskeemiga asümmeetria parameetrid koormusel

Transiit	Talvine koormus		Suvine koormus	
	I_2/I_1 TK, NS, %	U_2/U_1 TK, NS, %	I_2/I_1 SK, NS, %	U_2/U_1 SK, NS, %
Sindi ->Harku	0,153	0,152	0,162	0,168
Harku -> Sindi	0,112	0,115	0,134	0,142



Joonis 4.5 Ülekandeliinis L503 tekkiv pinge asümmeetria sõltuvus transiidi suunast

Analüüsidest joonisel 4.5 ning tabelis 4.3 toodud väärtuseid selgub, et transiidiga Sindist Harkusse (Si->Ha) tekib koormusel suurem pinge asümmeetria. Seevastu transiidil Harkust Sindisse on nii Sindis kui ka ülekandeliini lõikes kujunev pinge asümmeetria märgatavalt väiksem. Seejuures esineb tendentsi U_2/U_1 TK, NS Ha → Si korral u 90 % ülekandeliini pikkusest alates pinge asümmeetria tõus, mis võib osutada ebasoovitavaks. Voolu asümmeetria on mõlemasuunalise transiidi puhul valdavalt samasugune. Lihtsuse huvides piirduakse koormuse pinge asümmeetria väärtuse vaatlemisega. Tuuakse välja ka voolu asümmeetria parameetrid, kuid põhifookuse alla võetakse pinge asümmeetria, sest muidu on kaalutletavaid tegureid liiga palju.

Antud järeldustest tulenevalt katsetatakse erinevaid transponeerimise asukohti, püüdes saavutada optimum minimaalsete asümmeetria parameetrite näol, mõlemasuunalise transiidi ja hinnanguliselt suure ja väikese koormuse korral. Esimesena katsetatakse transpositsiooni, mille korral ülekandeliin L503 oleks täpselt 1/3 pikkuse tagant transponeeritud ehk iga 57,32 km tagant (1/3 TP). Selle teostamiseks oli vajalik koostatud PSCAD mudelis modelleeritud ülekandeliini segmente nii-öelda poolitada (sarnaselt Lisadele 3 ja 4).

Tabelis 4.4 toodud koormustel mõõdetud asümmeetria parameetritest selgub, et täpselt kolmandiku tagant ülekandeliini transponeerides muutub Sindist Harkusse transiidi korral pinge asümmeetria Harkus suuremaks. Samal ajal on teistpidi transiidiga pinge asümmeetria Sindis valdavalt samasugune nagu tabelis 4.3. Sellest järeldub pinge asümmeetria minimeerimise vaatest antud transponeerimismeetodi ebasobivus.

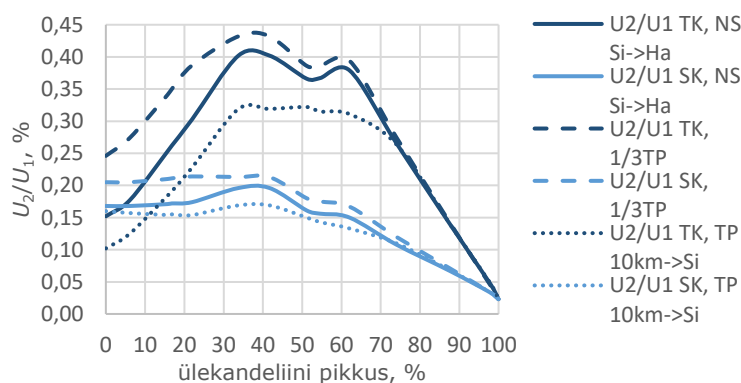
Tabel 4.4 Ülekandeliini L503 erinevate transiitidega täpselt iga kolmandiku tagant transponeerides asümmeetria parameetrid koormusel

Transiit	Talvine koormus		Suvine koormus	
	I_2/I_1 TK, 1/3 TP, %	U_2/U_1 TK, 1/3 TP, %	I_2/I_1 SK, 1/3 TP, %	U_2/U_1 SK, 1/3 TP, %
Sindi ->Harku	0,245	0,246	0,194	0,205
Harku -> Sindi	0,112	0,114	0,131	0,133

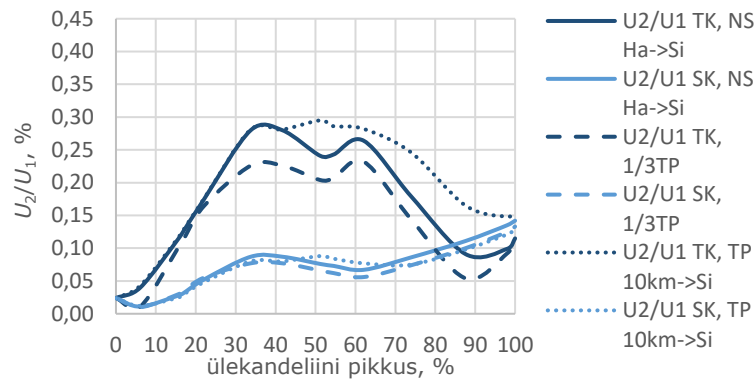
Eelnevatest modelleerimistest ja ka joonis 4.5 tulemustest on selgunud seos asümmeetria parameetrite vähenemise ja transponeerimise koha vahel. Sellest tuleneb järgnev katsetus, mille puhul nihutatakse mõlemad transpositsioonid (praegu Ristis ja Lihulas olevad) 10 km Sindi poole (TP 10km → Si), et pinge asümmeetria langus koormuseni algaks ülekandeliini pikkuse mõistes varem. Selle juures on oodata, et Harku -> Sindi transiidi puhul muutub pinge asümmeetria Sindis suuremaks. Normaalskeemidega on Harku -> Sindi transiidi puhul Sindis tekkiv pinge asümmeetria väiksem (vt tabel 4.3) kui Sindi -> Harku transiidil tekkiv pinge asümmeetria Harkus. Selle põhjal oleks parem transpositsioon, mille korral Si->Ha puhul tekkiv pinge asümmeetria oleks pisut väiksem ning selle arvelt Ha->Si puhul tekkiv pinge asümmeetria Sindis pisut suurem.

Tabel 4.5 Ülekandeliinis L503 tekkiv asümmeetria koormusel, nihutades mõlemad transpositsioonid 10 km võrra Sindi poole

Transiit	Talvine koormus		Suvine koormus	
	I_2/I_1 TK, TP 10km-> Si, %	U_2/U_1 TK, TP 10km-> Si, %	I_2/I_1 SK, TP 10km-> Si, %	U_2/U_1 SK, TP 10km-> Si, %
Sindi ->Harku	0,099	0,102	0,158	0,160
Harku -> Sindi	0,152	0,153	0,121	0,128



Joonis 4.6 Ülekandeliinis L503 tekkiv asümmeetria Si->Ha transiidi puhul erinevate transpositsiooni meetoditega



Joonis 4.7 Ülekandeliinis L503 tekkiv asümmeetria Ha->Si transiidi puhul erinevate transpositsiooni meetoditega

Vaadeldes joonis 4.6 tendentse (10km->Si) selgub, et eelnevalt spekuleeritud varajasem pinge asümmeetria langus transpositsiooni koha nihutamisel ei vasta tõele. Selle asemel on valdavalt kogu ülekandeliini vältel pinge asümmeetria langenud (eriti TK korral), samaaegselt omades sarnast tendentsi nagu normaalskeemiga. Võrreldes joonisel 4.6 tendentse U_2/U_1 TK, 1/3TP ja U_2/U_1 TK, TP10km → Si selgub, et transpositsioonide nihutamine 10 km Sindi poole vähendab pinge asümmeetriat ja täpselt 1/3 ülekandeliini pikkuse tagant seda transponeerides pinge asümmeetria tõuseb. Sellele vastupidine kehtib transiidil Harkust Sindisse samade tendentside (vt joonis 4.7) võrdlemisel.

