



TALLINNA TEHNICAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

# PLANEERITAVA SAAREMAA ÜLEKANDEVÕRGU ALTERNATIIVIDE MAJANDUSTEHNILINE ANALÜÜS

**ECONOMIC AND TECHNICAL ANALYSIS OF THE  
ALTERNATIVES OF THE PLANNED SAAREMAA  
TRANSMISSION GRID  
BAKALAUREUSETÖÖ**

Üliõpilane: Brenda Pent

Üliõpilaskood: 213728EAAB

Juhendajad: Jako Kilter, professor  
Oleg Tšernobrovkin, Elering AS  
energiasüsteemi planeerimise juht

# 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.

"13" mai 2024

Autor: Brenda Pent

/allkirjastatud digitaalselt/

Töö vastab bakalaureusetööle esitatud nõuetele

"13" mai 2024

Juhendajad: Jako Kilter

/allkirjastatud digitaalselt/

Oleg Tšernobrovkin

/allkirjastatud digitaalselt/

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina, Brenda Pent

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Planeeritava Saaremaa ülekandevõrgu alternatiivide majandustehniline analüüs,

mille juhendajad on Jako Kilter ja Oleg Tšernobrovkin,

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. mai 2024

---

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

# LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Brenda Pent

*Lõputöö liik:* Bakalaureusetöö

*Töö pealkiri:* Planeeritava Saaremaa ülekandevõrgu alternatiivide majandustehniline analüüs

*Kuupäev:*  
13.05.2024

63 lk

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendajad:* Professor Jako Kilter, Elering AS Oleg Tšernobrovkin

*Sisu kirjeldus:* Eestil on tarvis kliimapoliitika eesmärkide täitmiseks, elektrituru integreerimiseks ja varustuskindluse ning energiajulgeoleku tagamiseks rajada täiendavaid välisühendusi. Käesolevas lõputöös uuriti Eesti-Läti neljanda ühenduse rajamist algusega Saaremaa läänerannikult. Lõputöös uuriti nelja variandi tehnilist ja majanduslikku mõistlikkust, jättes kõrvale looduslikud, ehituslikud ja sotsiaalsed piirangud. Neljast variandist kahe puhul on tegemist ülekandevõrguga Lihulast Saaremaa alajaamani, liikudes läbi Suure ja Väikese väina kaablitega ja üle Saaremaa õhuliiniga, kus esimene variant on pingestmel 330 kV ja teine 220 kV. Ülejäänud variandid kulgevad samuti Lihulast Saaremaa alajaamani, kuid liiguvad lõunast läbi Saaremaa rannikumere kaablitega, kolmas variant pingega 330 kV ja neljas variant pingega 220 kV. Lõputöö käigus analüüsiti variante kolmel stsenaariumil, kasutades nii tugeva kui ka nõrga võrgu ekvivalenti. Nõrga võrgu puhul on Lihula alajaamas välja lülitatud üks trafodest ja samuti on välja lülitatud Lihula – Sindi 330 kV õhuliin. Lisaks koostati igale variandile N-1 analüüs, saamaks teada, mis juhtub, kui mõni reaktor, trafo või liin on välja lülitatud. Püstitatud hüpotees, et tehnilis-majanduslikult on kõige otstarbekam ülekandevõrgu loomisel kasutada võimalikult palju õhuliine, osutus tõeseks. Õhuliin on kaabelliinist neli kuni viis korda odavam, mistõttu on esimene ja teine variant palju odavamad kolmandast ning neljandast. Tulemusele tuginedes tuleks Saaremaa ülekandevõrk luua vastavalt variantidele üks või kaks. Samas pole arvestatud looduslike ja sotsiaalsete piirangutega, seega võib hilisemas planeerimisjärgus osutada kõige mõistlikumaks kolmas või neljas variant. Lõputöö on sisendiks ülekandesüsteemi planeerijatele alternatiivi valikul. Ühiskondlikult on oluline luua ülekandevõrk minimaalsete kuludega ja tehniliselt mõistlikult.

*Märksõnad:* PSS/E, Saaremaa, majandustehniline analüüs, ülekandevõrk, bakalaureusetöö.

## ABSTRACT

*Author:* Brenda Pent

*Type of the work:* Bachelor Thesis

*Title:* Economic and Technical Analysis of the Alternatives of the Planned Saaremaa Transmission Grid

*Date:*

13.05.2024

63 pages

*University:* Tallinn University of Technology

*School:* School of Engineering

*Department:* Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

*Supervisors of the thesis:* Professor Jako Kilter, Elering AS Oleg Tšernobrovkin

*Abstract:* To fulfill the goals of the climate policy and to integrate the electricity market, as well as to ensure the energy security, Estonia needs to create additional external connections. In this thesis, the creation of the fourth Estonian-Latvian connection, starting from the west coast of Saaremaa, was investigated. The thesis examined the technical and economic feasibility of four options, leaving aside natural, structural and social constraints. Two of the four options involve a transmission grid from Lihula to the Saaremaa substation through the two straits with cables and over Saaremaa with an overhead line, where the first option has a voltage level of 330 kV and the second 220 kV. The remaining options also go from Lihula to the Saaremaa substation, going from the south through the Saaremaa coastal sea with cables, the third option with a voltage of 330 kV and the fourth 220 kV. In this thesis, options were analyzed in three scenarios, using both a strong and a weak transmission grid. In the case of a weak grid, one of the transformers in the Lihula substation and the Lihula - Sindi 330 kV overhead line have been switched off. In addition, an N-1 analysis was prepared for each option to find out what happens if a reactor, transformer, or an overhead line goes out of work. The raised hypothesis: technically and economically the most beneficial is to use overhead lines as much as possible when creating a transmission grid, turned out to be true. An overhead line is four to five times cheaper than a cable line, which is why the first two options are cheaper. Therefore, Saaremaa's transmission grid should be created according to options one or two. Natural, and social limitations have not been considered, so the third or fourth options may turn out to be more reasonable at a later stage of planning. The thesis is an input for transmission system planners when choosing an alternative. It is socially important to create a transmission grid with minimal costs, considering technical reasonability.

*Keywords:* PSS/E, Saaremaa, technical and economic analysis, transmission grid, Bachelor Thesis.

# TalTech Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Brenda Pent, 213728EAAB

Õppekava, peeriala: EAAB, Elektroenergeetika

Juhendajad: Professor Jako Kilter

Oleg Tsernobrovkin, energiasüsteemi planeerimise juht

Elering AS, oleg.tsernobrovkin@elering.ee

### Lõputöö teema:

Planeeritava Saaremaa ülekandevõrgu alternatiivide majandustehniline analüüs

Economic and Technical Analysis of the Alternatives of the Planned Saaremaa Transmission Grid

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Mis on alternatiivsete trassikoridoride eelised ja puudused?
2. Milline peaks olema ühenduse alternatiivide läbilaskevõime ja millised peaksid olema selle tehnilised parameetrid?
3. Milline on uue ühenduse alternatiivide reaktiivvõimsuse kompenseerimise vajalikkus ja kus peaksid paiknema kompenseerimisseadmed?
4. Missugused on erinevate variantide korral võrgukaod?
5. Kui suured on võimalikud kulud ühenduse ehitamisel ja milliste riskidega peaks selle ehitamisel arvestama?