Tabelis 4.5, joonisel 4.6 ja joonisel 4.7 toodud väärtustest selgub, et transiidi Si->Ha puhul on pinge asümmeetria koormusel langenud, kuid Ha->Si puhul tõusnud Si->Ha transiidi ja normaalskeemiga väärtuste ligidale. Otsitakse transpositsiooni asukohti, mille korral mõlemasuunalise transiidiga pinge asümmeetria väärtused jääksid vahemike 0,112...0,153 (talvise koormusega) ja 0,142...0,168 (suvise koormusega) keskmesse.

Antud katsetuse puhul oleks teada vaja kumma transpositsiooni nihutamisel on suurem mõju Si->Ha transiidiga koormusel vähenevale pinge asümmeetriale. Lihtne katsetus selle umbkaudseks teada saamiseks on nihutada ainult üks transpositsioonidest korruga: ainult Risti transpositsioon (TP Ri 10km-> Si) ning ainult Lihula transpositsioon (TP Li 10km-> Si).

Tabelis 4.6 toodud tulemustest selgub, et Risti transpositsiooni koha nihutamisega Harkust eemale muutus sealne pinge asümmeetria Si->Ha transiidi korral väiksemaks. Transiidil Harkust Sindisse muutus pinge asümmeetria Sindis väiksemaks, kui Lihula transpositsioon oli toodud Sindile lähemale. Antud tulemustest järeldub, et transiidil alajaama pinge asümmeetria (ülekandeliini poolt) suurem langus esineb alajaamale

lähema transpositsiooni asukoha muutmises. Tabel 4.6 toodud pinge asümmeetria väärtuste puhul ei esine optimumi, mille korral oleksid pinge asümmeetria väärtused mõlema pidise transiidi puhul väiksemad kui Tabel 4.3 toodud väärtused.

Tabel 4.6 Ülekandeliinis L503 tekkiv asümmeetria koormusel nihutades kas Risti või Lihula transpositsiooni Sindi poole

Nihutades ainult Risti transpositsiooni 10 km Sindi poole				
Transiit	Talvine koormus		Suvine koormus	
	I_2/I_1 TK, TP Ri 10km→ Si, %	U_2/U_1 TK, TP Ri 10km→ Si, %	I_2/I_1 SK, TP Ri 10km→ Si, %	U_2/U_1 SK, TP Ri 10km→ Si, %
Sindi ->Harku	0,066	0,063	0,140	0,144
Harku -> Sindi	0,229	0,231	0,154	0,160
Nihutades ainult Lihula transpositsiooni 10 km Sindi poole				
Sindi ->Harku	0,183	0,184	0,176	0,181
Harku -> Sindi	0,065	0,067	0,102	0,112

Järgnevalt katsetatakse 5 km sammuga transpositsiooni(de) nihutamist: mõlema transpositsiooni 5 km liini keskmesse nihutamist (TP 5km→< -), Risti ja Lihula transpositsioonide 5 km võrra Sindi poole nihutamist (TP 5km→ Si) ja Risti transpositsiooni 5 km Sindi poole nihutamist (TP Ri 5km→ Si). Antud katsetusest (vt tabel 4.7) selgub, et ka 5 km sammuga transpositsioonide nihutamise ei saa tekkivat asümmeetriat märgatavalt mõlemasuunalise transiidi korral langetada võrreldes normaalskeemiga tekkiva pinge asümmeetriaga.

Tabel 4.7 Kõigi katsetuste korral ülekandeliinis L503 tekkiv pinge asümmeetria koormusel, järjestatud väikseimast suurimani (iga transiidi ja koormuse korral)

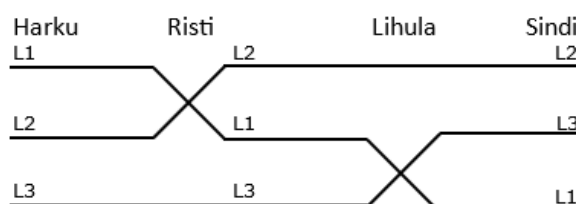
Meetod	Sindi -> Harku		Harku -> Sindi	
	U_2/U_1 TK, %	U_2/U_1 SK, %	U_2/U_1 TK, %	U_2/U_1 SK, %
NS	0,152	0,168	0,115	0,142
1/3 TP	0,246	0,205	0,114	0,133
TP 10km→ Si	0,102	0,16	0,153	0,128
TP Ri 10km→ Si	0,063	0,144	0,231	0,160
TP Li 10km→ Si	0,184	0,181	0,067	0,112
TP 5km→< -	0,145	0,179	0,194	0,166
TP 5km→ Si	0,118	0,163	0,149	0,136
TP Ri 5km→ Si	0,106	0,155	0,19	0,151

Analüüsidest kõiki katsetatud transponeerimismeetodeid korraga (vt tabel 4.7) ei esine märgatavalt paremat transpositsioonide kohtasid, kui kaalutleda mõlemasuunalist transiiti võrdset. Erinevate transpositsioonide asukohtade katsetustest järeldub, et praegused transponeerimise asukohad ülekandeliinil L503 on pinge asümmeetria vaatest põhjendatud, kui arvestada mõlemasuunalist transiiti võrdset.

Selgus, et ühe ülekandeliini ühes otsas tekkivat pinge asümmeetriat on võimalik transpositsiooni kohtadega minimiseerida, selle arvelt aga muutub teise liini otsa pinge asümmeetria suuremaks. Selline lähenemine oleks põhjendatud kui oleks teada, et transiit ülekandeliinil on valdavalt samasuunaline. Viimase kahe aasta jooksul on valdav transiit ülekandeliinil olnud Sindist Harkusse. Sellisel juhul saaks soovi korral minimiseerida tekkivat pinge asümmeetriat ülekandeliini lõpus rakendades transponeerimismeetodile TP Ri 10km→ Si midagi ligilähedast, sest tabelis 4.7 toodud meetodid annavad eelkõige esmase hinnangu. Täpsema optimaalse Risti transpositsiooni selgitamiseks oleks täpsem analüüs vajalik.

4.4 Transpositsioon vahetades korraga kaks juhet

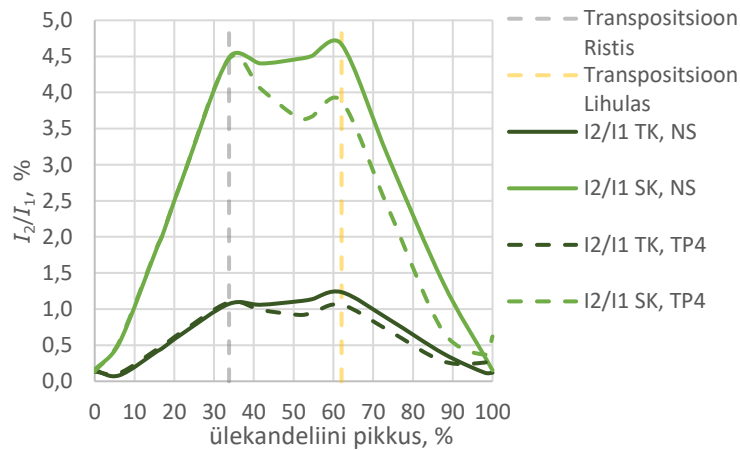
Võimalus transponeerimist teostada oleks iga kolmandiku tagant ainult kahe juhtme ära vahetamine [13] – TP4 (vt joonis 4.8).