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Vormistamise nõuete ja PSS\E mudeliga tutvumine	Detsember 2023
2.	Tehnilise informatsiooni hankimine, kirjandusega töötamine ja esimeste peatükkide kirjutamine	Jaanuar 2024
3.	PSS/E mudelite koostamine	Veebruar - märts
4.	Peatükkide kirjutamise lõpetamine, alternatiivide võrdlus ja analüüs	Märts - aprill
5.	Kokkuvõtte koostamine	Aprill
6.	Töö mustandi valmimine ja juhendajale läbilugemiseks saatmine	25. aprill
7.	Paranduste sisseviimine	Mai
8.	Töö lõplik versioon	13. mai

**Töö keel:** eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "13" mai 2024.a

**Üliõpilane:** ..... "15" november 2023 a  
/allkiri/

**Juhendaja:** ..... "15" november 2023 a  
/allkiri/

**Juhendaja:** ..... "15" november 2023 a  
/allkiri/

**Programmijuht:** ..... "15" november 2023 a  
/allkiri/

# SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE .....	4
ABSTRACT .....	5
SISUKORD .....	8
EESSÕNA .....	9
1 SISSEJUHATUS.....	10
2 EESTI JA SAAREMAA ELEKTRIVÕRGU ARENGUD LÄHTUVALT TAASTUVENERGIA 100 EESMÄRKIDEST .....	12
2.1 Taastuvenergia 100 eesmärgid .....	12
2.2 Eesti ja Saaremaa elektrisüsteem .....	13
2.3 Saaremaa võrgu tugevdamise vajadus ja alternatiivid .....	14
3 ELEKTRIVÕRGU MODELLEERIMISE JA ANALÜÜSI PÕHIMÕTTED .....	17
3.1 PSS/E tarkvara kirjeldus ja meetodika .....	17
3.2 Elektrisüsteemi varustuskindlus .....	18
3.3 Modelleerimise lähteandmed .....	18
3.4 Õhu- ja kaabelliinide poolt genereeritav reaktiivvõimsus .....	21
4 SAAREMAA ÜLEKANDEVÕRGU ALTERNATIIVIDE TEHNILINE JA MAJANDUSLIK ANALÜÜS .....	22
4.1 Analüüsi meetodika .....	22
4.2 Analüüsi tulemused .....	23
4.2.1 Variant 1 .....	24
4.2.2 Variant 2 .....	27
4.2.3 Variant 3 .....	28
4.2.4 Variant 4 .....	30
4.3 Variantide esmase investeringu majanduslik analüüs .....	32
4.4 Tulemuste kokkuvõte .....	35
KOKKUVÕTE .....	37
SUMMARY .....	39
KASUTATUD KIRJANDUS .....	41
LISAD .....	42
Lisa 1 PSS/E tarkvara lahendusmeetodid – Newton-Raphson ja Gauss-Seidel .....	45
Lisa 2 Variantide täielikud modelleerimistulemused kolmel stsenaariumil .....	47
Lisa 3 Modelleerimistulemused PSS/E tarkvaras .....	55
Lisa 4 Ühe ja topelt võimsuslülititega lahtrite selgitavad joonised .....	63



## **EESSÕNA**

Käesoleva lõputöö teema on sõnastatud Elering AS-i, Eesti põhivõrguettevõtte, algatusel ning sarnast lõputööd ei ole varasemalt koostatud. Soovin tänada oma lõputöö juhendajat Jako Kilterit, kes abistas töö ülesehitusega. Lisaks soovin tänada Elering AS energiasüsteemi planeerimise üksuse juhti Oleg Tšernobrovkinit, kes sõnastas lõputöö teema ja energiasüsteemi planeerimise üksuse analüütikuid Anton Veikmani ja Ilja Andrejevit, kes nõustasid ning abistasid töö vältel erinevate osade juures.

Töös on algandmetena kasutatud Eleringi andmebaasides saadaolevaid andmeid, PSS/E mudeli modelleeris lõputöö koostaja ise ning Eesti ja Läti võrk on lisatud ekvivalenteeritud kujul ehk asendatud ekvivalentse takistuse ja generaatoriga.

Lõputöö autori meiliaadress on [brenda.pent@elering.ee](mailto:brenda.pent@elering.ee).

# 1 SISSEJUHATUS

Euroopa Liidu ja Eesti kliima- ning energiapoliitika eesmärkidest tulenevalt võetakse kasutusele aina rohkem taastuvenergia lahendusi, mis tähendab ka täiendavaid väljakutseid elektriülekandevõrkude väljaarendamisel ja läbilaskevõimsuste olulist kasvuvajadust kohtades, kus varasemalt ei ole tugevat ülekandevõrku välja ehitatud. Eleringi 2023. aasta varustuskindluse aruandes [1] on välja toodud, et tänaste liitumislepingute kohaselt on Eestis aastaks 2030 võrgus 1500 megavatti (MW) päikeseenergia tootmist ning 3000 MW maismaatuule tootmist. Lisaks sellele on Eesti ja Läänemereäärsed riigid allkirjastanud Marienborgi deklaratsiooni [2], mille kohaselt peaks aastaks 2030 olema Läänemere piirkonnas võrku ühendatud 19,6 gigavatti (GW) meretuuleenergiat. Seetõttu on riik seadnud ambitsiooniks, et Eestis on aastal 2030 1 GW meretuuleenergiat, aastal 2040 3,50 GW meretuulikutest toodetud energiat ning aastal 2050 7 GW jagu meretuuleelektrijaamu. Meretuuleenergia potentsiaal kogu Läänemeres on aastaks 2030 26,7 GW, kus jaotuvad eesmärgid järgmiselt: Eesti 1 GW, Leedu 1,4 GW, Läti 0,5 GW, Poola 10,1 GW, Rootsi 0,6 GW, Saksamaa (Läänemere osa) 8 GW, Soome 1 GW, Taani (Läänemere osa) 4,1 GW.

Kui täna asuvad tootmisüksused suuremas osas Ida-Eestis, siis praegu luuakse uusi tootmisvõimsusi rohkem Lääne-Eesti poole, kus asuvad ka potentsiaalsed meretuulealad. Energiajulgeoleku tagamiseks desünkroniseeritakse Baltimaad Venemaa sagedusalast 2025. aasta alguses, mistõttu on uued riikidevahelised ühendused väga olulised, kuna nende abil tagatakse süsteemi piisav varustuskindlus. Elering AS-il on kavas luua Eesti-Läti neljas ühendus algusega Saaremaa läänerrannikult, mistõttu on oluline luua ka Saaremaale ülekandevõrk. Selle loomine on Elering AS-le riigi poolt suunatud strateegiline ülesanne, mille jaoks on algatatud ja töösse viidud ka riigi eriplaneering [3]. Planeeritav ülekandevõrk Saaremaal aitab liita võrku taastuvenergia tootmisi, mis aitab kaasa taastuvenergia eesmärkide (vt peatükk 2) täitmisele, ning annab võimalusi luua täiendavaid riikidevahelisi ühendusi näiteks Läti ja Saksamaaga.

Teostatava lõputööga otsitakse majandustehniliselt optimaalset lahendust Saaremaale ülekandevõrgu loomiseks. Uue ülekandevõrgu loomisel lähtutakse järgnevatest etappidest: ruumilise planeeringu algatamine (riigi eriplaneering), konsultandi hange, planeeringumenetlus, mis hõlmab endas järgnevaid etappe:

- Alternatiivide kindlakstegemine;
- Alternatiivide avalik väljapanek;
- Eelistatud trassi valik;

- Eelistatud trassil eelprojekti tegemine;
- Eelistusele keskkonnamõjude strateegilise hindamise (KSH) läbiviimine;
- KSH avalikustamine;
- Planeeringu kehtestamine.

Peale planeeringumenetlust algab järgmine projekteerimisetapp, seejärel alustatakse isikliku kasutusõiguse seadmisega, millele järgnevad ehituslubade taotlemine ja ehitushanked. Pärast kõiki neid etappe saab alustada ülekandevõrgu ehitamisega, mis kestab 36 kuud. Hetkel on Eesti-Läti neljas ja seejuures ka Saaremaa ühendus konsultandi hanke etapis, mistõttu põhineb lõputöö eelduslikel alustel, kus lähtutakse täna saadaolevast parimast teadmisesest. Lõputöö tulem loob täiendava sisendinfo, mille alusel saab teha optimaalse valiku uue Saaremaa kõrgepingeliini rajamiseks. Lõputöös vaadeldakse nelja eri varianti Saaremaa ülekandevõrgu loomiseks:

- Variant 1: ülekandevõrk Lihulast Saaremaa alajaamani, liikudes läbi Suure ja Väikese väina 330 kV kaablitega ja üle Saaremaa 330 kV õhuliiniga;
- Variant 2: ülekandevõrk Lihulast Saaremaa alajaamani, liikudes läbi Suure ja Väikese väina 220 kV kaablitega ja üle Saaremaa 220 kV õhuliiniga;
- Variant 3: ülekandevõrk Lihulast Saaremaa alajaamani, liikudes lõunast läbi Saaremaa rannikumere 330 kV kaablitega;
- Variant 4: ülekandevõrk Lihulast Saaremaa alajaamani, liikudes lõunast läbi Saaremaa rannikumere 220 kV kaablitega.

Lõputöös ei kasutata 110 kV ülekandevõrku, kuna eesmärgiks on Saaremaa läänerannikul toodetud 1000 MW elektrienergiat transportida Mandri-Eestisse. 110 kV pingestmel on aga liini trassikoridor liiga lai ja kaod suurenevad. Selliste võrkude loomisel on olulised nii tehniline ja majanduslik osa, kui ka ehituslikud, keskkondlikud ja looduslikud piirangud. Lõputöö koosneb majanduslikust analüüsist ja tehnilisest osast, kus muude piirangutega ei arvestata. Lõputöös on püstitatud järgnev hüpotees:

- Tehnilis-majanduslikult on kõige otstarbekam ülekandevõrgu loomisel kasutada võimalikult palju õhuliine

Lõputöös selgitatakse hetkeolukorda ja tulevikuvisionone, seonduvalt taastuvenergia eesmärkide ja desünkroniseerimise arengutega. Seejärel käsitletakse nelja erineva variandi modelleerimistulemusi, kus iga variandi juures võetakse arvesse kolme eri stsenaariumit ja mudeldatakse ühendust nii tugeva kui ka nõrga võrguga (vt peatükk 4). Peale seda tutvustatakse modelleerimistulemusest lähtuvalt teostatud investeeringu kulu analüüsi ning antakse hinnang tehnilisele ja majanduslikule analüüsile.

Võtmesõnad: PSS/E, Saaremaa, majandustehniline analüüs, ülekandevõrk, bakalaureusetöö.

## **2 EESTI JA SAAREMAA ELEKTRIVÕRGU ARENGUD LÄHTUVALT TAASTUVENERGIA 100 EESMÄRKIDEST**

Järgnevas peatükis on kirjeldatud Eesti elektrisüsteemi, selle tuleviku arengusuundasadid, Saaremaa elektrivõrku ja lisaks on esitatud ülevaade Elering AS programmi Taastuvenergia 100 eesmärkidest.

### **2.1 Taastuvenergia 100 eesmärgid**

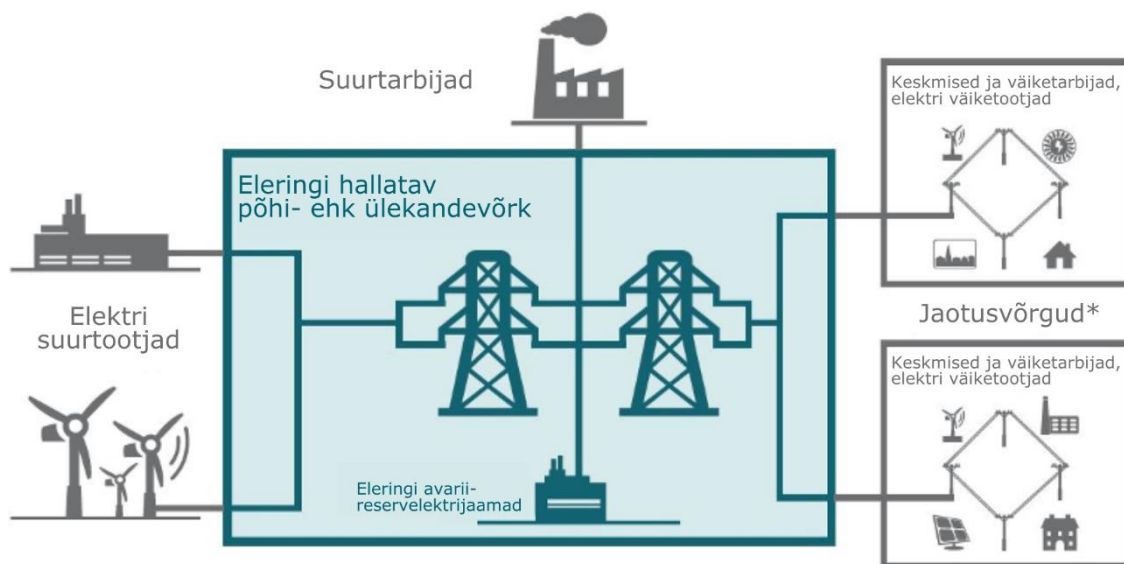
Euroopa Liidu kliimapoliitika eesmärkide kohaselt saab Euroopast aastaks 2050 esimene kliimaneutraalne maailmajagu. Nende eesmärkide täitmiseks on seadnud endale kliimaeesmärgid ka Eesti. Vastavalt Riigikogu otsusele „Kliimapoliitika põhialused aastani 2050“ [4] on 2050. aastaks Eesti kliimaneutraalne riik, mis vähendab kliimamuutuste põhjustatud negatiivseid mõjusid ja suurendab liigirikka elukeskkonna jätkumist.