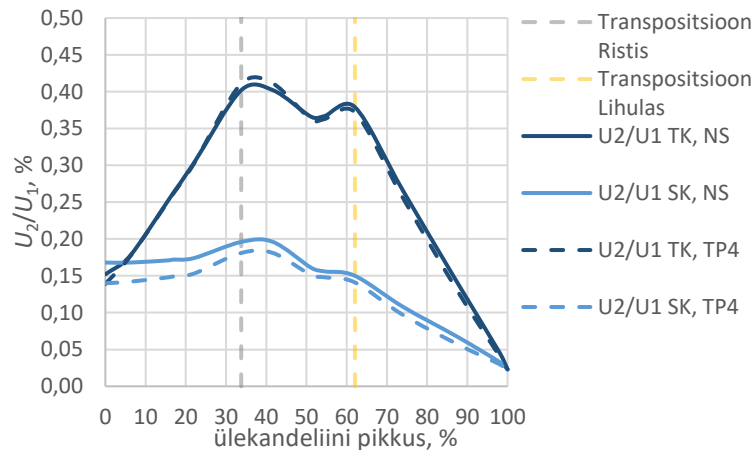
Joonis 4.8 Korraga kahe juhtme positsiooni muutes – TP4 transponeerimise põhimõtte skeem

Joonis 4.8 toodud skeemi kohaselt transponeeritakse ülekandeliini L503 (Harku poolt vaadatuna) esmalt Risti ning siis Lihula alajaamast. Järgnevalt võrreldakse tulemusi normaalskeemiga saadud asümmeetria tulemustega.

Analüüsidest joonise 4.9 ja joonise 4.10 puhul erinevate transponeerimistega tekkivaid asümmeetria parameetrite tendentse, selgub, et mõlema puhul on tekkiv asümmeetria küllaltki sarnane. On märgata, et parameeter I_2/I_1 on transponeerimismeetodi TP4 puhul isegi ülekandeliini lõikes pisut väiksem (eriti liini lõigul S5...S9) ning parameeter U_2/U_1 on mõlema transponeerimismeetodi puhul talvise koormuse puhul sarnaste väärtuste ja tendentsidega. Küllaga on U_2/U_1 suvise koormuse korral Harkus isegi veidi väiksem, millest saaks järeldada, et TP4 on efektiivsem kui NS.



Joonis 4.9 TP4 kohaselt transponeeritud skeemiga ülekandeliinis L503 tekkiva asümmeetrilise voolu võrdlus normaalskeemiga tekkiva voolu asümmeetriaga



Joonis 4.10 TP4 kohaselt transponeeritud skeemiga ülekandeliinis L503 tekkiva pinge asümmeetria võrdlus normaalskeemiga tekkiva pinge asümmeetriaga

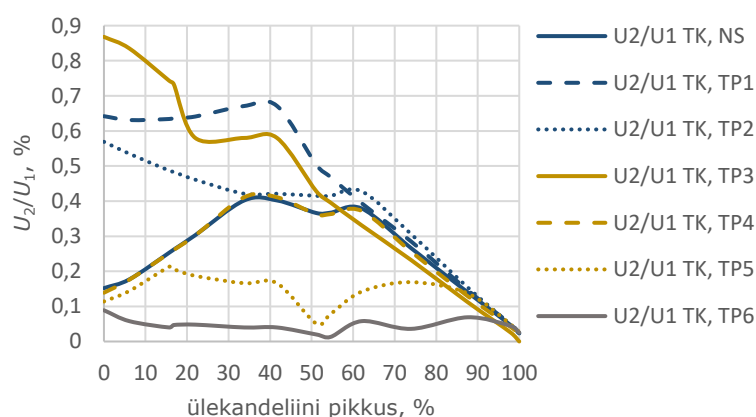
4.5 Katsetatud transpositsiooni meetodite võrdlus

Peale eelnevalt katsetatud transpositsiooni meetodile, katsetati ka kahte täistsüklilist transpositsiooni – TP5 ning nelja täistsüklilist transpositsiooni – TP6 (vt Lisa 2 ja Lisa 3). Põhjusel, et eelnevalt võrreldi erinevate transpositsiooni meetoditega tekkivat asümmeetriat ainult normaalskeemiga tekkiva asümmeetriaga, siis nüüd võrreldakse kõiki transpositsiooni meetodeid omavahel (vt joonis 4.11 ja 4.12).

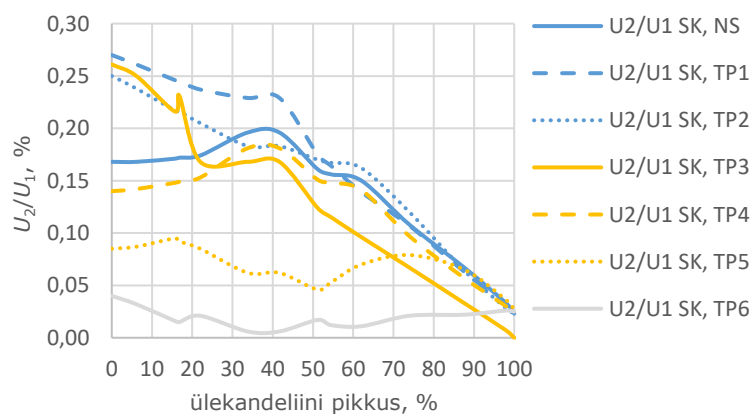
Transpositsiooni meetodite võrdlusest selgub, et suurema koormuse puhul avalduvad transpositsiooni kohad selgelt ülekandeliini pinge asümmeetria tendentsides (vt joonis 4.11). Seevastu ei ole väiksema koormuse puhul pinge asümmeetria tendentsidest transpositsiooni kohti selgelt märgata (vt joonis 4.12). Sellest järeldub suurema koormuse korral transpositsiooni järgne pinge asümmeetria tugevam kompenseerimine ülekandeliini oma vastastikmõjude poolt ning väikese koormusega

tekkiva pinge asümmeetria sarnanemine tühijooksu pinge asümmeetriaga. See näitab vastastikuste induktiivsuste osakaalu mõju resulteeruvasse pinge asümmeetriasse.

Võrreldes erinevate transponeerimismeetoditega tekkivat pinge asümmeetriat liini lõpus suure ja väikese koormusega selgub, et täiendavad transponeerimistsüklid vähendavad pinge asümmeetriat liini lõpus väiksema koormuse korral (vt joonis 4.12). Hinnanguliselt suurema koormusega on pinge asümmeetria liini lõpus meetodite NS ja TP4...TP6 puhul ligilähedaselt samasugune. Sellest järeldub täiendavate transpositsiooni tsüklite põhjendatus valdavalt väikeste liini koormuste puhul ning mittepõhjendatus valdavalt suurte liinikoormuste puhul.



Joonis 4.11 Ülekandeliinis L503 tekkiv pinge asümmeetria kõigi katsetatud meetoditega talvise koormuse korral



Joonis 4.12 Ülekandeliinis L503 tekkiv pinge asümmeetria kõigi katsetatud meetoditega suvise koormuse korral

KOKKUVÕTE

Lõputöös uuriti ühisriputusega asümmeetriliselt paiknevate juhtidega ülekandeliinis tekkivat pinget ja vooluasümmeetriat ühe Eesti mitme pingeastmelise ühisriputusega elektriliini näitel. Analüüsitavaks õhuliiniks valiti Harku – Lihula – Sindi, mille kohta koostati detailne valideeritud võrgumudel PSCAD tarkvaras, et hinnata ülekandeliini talitlemisel tekkivat asümmeetriat ning sellega seonduvaid mõjusid.

Bakalaureusetöös kirjeldati asümmeetriliselt paiknevate juhtidest tingitud mõjusid ning pinget ja vooluasümmeetriat põhjuseid. Täiendavalt käsitleti transponeerimise põhitõdesid, kuna tegemist on ühe peamise meetodiga, millega kompenseerida elektriliini juhtide asümmeetrilisest paigutusest tingitud mõjusid. Uurimistöös kirjeldati põhjalikult Harku – Lihula – Sindi 330 kV ja sellega ühisriputusel olevaid 110 kV elektriliini ehitusest tingitud omadusi ning parameetreid, mis on olulised modelleerimise vaatest.

Kogutud Harku – Lihula – Sindi õhuliini andmete alusel koostati PSCAD tarkvaras võrgu mudel asümmeetrilise talitluse uurimiseks. Võrgu mudeli koostamisel kirjeldati kasutatud modelleerimis meetodikaid, selleks et anda ülevaade, kuidas modelleerida ühisriputusega ülekandeliine. Täiendavalt kirjeldati teiste vajalike elementide modelleerimist ning kasutatud andmeid.

Tulenevalt asjaolust, et analüüsid teostati ainult modelleeritud mudeliga, pandi mudeli valideerimisele ning testimisele suurt rõhku. Mudelis kasutatud süsteemiharusid testiti nende lühisvoolude vastavusega, võrreldes neid teiste allikate lühisvooludega. Mudeliga arvatud elektriliinide takistusi võrreldi teiste Elering AS võrgu mudelite takistuste ja elektriliinide mõõtmisprotokollidega. Täiendavalt valideeriti vaatluse all oleva elektriliini (ülekandeliini L503) talitlust võrgu mõõtmiste alusel. Koostatud mudeli valideerimise tulemused näitasid head vastavust teistest allikate andmetega, mille põhjal võib mudelit ning sellest saadavaid tulemusi lugeda usaldusväärseteks.

Järgnevalt analüüsiti koostatud võrgumudeli alusel tekkivat pinget ja vooluasümmeetriat erinevate talitlus režiimide korral. Esmalt vaadeldi ülekandeliini mõju normaalitalitlusel, millest selgus, et ülekandeliinist põhjustatud pinget asümmeetriat on kordades alla standardis kehtestatud piiri. Mahtvusliku asümmeetriat osakaalu analüüsist selgus, et arvestatav osa pinget asümmeetriast ülekandeliinis on põhjustatud mahtvuslikust komponendist. Modelleerides asümmeetriat erinevatel koormustasemetel selgus vastastikinduktiivsuste ja tekkiva pinget asümmeetriat mõju.

Täiendavalt selgusid üldised tendentsid voolu ning pinge asümmeetria ja ülekanaliini koormatuse vahel. Sealjuures leiti, et transiidil Sindist Harkusse on induktiivse iseloomuga koormusega (nt Harku reaktoritega) võimalik tekkivat asümmeetriat vahetult enne koormust vähendada. Analüüsid ülekandeliinis L503 tekkivat asümmeetriat 110 kV elektriliinidega ühisriputusest tingitud vastastikmõjudest leiti, et ligi neljandik pinge asümmeetriast ülekanaliini lõpus on ühisriputuse mõjudest tingitud.

Käsitletud ühisriputuse mõjudest ülekanaliini L503 pinge asümmeetriasse järeldati, et suurem osa ülekanaliinis tekkivast pinge asümmeetriast on põhjustatud faasi juhtide vastastikmõjudest. Sellest tulenevalt analüüsiti järgnevalt transponeerimise mõju ülekanaliini asümmeetriaale. Tulemustest järelkus, et ainult ühe transponeerimise teostamine liini L503 korral ei ole asümmeetria vaatest optimaalne. Uurides transpositsioonide asukohti järelkus, et L503 olemasolevatest transpositsiooni kohtadest märgatavalt paremaid asukohti ei leidu, kui arvesse võtta mõlemasuunalist transiiti ja tekkivat pinge asümmeetriat. Transpositsiooni(de) koha/kohtade muutmiseks on võimalik valdavalt ühesuunalise transiidi korral pinge asümmeetriat vahetult enne koormust vähendada. Katsetades transponeerimismeetodit, mille korral vahetatakse korraga vaid kahe juhtme geomeetriselised positsioonid, leiti, et selliselt transponeeritud skeemi asümmeetria sisuliselt ühtib normaalskeemiga saadud tulemustega.

Teostades kaks täistsüklilist transpositsiooni oli voolu asümmeetria liini otstes võrdlemise sarnane normaalskeemiga. Kuid selliselt transponeeritud skeemiga vähenes pinge asümmeetria suvise koormusega modelleerides vahetult enne koormust ligi kaks korda. Sellest järelkus valdavalt väikse ülekanaliini koormuse puhul oleks pinge asümmeetria vaatest täiendav transponeerimistsükel õigustatud.

Teostades neli täistsüklilist transpositsiooni oli voolu asümmeetria liini otstes võrdlemise samasugune nagu normaalskeemiga või isegi suurem. Pinge asümmeetria Harkus vähenes talvise koormuse korral kolmandiku võrra ning suvise koormuse korral rohkem kui kolm korda, millest järelkus pinge asümmeetria vähendamise vaatest tihedad transpositsioonid õigustatud.

Antud bakalaureusetöösse ei mahtunud ühisriputusega õhuliinide puhul järgmised aktuaalsed teemad: rikketalitus ning 330 kV ja 110 kV elektriliinide lühised, erinevate faseeringutega tekkiva asümmeetria uurimine, pinge ja voolu asümmeetria modelleerituna koos ülejäänud 330 kV elektriliinidega, nulljärgnevuspingete ja -

voolude täpne käsitlemine ja modelleerimine, asümmeetria analüüsimine võrgu mõõtmiste põhjal, asümmeetria ülekandumise täpne uurimine ühelt pingeastmelt teisele jõutrafode vahendusel ning valmiva Lihula 330 kV alajaama mõju tekkivale asümmeetriale.

Loetletud teemadest pakuks autorile kõige enam huvi 330 kV ja 110 kV ühisriputusega õhuliinide lühiste uurimine, eriti kui see ühildada releekaitse toime analüüsimisega, antud talitluses. See teema hõlmab palju keerukaid kuid huvitavaid nüansse ning ühtlasi eeldab teatavaid algteadmisi releekaitsest ja lühistest. Täiendavat uurimismaterjali annab Eesti ülekandevõrgus esinenud rikete detailne analüüsimine ja modelleerimine ning sellega kaasneks tegelikkuse lähedane kajastamine .

SUMMARY

In this bachelor's thesis the voltage and current unbalance of a multi-circuit and multi-voltage transmission line was investigated. To investigate such topics one Estonian multi-circuit and multi-voltage transmission line was taken as an example. Specifically, Harku – Lihula – Sindi transmission line. From that power line a PSCAD model was configured, mainly to analyse the voltage and current asymmetry in the 330 kV line.

In the bachelor's thesis the effects of asymmetrically positioned phase conductors and the voltage and current unbalance main causes were explained. Furthermore, the main transposition effects were explained because transposition is an important component when analysing the resulting asymmetry. The chosen transmission line and its parameters were described in-depth from the view of modelling the line.