Taastuvatest energiaallikatest tuleb aastaks 2030 toota elektrit aastase elektritarbimise mahust 100 %. Selleks, et eesmärgi saavutamine oleks võimalik, tuleb Eesti põhivõrguettevõttel Elering AS-il tagada piisava läbilaskevõimega võrk, milleks tehakse juba täna investeeringuid. EstLink 3, Saaremaa 330 kV võrk, Eesti-Läti neljas ühendus ning teised võrgu tugevdamisega seotud investeeringud on suurema mõjuga, et saavutada rohe-eesmärke. Lähitulevikus muutub energiasüsteem järjest paindlikumaks, mis tähendab, et süsteemis on palju hajatootmist ning see vajab tarbimise juhtimist ja ajastamist. Eesti-Läti neljas ühendus on täiendav 330 kV ühendus kahe riigi vahel, kuhu saab külge liita taastuvenergiatootmist, mis aitab kaasa taastuvenergia eesmärkide saavutamisele. Vastavalt allikale [1] on Elering AS-i poolt läbi viidud trassikoridoride eelanalüüsi tulemusel selle ühenduse sobivaim algus Eestis läänerannikult, mistõttu on Saaremaale vajalik rajada ka uus 330 kV ülekandevõrk. Täpne trassikoridor Eesti – Läti neljanda ühenduse ja sealjuures Saaremaa 330 kV liini jaoks selgub uuringute käigus ning projekti valmimistähtajaks on aasta 2035. Vastavalt algatatud riigi eriplaneeringule kavatakse planeering läbi viia 26 kuu jooksul peale planeeringuhankelepingu sõlmimist. Sellisel juhul on võimalik ka ühendus varem rajada. Elering AS-i hinnang on, et ühenduse rajamiseks peale planeeringu kehtestamist kulub seitse aastat.

Aastal 2012 välja antud üleriigiline planeering „Eesti 2030+“ [5] käsitleb Eesti energiavarustuse ja võrguühenduste arengusuundasid, tuues välja, et järjest enam muutub oluliseks taastuvenergia osakaal, et vabaneda fossiilkütustest. Samuti on öeldud, et Eestile on oluline, et riigil oleks võimekus vajadusel ise enda tarbimisvajadus katta, mistõttu on vajalik luua ka meretuuleelektrijaamasid, mis asuvad Lääne – Eesti piirkondades. Lisaks on välja toodud, et väga vajalikuks osutuvad täiendavad ühendused naaberriikide Soome, Läti ja Rootsiaga.

## 2.2 Eesti ja Saaremaa elektrisüsteem

Põhivõrk, mis on Elering AS-i hallata, ühendab elektrijaamad, jaotusvõrgud ja tarbijad tervikuks. 110 kV ülekandeliinid jaotavad elektrienergiat piirkondadesse ja 330 kV õhuliinid aitavad üle kanda suuri elektrikoguseid pikemate vahemaade taha. Eesti, Läti ja Leedu elektrisüsteemid kuuluvad ühendsüsteemi BRELL, kuhu kuuluvad lisaks Venemaa ja Valgevene elektrisüsteemid. Eesti elektrisüsteem on Venemaa elektrisüsteemiga ühendatud kolme 330 kV ülekandeliiniga. Lisaks on Eesti ühendatud Lätiga kolme 330 kV õhuliiniga ja Soomega kahe alalisvooluühendusega. Joonisel 1.1 on näha, milline osa võrgust kuulub põhivõrguettevõttele Elering AS.



\*Eestis tegutseb üle 30 jaotusvõrgu, kellest suuremad on Elektrilevi, Imatra Elekter ja VKG Elektrivõrgud.

Joonis 1.1 Elering AS-ile kuuluv elektrivõrgu osa [6]

Eesti elektrisüsteem liigub kiiresti taastuvenergia lahenduste suunas, mille tulemusena nihkuvad tootmisüksused Ida-Eestist Lääne-Eesti suunas. See areng on tingitud sellest, et Eestis on valdavalt läänetuuled, mistõttu on Lääne-Eestis paremad tuulealad. Lisaks

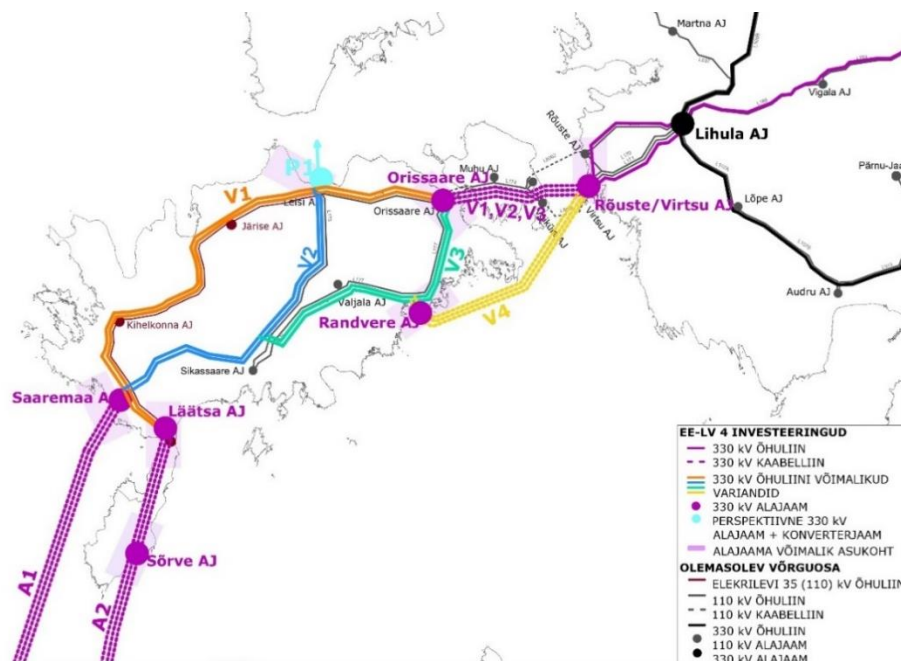
võiksid tulevikus potentsiaalselt asuda meretuuleelektrijaamad Saaremaa rannikul ja Liivi lahes. Oluline on märkida, et omaniku ootuste kohaselt on kavas rajada Saaremaale 330 kV ülekandevõrk. Lisaks taastuenergia suurele kasutuselevõtule toimub Balti riikide desünkroniseerimine Venemaa sagedusalast. Seetõttu on oluline luua uusi riikidevahelisi ühendusi, mis tugevdaksid Eesti elektrivõrku. Allika [1] kohaselt avab Saaremaa 330 kV võrgu loomine võimalused täiendavateks ühendusteks nii Lätiga kui ka tulevikus võimalike ühenduste loomiseks Saksamaaga. Samuti tuuakse välja, et uut ühendust Lätiga, mis võimaldaks suurendada riikidevahelist ülekandevõimsust, on kõige mõistlikum ehitada Saaremaa kaudu.

Saaremaa 330 kV ülekandevõrgu rajamine on Elering AS-i jaoks riigi poolt suunatud strateegiline ülesanne, mille jaoks on algatatud riigi eriplaneering. Riigi eriplaneering on loodud Eesti-Läti neljanda ühenduse rajamiseks, mille üheks osaks on Saaremaa 330 kV elektrivõrgu loomine. Eriplaneeringu eesmärk on uurida välja tingimused ja võimalused Saaremaa 330 kV elektrivõrgu loomiseks. Käesolev lahendus aitaks kaasa taastuenergia eesmärkide saavutamisele, kuna valminud võrku oleks võimalik tulevikus ühendada meretuuleelektrijaamad, mis omakorda aitab kaasa kliimaneutraalsuse eesmärkide täitmisele. [7]

## **2.3 Saaremaa võrgu tugevdamise vajadus ja alternatiivid**

2020. aastal sõlmisid Eesti ja Läti majandusministrid vastastikuse mõistmise kokkuleppe eesmärgiga koostöös arendada meretuuleelektrijaamu [8]. Elering AS ja AST (Augstsprieguma tikls - Läti põhivõrguettevõtte) sõlmisid omavahel 2021. aastal koostöökokkuleppe eesmärgiga analüüsida täiendavaid lahendusi 700 - 1000 MW ülekandevõimsuse rajamiseks [1]. Sellele järgnevalt sõlmiti 2023. aasta oktoobris ettevõtetevaheline kokkulepe [9], mille eesmärgiks on leppida kokku projekti elluviimise ühistes kavatsustes. Vastavalt Elering AS 2023. aasta „Eesti varustuskindluse aruanne“ [1] dokumendile läbi viidud eeluuringutega on kindlaks tehtud, et parim võimalus uue täiendava ühenduse loomiseks, kuhu saab liita ka meretuulevõimsusi, on Eestis läänerannikult suunaga Läti läänerannikule. Selleks, et selline täiendav ühendus luua, on vaja esialgu rajada Saaremaale ülekandevõrk algusega Lihulast. Parimate eelduste kohaselt võiks uus ühendus koos Saaremaa ülekandevõrguga olla valmis aastaks 2033, kuid esmane investeerimisotsus tehakse

aastal 2027 peale riigi eriplaneeringu lõppemist. Joonisel 1.2 on välja toodud Elering AS-i poolt pakutud Saaremaa ülekandevõrgu võimalikud alternatiivid.



Joonis 1.2 Saaremaa ülekandevõrgu võimalikud alternatiivid varustuskindluse aruandes [1]

Vastavalt allikale [3], algatas 2024. aasta veebruaris Vabariigi Valitsus Eesti – Läti neljanda ühenduse riigi eriplaneeringu (REP) ning keskkonnamõju strateegilise hindamise (KSH). Selle eesmärgiks on planeerida täiendava ühenduse Eestis paiknev osa Paide linnast Sõrve poolsaareni. Uus ühendus koos loodava Saaremaa põhivõrguga suurendab Eesti varustuskindlust ja julgeolekut ning annab võimaluse suuremal hulgal taastuvenergia liitmiseks võrku. Samuti aitab projekt kaasa kliimaneutraalsuse eesmärkide täitmisele. Joonisel 1.3 saab tutvuda REP planeeringualaga, mille suurus on ligi 6 314 km<sup>2</sup>.

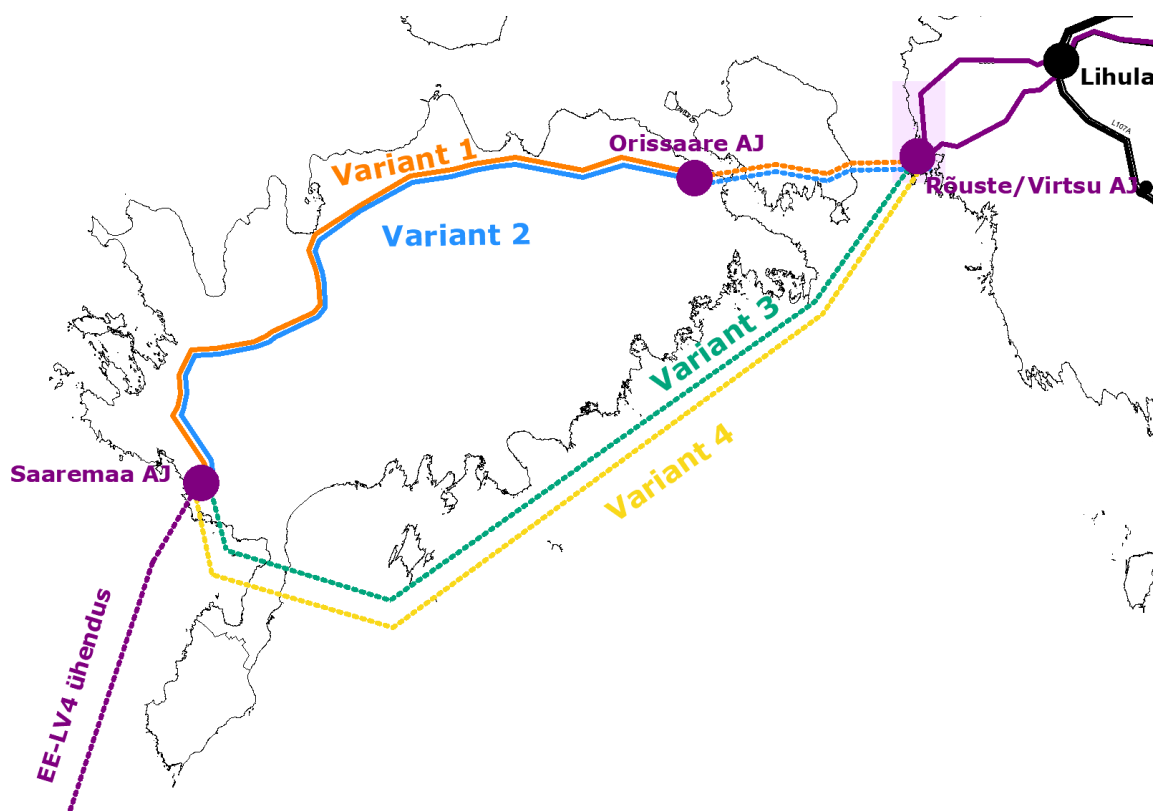


Joonis 1.3 Vabariigi Valitsuse algatatud REP planeeringuala [3]

Tulenevalt Elering AS varustuskindluse aruandes välja toodud alternatiividest, riigi eriplaneeringust ning võttes arvesse Elering AS-i sisendit, modelleeritakse ja teostatakse majanduslik analüüs järgnevatele variantidele:

- Variant 1: ülekandevõrk Lihulast Saaremaa alajaamani, liikudes läbi Suure ja Väikese väina 330 kV kaablitega ja üle Saaremaa 330 kV õhuliiniga;
- Variant 2: ülekandevõrk Lihulast Saaremaa alajaamani, liikudes läbi Suure ja Väikese väina 220 kV kaablitega ja üle Saaremaa 220 kV õhuliiniga;
- Variant 3: ülekandevõrk Lihulast Saaremaa alajaamani, liikudes lõunast läbi Saaremaa rannikumere 330 kV kaablitega;
- Variant 4: ülekandevõrk Lihulast Saaremaa alajaamani, liikudes lõunast läbi Saaremaa rannikumere 220 kV kaablitega.

Joonisel 1.4 saab tutvuda eelpool mainitud variantidega, kus vastavalt joonisele 1.2 on lõputöös välja valitud esimese ja teise variandi liini trassikoridor, mis on hetkel ühtlasi Elektrilevi OÜ 35 kV liini trassikoridor. Ruumilise planeerimise optimeerimiseks on ette nähtud olemasolevate trassikoridoride kasutamine maksimaalses ulatuses. Juba väljakujunenud kitsenduse laiendamine omab suure tõenäosusega väiksemat keskkondlikku ja ühiskonnamõju. Antud valik on vaid üks võimalik trassikoridori alternatiive ja lõputöös on oluline hinnata ülekandevõrgu tehnilist ning majanduslikku lahendust, mitte valida kindlat trassikoridori.