From the comprehensive description of the transmission line Harku - Lihula – Sindi a PSCAD model was configured, which is the primary analysing method of the thesis. While configuring the model, the used modelling methods were described, to give an overview of the modelling of a multi-circuit and multi-voltage transmission line. Furthermore, the other relevant element modelling and there used data was described.

Because the main analysing method of the thesis was based on the PSCAD the verification of the model was addressed with great importance. The used system equivalents were tested against other sources of short circuit currents. Impedances from the configured model were compared against other impedances from Estonian network models and measured impedance values from line measurements. Furthermore, the transmission line into the main focus was verified based on measurements from the Estonian TSO. All the model verifications showed compliance with other sources which verifies the results in the next chapters.

Following chapter analysis, based on the configured network model, the current and voltage asymmetry in different network configurations. First the current and voltage unbalance in normal operation was assessed. From that the relation between the load and asymmetry was concluded and it was found that the voltage unbalance in normal operation is way below the value laid down in the standard. Analysing the capacitive asymmetry, it was found that the capacitive coupling has a big part in the resulting voltage unbalance. While observing the forming asymmetry in different loads on the transmission line the relations between the asymmetry and transmission line were

drawn. Furthermore, general rules between the line load and asymmetry were concluded. From that it was found that with a specific transit on the transmission line it is possible to lower the voltage unbalance by turning on the reactors in the opposing substation from the supply to the transmission line. Analysing the asymmetry in the 330 kV line caused by the multi-circuit peculiarity, it was found that nearly a fourth of the voltage unbalance in the 330 kV line is caused by being on the same towers with the 110 kV line.

From the last finding the conclusion that most of the asymmetry in the 330 kV transmission line is caused by its own mutual impedances, was drawn. Because of that transposition was analysed. From the results it was found that performing only one transposition on so long line is not optimal from the voltage unbalance view. Analysing the transposition locations, it was found that noticeable better locations for exiting transpositions do not exist, when both transit ways are considered equally. When the transmission line is considered to have a main transit then optimising the voltage unbalance in the opposing end from the supply is possible. While, modelling a transposition method in which only two phase conductors geometric positions are switched at once, it was found that the described method and the networks normal configuration possess very similar asymmetries.

Performing two full transposition cycles the current asymmetry had similar values in the line ends as the normal network configuration. It was found that the voltage unbalance in such a transposition method lowered double fold, using the lower load on the transmission line. From that the conclusion that when the transmission line has mainly a lower load two transposition cycles are justified.

Performing four full transposition cycles the current asymmetry was like the current asymmetry of the normal network configuration or even a little bit higher. The voltage unbalance in Harku, modelling with the winter load, decreased by a third and modelling with the summer load the voltage unbalance decreased more than 300 %, compared to the voltage unbalance of the normal configuration of the network. From that also the conclusion, that with a mainly smaller load on the transmission line, frequent transpositions are justified.

Following topics of multi-circuit and multi-voltage transmission lines were not investigated but found to have relevance: study of short circuit between the 330 kV and 110 kV lines, the asymmetry caused by different phase geometric positions, the voltage and current asymmetry in combination with other 330 kV transmission lines,

modelling and assessment of zero sequence voltages and currents, assessment of the asymmetry based on the network measurements, assessment of the asymmetry carry-over from one voltage to the other through transformers and the effect to the asymmetry when Lihulas substation (roughly on the middle of the transmission line) is built.

From the listed topics the one that stands out to the author is the study of 330 kV and 110 kV short-circuit combined with analysing relay operations in such situations.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Ü. Treufeldt, "Lühised 2. osa, loengukonspekt", TTÜ, Tallinn, 2023.
- [2] A. Dziendziel ja H. Kocot, "Methods to Minimize the Effects of Geometric Asymmetry of Multi-Circuit, Multi-Voltage Overhead Lines on Transmission Network Operation", *Energies*, vol. 16, no. 22, Nov. 2023, doi: 10.3390/en16227611.
- [3] A. Dziendziel, H. Kocot ja P. Kubek, "Construction and Modeling of Multi-Circuit Multi-Voltage", *Energies*, vol. 14, 2021, no. 2, doi: 10.3390/en14020421.
- [4] W. C. C. Jurado, M. C. Fernandez, W. M. S. Arauz ja C. H. Chilan, "Transposition of Medium and Long Transmission Lines", *International Journal of Physical Sciences and Engineering (IJPSE)*, vol. 3, 2019, no. 1, doi: 10.29332/ijpse.v3n1.236.
- [5] L. Neumann ja P. Kalantarov, *Elektrotehnika teoreetilised alused III.*, Tallinn, 1969.
- [6] A. M. Gashimov, A. R. Babayeva ja A. Nayir, „Transmission line transposition,“ International Conference on Electrical and Electronics Engineering - ELECO 2009, Nov 2009. [Võrgumaterjal]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5355336?arnumber=5355336>
- [7] H. Kocot ja A. Dziendziel, "Impedance models of multi-circuit multi-voltage overhead power lines", *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, vol. 1, no. 12, Dets. 2019, doi: 10.15199/48.2019.12.58.
- [8] ELERING, "ELERING AS Eesti võrgumudel tarkvaras CAPE", (sisematerjal).
- [9] ELERING, "ELERING AS Liinide faseeringud", (sisematerjal).
- [10] ELERING, "ELERING AS Harku - Lihula - Sindi tehniline projekt", (sisematerjal).
- [11] ELERING, "ELERING AS Eesti ülekandevõrgu skeem Eesti kaartil", (sisematerjal).
- [12] „ACSR - datasheet,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.media.drakakeila.ee/2015/05/ACSR.pdf> [Kasutatud 11 veebruar 2024].
- [13] „AC — неизолированный сталеалюминиевый провод,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://linijaopory.ru/as-neizolirovannyj-stalealyuminievyj-provod/> [Kasutatud 11 veebruar 2024].

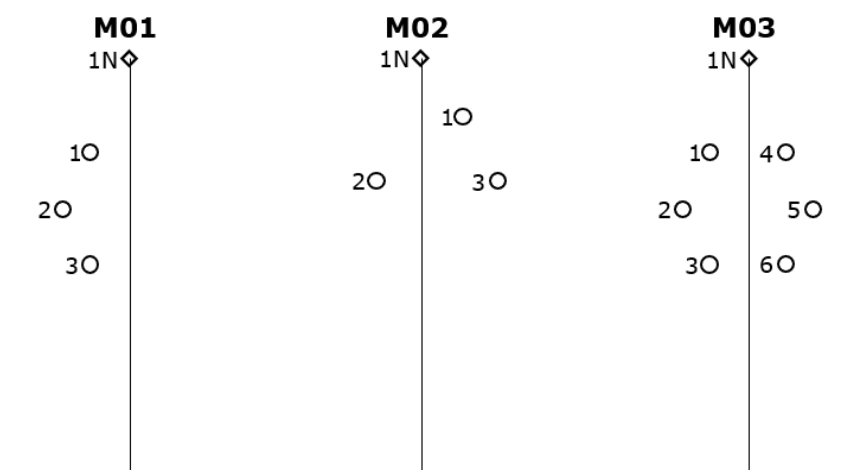
- [14] Ü. Treufeldt, "Lühised 4. osa, loengukonspekt", TTÜ, Tallinn, 2023.
- [15] ELERING, "ELERING AS SCADA võrgu mõõtmis andmed", (sisematerjal).
- [16] ELERING, "ELERING AS mõõdetud elektriliinide andmebaas", (sisematerjal).
- [17] *Avalike elektrivõrkude pinge tunnussuurused*, EVS-EN 50160:2023, Eesti Standardikeskus, Tallinn, Veb. 2023.
- [18] J. Kilter, T. Kangro, T. Sarnet ja I. Palu, „Elektriraudtee ja selle mõjud elektrisüsteemi talitlusele,“ Elering toimetised, vol. 2, no. 10, 2015.
[Võrgumaterjal]. Available:
https://elering.ee/sites/default/files/attachments/Elektriraudtee_ja_selle_mojud_elektrisusteemi_talitlusele_1.pdf
- [19] *Pöörlevad elektrimasinad. Osa 1: Tunnussuurused ja talitusviisid*, EVS-EN 60034-1:2010, Eesti Standardikeskus, Tallinn, Okt. 2010.
- [20] ELERING, "ELERING AS alajaamade normaalskeemid", (sisematerjal).