Joonis 1.4 Lõputöös käsitletavat Saaremaa ülekandevõrgu võimalikud alternatiivid



## **3 ELEKTRIVÕRGU MODELLEERIMISE JA ANALÜÜSI PÕHIMÕTTED**

Järgnevas peatükis kirjeldatakse modelleerimisel kasutatavat tarkvara, modelleerimise metoodikat ja lähteandmeid. Samuti kirjeldatakse, mis on N-1 olukord ja miks on vajalik sellega arvestada.

### **3.1 PSS/E tarkvara kirjeldus ja metoodika**

Võrguarvutustarkvara PSS/E (*Power System Simulator for Engineering*) on mõeldud elektrisüsteemide modelleerimiseks ja analüüsimiseks [10]. Tarkvaral on põhjalikud modelleerimisvõimalused, mis võimaldavad läbi viia keerulisi analüüse, et tagada parem süsteemi töökindlus nii elektrivõrgu püsi- kui ka siirdetalitluses. Sellega on võimalik modelleerida võrku ning analüüsida võrgualternatiive ja samuti on võimalik siduda seda Pythoni programmeerimiskeelega. Lõputöö raames kasutatakse PSS/E tarkvara püsitalitlusarvutuse moodulit.

PSS/E tarkvara hõlmab endas viite arvutusmeetodit: fikseeritud jakobiaaniga Newton-Raphsoni meetod, täielik Newton-Raphsoni meetod, lõhestatud Newton-Raphsoni meetod, Gauss-Seideli meetod ja modifitseeritud Gauss-Seideli meetod. [10] Kasutades Newton-Raphsoni meetodit, lahendatakse mittelineaarset võrrandisüsteemi sõlmepingevõrrandite abil selleks, et leida elektrivõrgu talitluse pingemoodulid ja pingenukade väärtused. Lahendust lähendatakse järk-järgult, lähtudes eelnevast lahendusest ja süsteemi tasakaalu võrranditest. Gauss-Seideli meetodiga leitakse aga tulemus voolude balansi kujul sõlmepingevõrrandite süsteemi ja sõlmevoolude avaldiste lahendamisel. Meetod on lineaarne iteratiivne meetod, mis lahendab süsteemi tasakaaluvõrrandeid järjestikku. Igas iteratsioonis arvutatakse iga muutuja uus väärtus, lähtudes eelmise iteratsiooni tulemustest. Newton-Raphsoni meetodil koonduvad tulemused kiiremini, selle lahenduskindlus on kõrgem ja selle koonduvuskiirus ei sõltu võrgu mõõtmetest. Gauss-Seideli eeliseks on aga see, et ühel iteratsioonil tuleb teha vähem arvutusi, sellel on lihtne algoritm ja sellega on võimalik jälgida mittekoonduvuse põhjuseid. [11] Saaremaa ülekandevõrgu simuleerimiseks ja arvutuste teostamiseks on kasutatud tarkvara PSS/E versiooni 35 ning lahendustel on kasutatud täielikku Newton-Raphsoni meetodit. Pikemalt ja täpsemini on arvutuspehõimõtted ning nende eelised ja puudused välja toodud Lisas 1.

## 3.2 Elektrisüsteemi varustuskindlus

Elektrisüsteemi toimimise võrgueeskirja Vabariigi Valitsuse määruse [12] peatükis 2 „Elektrisüsteemi varustuskindlus“ paragrahvis 3 on välja toodud nõuded varustuskindlusele. Seal on kirjas, et elektrisüsteemi ühtsus ja töövõime peavad häiringu korral säilima, kusjuures tähtsaim on säilitada süsteemi kui terviku varustuskindlus. Lisaks on määruuses sätestatud: „Elektrisüsteemi talitlust ja arengut kavandades tuleb arvestada, et sagedamini esinevad häiringud N-1 ja N-1-1 ei põhjustaks pinge või sageduse või muude suuruste kõrvalekaldeid komisjoni määrusega (EL) 2017/1485 sätestatud piiridest, ulatuslikke toitekatkestusi või süsteemi stabiilsuse kadumist.“ Samuti on öeldud, et häiringu ajal ja häiringu tõttu tekkinud olukorras võivad elektrisüsteem ja selle osad talitleda tavalisest väiksema töö- ja varustuskindlusega, kui see on vajalik häiringu lokaliseerimiseks, kõrvaldamiseks või tarbijate elektrivarustuse taastamiseks.

Euroopa Komisjoni määrus (EL) 2017/1485 [13] ütleb, et N-1-kriteeriumi kohaselt peavad need elemendid, mis jäävad talitlema põhivõrguettevõtja juhtimispiirkonnas pärast häiringu esinemist, suutma kohaneda uue olukorraga, ilma et rikutaks talitluskindluse piire. Lõputöös on võetud eelduseks, et N-1 kriteerium tagatakse Läti kaudu, mis tähendab, et kui Eesti võrgus tekib lühis ja Saaremaa ning Mandri-Eesti vahel ühendus katkeb, kandub võimsus täielikult üle Läti-suunalisele ühendusele. Kui Läti poolt pole aga võimalik N-1 olukorda tagada, siis selle tagamiseks oleks vaja ehitada sarnane paralleelahel. Sellist juhtumit selles lõputöös ei käsitleta.

Lisaks N-1 kriteeriumile tuleb arvestada elektrisüsteemis ka lubatud suurima ühikvõimsuse väljalangemisega seoses sageduse stabiilsusega. Baltimaade saarestumise korral tuleb kõik süsteemiga ühendatud ühikvõimsused piirata 400 MW peale, et süsteemi stabiilsus oleks tagatud. Ühikvõimsuste näol on tegemist summaarse võimsusega, mis võib süsteemist eralduda N-1 rikke tagajärjel. Tegemist võib olla näiteks mitmest tootmisüksusest koosneva elektrijaamaga, mis on ühendatud võrguga ühe liini kaudu.

## 3.3 Modelleerimise lähteandmed

Lõputöös on komponentide valikul arvestatud, et lahendused oleksid tehniliselt teostatavad ja majanduslikult mõistlikud. Selleks, et suurema võimsuse korral võrgus

voolu vähendada, tuleb tõsta pinget. Saaremaa ülekandevõrk koosneb nii õhu- kui ka kaabelliinidest. Selleks, et saaks üle kanda vähemalt 1000 MW koormust, on vaja 330 kV ühenduse korral kasutada vähemalt kahte kaabelliini ja 220 kV ühenduse korral vähemalt kolme kaabelliini. Kaablid paigutatakse üksteise kõrvale, kus maismaal on vastavalt allikale [14] kaitsevöönd üks meeter ning meres kaitsevöönd 100 meetrit. Standardina kasutatakse Eesti ülekandevõrgus 110 kV või 330 kV liine, sõltuvalt transporditava elektrienergia vahemaast. Eesti – Läti neljanda ühenduse pingestate võib potentsiaalselt olla 220 kV, mistõttu on lõputöös modelleeritud Saaremaa ülekandevõrk ka 220 kV võrguna. Liinide planeerimisel arvestatakse trassikoridoride laiusga: üks 330 kV või 220 kV elektriõhuliin ühes koridoris – koridori laius kokku 100 m, millest 20 meetrit on nihutamise ruum. Tabelites 2.2 ja 2.3 on välja toodud 330 kV ja 220 kV võrkude modelleerimise lähteandmed.

Lõputöös on kasutatud õhuliini ACSR 402/52 [15] parameetreid nii 330 kV võrgu kui ka 220 kV võrgu korral. Tootjalehel on välja toodud alalisvoolu aktiivtakistus  $R_1 = 0,0719 \Omega/\text{km}$ , millest arvutatakse 3x400 liini aktiivtakistus:

$$R_2 = R_1 \cdot \frac{1}{3}, \quad (2.1)$$

kus  $R_2$  – alalisvoolu aktiivtakistus kolmefaasilisel liinil,  $\Omega/\text{km}$ ,  
 $R_1$  – alalisvoolu aktiivtakistus ühefaasilisel liinil,  $\Omega/\text{km}$ .

$$R_2 = 0,0719 \cdot \frac{1}{3} = 0,0240 \Omega/\text{km},$$

Reaktiivtakistus liinil leitakse järgnevalt [11]:

$$X = 0,144 \log \frac{D_k}{r_j} + 0,0157, \quad (2.2)$$

kus  $X$  – reaktiivtakistus,  $\Omega/\text{km}$ ,  
 $r_j$  – juhtme raadius, m,  
 $D_k$  – faasidevaheline keskmine geomeetiline kaugus, m.

$$X = 0,144 \log \frac{\sqrt[3]{10 \cdot 10 \cdot 20}}{\sqrt[3]{0,4^2 \cdot 0,01385}} + \frac{0,0157}{3} = 0,2783 \Omega/\text{km},$$

PSS/E-s modelleerides tuleb sisestada liini mahtuvus, mis leitakse järgnevalt [11]:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D_k}{r_j}}, \quad (2.3)$$

kus  $C$  – liini mahtuvus, F,  
 $\epsilon_0$  – vaakumi dielektriline läbitavus, F/m,  
 $r_j$  – juhtme raadius, m,  
 $D_k$  – faasidevaheline keskmine geomeetiline kaugus, m.

Õhuliinide mahtuvuse leidmine:

$$C = \frac{0,0556}{\ln \frac{\sqrt[3]{10 \cdot 10 \cdot 20}}{\sqrt[3]{0,4^2 \cdot 0,01385} \cdot e^{0,25}}} = 0,0120 \mu\text{F},$$

330 kV ja 220 kV võrkudes kasutatakse 800 mm<sup>2</sup> läbimõõduga kaableid. Kaabelliinide reaktiivtakistus  $X$  on arvutatud vastavalt kaabli andmelehes toodud induktiivsuse väärtusele järgnevalt [16]:

$$X = \omega L = 2\pi fL, \quad (2.4)$$

kus  $X$  – liini reaktiivtakistus,  $\Omega/\text{km}$ ,  
 $f$  – sagedus, Hz,  
 $L$  – induktiivsus, H.

330 kV kaabelliini reaktiivtakistus:

$$X = 2\pi \cdot 50 \cdot 0,427 \cdot 10^{-3} = 0,134 \Omega/\text{km},$$

220 kV kaabelliini reaktiivtakistus:

$$X = 2\pi \cdot 50 \cdot 0,397 \cdot 10^{-3} = 0,125 \Omega/\text{km},$$

Tabel 2.2 330 kV võrgu modelleerimise parameetrid

330 kV võrk	Aktiivtakistus $R$ , $\Omega/\text{km}$	Reaktiivtakistus $X$ , $\Omega/\text{km}$	Mahtuvus $C$ , $\mu\text{F}/\text{km}$	Rate 80 °C juures, MVA	Juhtmete tüüp ja ristlõige, mm <sup>2</sup>	Lubatud töövool, A
Õhuliin	0,0240	0,2783	0,0120	1788	ACSR 3x400	3128
Kaabelliin	0,0221	0,1340	0,1380	580	XLPE 800	1016

Tabel 2.3 220 kV võrgu modelleerimise parameetrid

220 kV võrk	Aktiivtakistus $R$ , $\Omega/\text{km}$	Reaktiivtakistus $X$ , $\Omega/\text{km}$	Mahtuvus $C$ , $\mu\text{F}/\text{km}$	Rate 80 °C juures, MVA	Juhtmete tüüp ja ristlõige, mm <sup>2</sup>	Lubatud töövool, A
Õhuliin	0,0240	0,2783	0,0120	1788	ACSR 3x400	3128
Kaabelliin	0,0221	0,1250	0,1680	588	XLPE 800	1028

Modelleerimisel on kasutatud ABB trafot järgmiste parameetritega:

- Tüüp TCA345TR;
- Näivvõimsus 380 MVA;
- Ülempinge 330 kV;
- $U_k$  12% (15. aste);
- Alampinge 220 kV;
- Tühijooksukaod 146,9 kW;
- Lühiskaod 680 kW.

Töös on kasutatud 125 Mvar reaktoreid, mille maksimaalne reaktiivtakistus on  $X_L = 2\,620,9 \, \Omega$  ehk induktiivsus on  $L = 8,34 \, \text{H}$ . Tegemist on sujuvreguleerimisega reaktoritega, mis tagavad paindlikuma reguleerimisvõime. Nende reaktorite fikseeritud osa on 50 Mvar ning 50 - 125 Mvar osa on võimalik kasutada astmetena. Selline reaktor tagab, et lülitamisega ei tekiks liiga suur ja kiire pinge muutus.

### 3.4 Õhu- ja kaabelliinide poolt genereeritav reaktiivvõimsus

Selleks, et elektrienergiat üle kanda ja tarbida, on vaja magnet- ja elektrivälja, mistõttu on reaktiivvõimsus oluline. Samas aga pole mõistlik reaktiivvõimsust suurel mahul võrgus edastada, sest tekivad võrgukaod ja pingemuutused. Allika [17] põhjal on kaabelliinidel reaktiivvõimsuse kompenseerimise vajadus tunduvalt suurem kui õhuliinidel, kuna neil on suur mahtuvus. Kaablitel on faasidevahelised kaugused väikesed, mistõttu on nende induktiivtakistus väike ja mahtuvusjuhtivus suur. Reaktiivvõimsust tuleb kompenseerida, et suurendada võrgu läbilaskevõimet, tagada parem pinge kvaliteet ning suurem elektrisüsteemi talitluskindlus ja vähendada võrgus energiakadusid. Genereeritav reaktiivvõimsus avaldub järgmiselt:

$$Q_c = b \cdot l \cdot U^2 = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot U^2, \quad (2.5)$$

kus  $Q_c$  - genereeritav reaktiivvõimsus, var,  
 $b$  - mahtuvusjuhtivus, S/km,  
 $l$  - liini pikkus, km,  
 $U$  - liini pinge, V,  
 $f$  - sagedus, Hz,  
 $C$  - liini mahtuvus, F.

Järgnevalt, tabelis 2.4, on esitatud genereeritav reaktiivvõimsus nimipingel ja reaktiivvõimsus maksimaalsel lubatud tööpingel 330 kV ning 220 kV õhu- ja kaabelliinidel.