LISAD

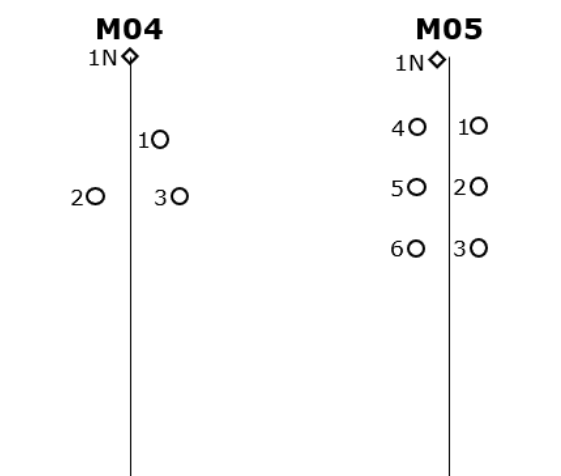
Lisa 1 110 kV elektriliinid enne ja pärast ühisriputust

Masti geomeetriaid M1 ja M2 kasutati ühisriputusega sektsioonide kirjeldamiseks ja modelleerimiseks. Osad 110 kV elektriliinid ei ole täies pikkuses L503-ga ühisriputusega vaid teatud sektsiooni ulatuses [8]. Näiteks L111 ja L112 on täies ulatuses L503-ga ühisriputusega (Keilast Harkuni). Seevastu L017 on ainult 1,896 km (kuus masti) ulatuses L503-ga ühisriputusel ning enne ja pärast ühisriputust on eraldiseisva 110 kV elektriliinina [8].

Täpsuse huvides sooviti kõik vaatluse all olevad 110 kV elektriliinid täielikult välja modelleerida. Täiendavalt modelleeriti välja liinid, mis on enne või pärast L503-ga ühisriputusel olevate 110 kV elektriliinidega ühisriputusel (kaheaahelised elektriliinid nt teatud pikkuses L185 ja L017). Eraldiseisvate 110 kV elektriliinide mastigeomeetriaid kirjeldavad järgnevad skeemid ning tabelid:



Joonis L1.1 L017 ja L185 kirjeldavad geomeetria skeemid [8]



Joonis L1.2 L037 ja L189 kirjeldavad juhtide geomeetrilise paigutuse skeemid [8]

Tabel L1.1 mastigeomeetria M01, M02 ja M03 koordinaadid [8]

Positsioon	M01		M02		M03	
	X, m	Y, m	X, m	Y, m	X, m	Y, m
1; 4	2,0	16,9	2,0	16,2	-2,0; 2,0	16,9
2; 5	3,5	13,9	-2,0	13,2	-3,5; 3,5	13,9
3; 6	2,0	10,9	3,5	13,2	-2,0; 2,0	10,9
1N	0	20,9	0	19,6	0	20,9

Tabel L1.2 Mastigeomeetria M04 ja M05 koordinaadid [8]

Positsioon	M04		M05	
	X, m	Y, m	X, m	Y, m
1; 4	1,75	16,2	2,4; -2,4	27,89
2; 5	-1,75	13,2	2,4; -2,4	23,03
3; 6	2,45	13,2	2,4; -2,4	18,29
1N	0	19,6	-0,8	32,9

Tabel L1.3 L017 ja L185 eraldiseisvate seksioonide pikkused, mastigeomeetriad ja faseeringud [8] [9]

Liin	Pikkus, km	Mast	Faseering positsioonidel		
			1; 4	2; 5	3;6
L017	3,16	M01	L2	L3	L1
	8,449	M02	L2	L1	L3
	17,713	M02	L2	L1	L3
L185	9,275	M01	L3	L2	L1
L185 (1...3) + L017 (4...6)	6,274	M03	L3; L2	L1; L3	L2; L1

L017 kulgeb Kiisast 3,16 km mastigeomeetria M01 ning 8,449 km mastigeomeetria M02 kuni L503-ga ühisriputuseni (vt joonis L1.1 ja tabel L1.1). Peale L503-ga ühisriputust kulgeb L017 eraldiseisvana 17,713 km mastigeomeetria M02 enne L185-ga kaheaahelalist seksiooni.

L185 kulgeb algusega Kohilast pikkusega 9,275 km ning mastigeomeetria M01 üheaahelalisena. Peale seda kulgevad L185 ja L017 kaheaahelaliselt 6,274 km mastigeomeetria M03 Kiisani. Peale ühisriputusega osa (L017 puhul) on L017 ja L185 juhtmetega AC 1x185/29 [13]. Elektriliinide L017 ja L185 faseeringuid eraldiseisvatel seksioonidel kirjeldab tabel L1.3.

Tabel L1.4 L037 ja L189 eraldiseisvate sektsioonide pikkused, mastigeomeetriad ja faseeringud

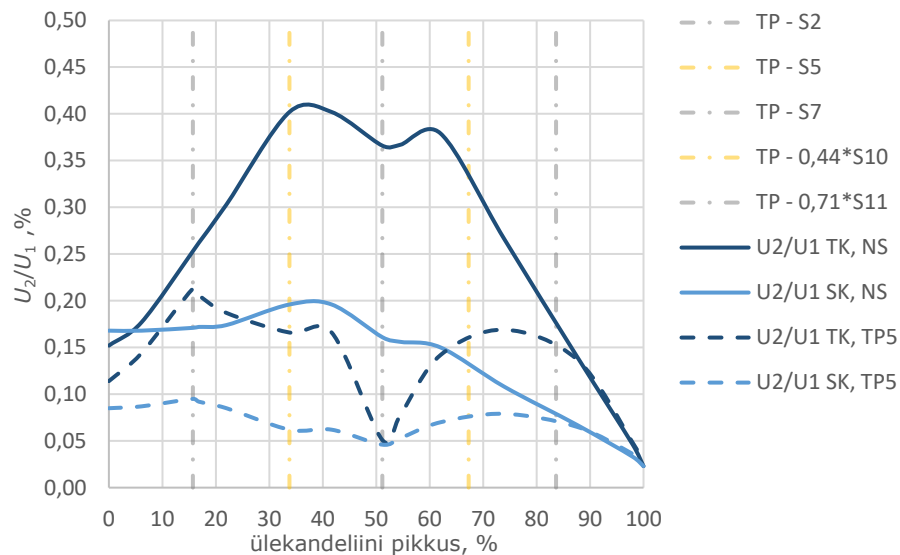
Liin	Pikkus, km	Mast	Faseering positsioonidel		
			1; 4	2; 5	3;6
L037	15,842	M04	L3	L2	L1
L189	17,839	M04	L3	L2	L1
L189 (1...3) + L037 (4...6)	12,88	M05	L3; L3	L1; L2	L2; L1

L037 kulgeb 15,842 km Martnast kuni L503-ga ühisriputuseni eraldiseisvana mastigeomeetriaga M04 (vt tabel L1.2 ja joonis L1.2) ning juhtmega AC 185/29x1 [8]. L189 kulgeb 17,839 km Vigalast kuni L037-ga ühisriputust eraldiseisvana mastigeomeetriaga M04 ning juhtmega AC 185/29x1 [8]. Peale L037 ühisriputust L503-ga kulgevad L037 ja L189 kaheaheeliselt 12,88 km mastigeomeetriaga M05 ning juhtmetega ASCR 242/39x1 [12] kuni Lihulani. Elektriliinide L037 ja L189 faseeringuid eraldiseisvatel sektsioonidel kirjeldab tabel L1.4.

Tabel L1.5 L107B ja L033 eraldiseisvate sektsioonide mastigeomeetria ja faseeringud

Liin	Pikkus, km	Mast	Faseering positsioonidel		
			1; 4	2; 5	3;6
L107B (1...3) + L033 (4...6)	1,895	M05	L1; L3	L2; L2	L3; L1

L033 ja L107B kulgevad Audrust 1,895 km kaheaheelistena mastigeomeetriaga M05 ning juhtmetega AC 240/39x2 [13] (osajuhtmete vahekaugus 0,4 m) kuni erisuundades ülekandeliiniga L503-ga ühisriputust. Elektriliinide L033 ja L107B eraldiseisvate sektsioonide faseeringuid kirjeldab tabel L1.5.

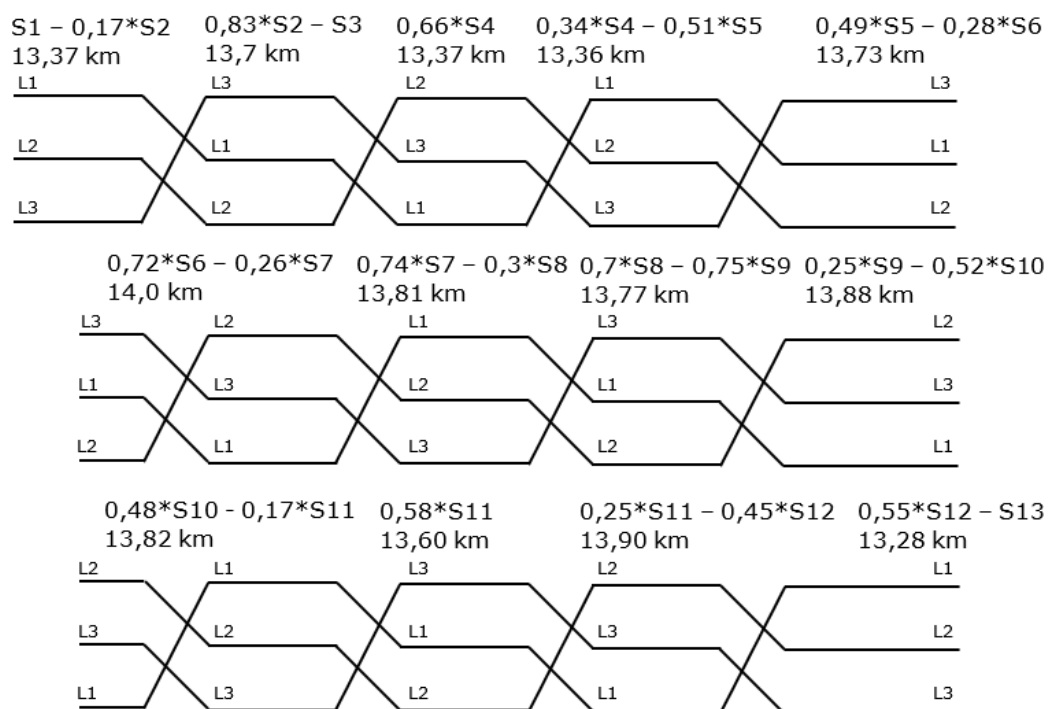


Joonis L2.3 Ülekandeliinil L503 tekkivate pingete asümmeetriate võrdlus TP5 ja normaalskeemiga erinevate koormuste korral

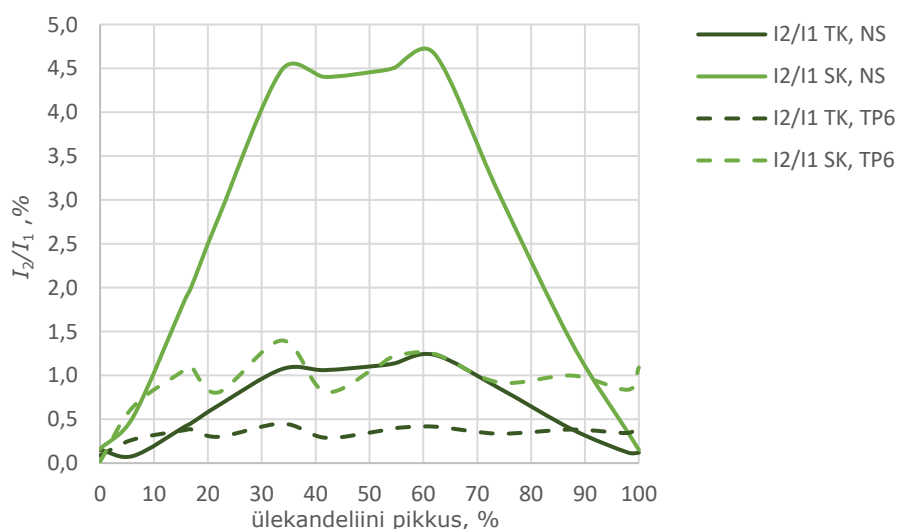
Antud katsetusest järeldub, et täiendava transponeerimis tsükli skeemi lisamine vähendab oluliselt suvise koormuse korral pingete asümmeetriat (vt joonis L2.3), mille puhul parameeter U_2/U_1 vähenes ligi kaks korda. Voolu asümmeetria TP5 kohaselt talvise koormuse korral võrreldes normaalskeemiga on liini lõikes oluliselt vähenenud (vt Joonis L2.2). Suvise koormuse korral avaldub samasugune tendents, vaid veelgi tugevamalt. Vaadeldes voolu asümmeetriat ei ole täiendav transponeerimis tsükkel põhjendatud, sest liini otstes on voolu asümmeetria mõlema konfiguratsiooni puhul ligilähedaselt sama. Seevastu just suvise koormuse korral on pingetasümmeetria Harkus TP5 puhul üle poole võrra madalam kui normaalskeemiga, millest järeldub, et pingetasümmeetria vähendamiseks koormusel (valdavalt väikeste ülekandeliini koormuste korral) põhjendab täiendav transponeerimis tsükkel end ära.

Lisa 3 Neli täistsüklilist transpositsiooni

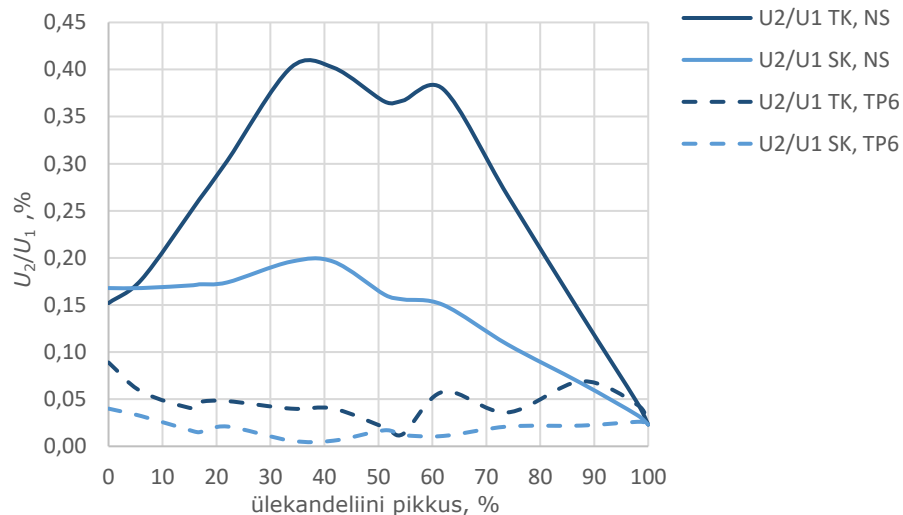
Koostatud mudelis koosneb ülekandeliin L503 13-st liini segmentidest, mida saaks maksimaalselt igat liini segmenti poolitades 12 korda transponeerida – TP6. Antud meetodi kohaselt jaguneb ülekandeliin L503 13...14 km liini lõikudeks, mis teeb neli täis tsüklilist transpositsiooni ning ühe transpositsiooni lisaks. Liinisektsioonid eri pikkustega, millest tulenevalt tuli enamikke liinisektsioone sarnaselt Lisale 2 nii-öelda poolitada (vt joonis L3.1).



Joonis L3.1 Nelja täistsüklilise transponeerimise põhimõtteskeem



Joonis L3.2 Transponeerimismeetodi TP6 kohaselt ülekandeliinil L503 tekkiva voolu asümmeetrija võrdlus normaalskeemiga tekkiva voolu asümmeetriaga



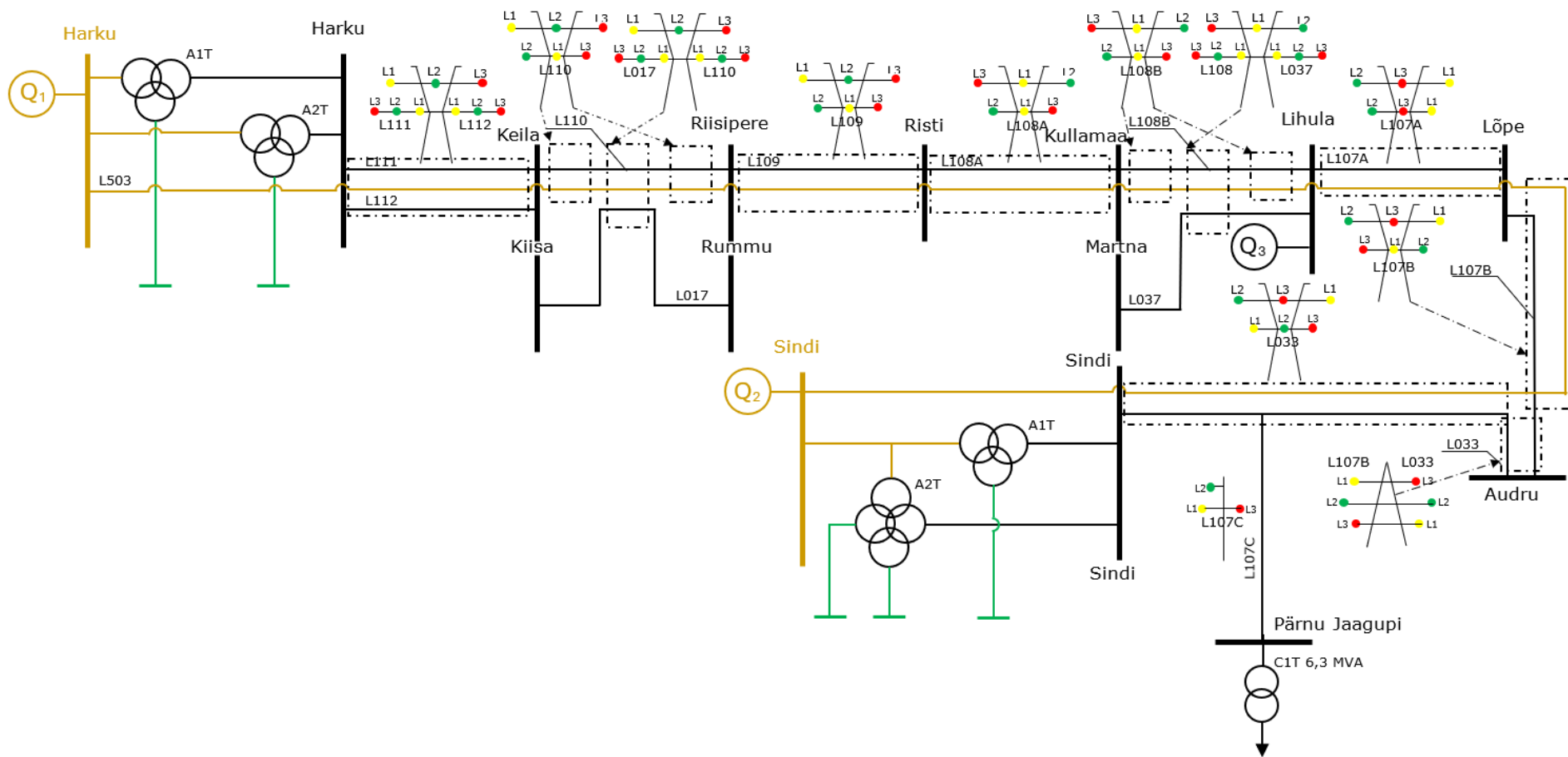
Joonis L3.3 Transponeerimismeetodi TP6 kohaselt ülekandeliinil L503 tekkiva pinge asümmeetria võrdlus normaalskeemiga tekkiva pinge asümmeetriaga

Nagu jooniselt L3.2 ja jooniselt L3.3 selgub on mõlema koormuse korral pinge asümmeetria valdavalt alla 0,10 % ning voolu asümmeetria vastavalt talvise ja suvise koormuse korral alla 0,4 % ja 1,5 %. Sellest järeldub, et horisontaalsete paigutustega ühisriputusega 330/110 kV elektriliini kirjeldamisel on 13...14 km iga transponeerimise vahemaaks liiga suur, et vastastikmõjusid mitte arvestada. Selle erandiga, et väikese koormuse korral on liini lõpu pinge asümmeetria küllaltki väike, mille juures ainult pinge asümmeetria raamistikus saaks transpositsioone lugeda piisavaks, et vastastikmõjusid mitte arvestada.

Võrreldes TP5 ja TP6-ga tekkivaid asümmeetriaid selgub, et nelja täis tsükliilise transpositsiooniga väheneb pinge asümmeetria liini lõpus ka hinnanguliselt suurema koormuse korral. Täiendavalt on TP5 ja TP6 puhul pinge asümmeetria ka liini keskmises oluliselt väiksem kui pinge asümmeetria normaalskeemiga. Liini keskmises olev pinge asümmeetria oleks põhjendatud kui esineks soov liini keskmesse uus alajaam rajada (nt Lihula alajaam).

Lisa 4 Skeemid

Lisas kolmes tuuakse välja põhimõtte skeem koos faseeringutega (vt joonis L4.1), mis on Elering AS-i materjalide [8] [9] [20] aluse koostatud. Joonis L4.1 põhjal koostati ülekandeliinis asümmeetria uurimiseks PSCAD mudel (vt joonis L4.2).



Joonis L4.1 Vaadeldava elektrivõrgu põhimõtte skeem faseeringutega