Tabel 2.4 Õhuliinide ja kaablite genereeritavad reaktiivvõimsused nimipingel ja maksimaalsel lubatud tööpingel

	330 kV Õhuliin	220 kV Õhuliin	330 kV Kaabelliin	220 kV Kaabelliin
$Q_{cnr}$ Mvar/km	4,1	1,8	4,7	2,5
$Q_{cmax}$ Mvar/km	4,5	2,0	5,2	2,7

## **4 SAAREMAA ÜLEKANDEVÕRGU ALTERNATIIVIDE TEHNILINE JA MAJANDUSLIK ANALÜÜS**

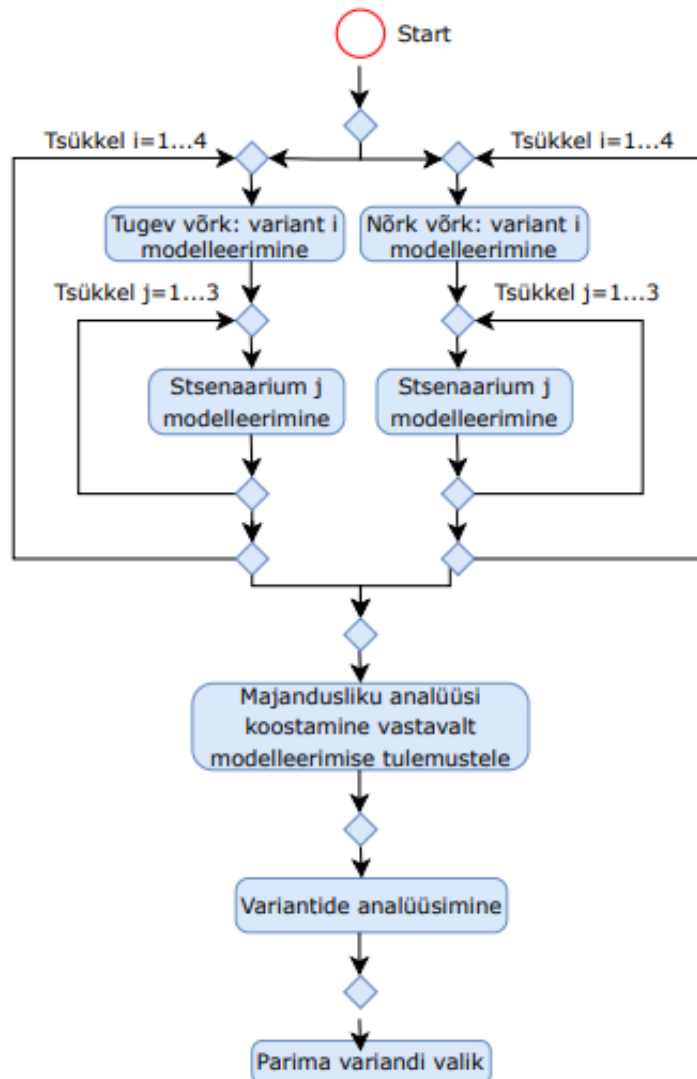
Järgnevas peatükis käsitletakse modelleerimise metoodikat ja selle tulemusi kõikide variantide puhul. Lisaks sellele näidatakse siin peatükis ka esmase investeeringu majanduslikku analüüsi ja tehakse järeldus variantide sobivuse kohta.

### **4.1 Analüüsi metoodika**

Käesoleva lõputöö tehniline analüüs on tehtud tarkvaraga PSS/E. Modelleerimise parameetrid, tarkvara kirjeldus ja arvutusmetoodika on välja toodud lõputöö peatükis 2. Modelleeritud on nelja erinevat varianti Saaremaa ülekandevõrgu loomiseks (vt joonis 1.4):

- Variant 1: ülekandevõrk Lihulast Saaremaa alajaamani, liikudes läbi Suure ja Väikese väina 330 kV kaablitega ja üle Saaremaa 330 kV õhuliiniga;
- Variant 2: ülekandevõrk Lihulast Saaremaa alajaamani, liikudes läbi Suure ja Väikese väina 220 kV kaablitega ja üle Saaremaa 220 kV õhuliiniga;
- Variant 3: ülekandevõrk Lihulast Saaremaa alajaamani, liikudes lõunast läbi Saaremaa rannikumere 330 kV kaablitega;
- Variant 4: ülekandevõrk Lihulast Saaremaa alajaamani, liikudes lõunast läbi Saaremaa rannikumere 220 kV kaablitega.

Tulemuste saamiseks modelleeritakse kõiki variante läbi kolme erineva stsenaariumiga, tugeva ja nõrga võrguga (sellest täpsemalt järgnevas peatükis 4.2 Mudelite tulemused). Modelleerimisel Saaremaa enda elektrienergia tarbimisvajadusega ei arvestata. Igal variandil ja stsenaariumil arvestatakse N-1 kriteeriumiga. Näiteks arvestatakse, et mistahes alajaamas ühe reaktori või trafo välja- või sisselülitamine ei põhjustaks kogu süsteemis liigset pingekõikumist. Samuti on arvestatud ka liinide tööst väljumisega ja kuna lõputöös on Saaremaa ülekandevõrk modelleeritud üheahelalisena, arvestatakse, et N-1 kriteerium tagatakse Läti poolt. Peale kõikide variantide modelleerimist luuakse neile ka esmase investeeringu majanduslik analüüs, arvestades seejuures modelleerimistulemusi. Peale seda analüüsitakse kõiki tulemusi ja variante, võrreldakse neid omavahel ning esitatakse kokkuvõttev analüüs, arvestades lõputöös püstitatud hüpoteesi. Metoodikat kirjeldav diagramm on esitatud joonisel 3.1.



Joonis 4.1 Lõputöö metoodikat seletav diagramm, millega määratakse Saaremaa ülekandevõrgu parim alternatiiv, modelleerides nelja varianti tugeva ja nõrga võrguga kolmel stsenaariumil ning luues neile esmane investeeringu majanduslik analüüs.

## 4.2 Analüüsi tulemused

Nelja erineva variandi paremaks hindamiseks koostati igale variandile omakorda kolm stsenaariumit. Stsenaariumid on igal variandil samad:

1. Stsenaarium 1: Saaremaa alajaamas toodetakse 1000 MW, kogu toodetud elektrienergia tarbitakse Eesti suunal;
2. Stsenaarium 2: Saaremaa alajaamas toodetakse 1000 MW, kogu toodetud elektrienergia tarbitakse Läti suunal;
3. Stsenaarium 3: Saaremaa alajaamas toodetakse 1000 MW, toodetud elektrienergiast 500 MW tarbitakse Eesti suunal ja teine 500 MW tarbitakse Läti pool.

PSS/E arvutustarkvara mudelis on modelleeritud vaid Saaremaa ülekandevõrgu osa ja Eesti – Läti neljas ühendus. Eesti võrk on toodud summaarsete aktiiv- ja reaktiivtakistustena Lihula alajaamas, Läti võrk on toodud sarnaselt aktiiv- ja reaktiivtakistustena Läti alajaamas. Tulemuste paremaks ja täpsemaks analüüsiks on modelleeritud ühendust nii tugeva kui ka nõrga võrguga. Nõrk võrk tähendab seda, et N-1 olukorras on välja lülitatud Lihula - Sindi 330 kV õhuliin L503, samuti on välja lülitatud üks kahest trafost Lihula alajaamas. Tabelis 3.1 on andmed esitatud tugeva ja nõrga võrgu parameetritega.

Tabel 3.1 Tugeva ja nõrga võrgu arvutusparameetrid

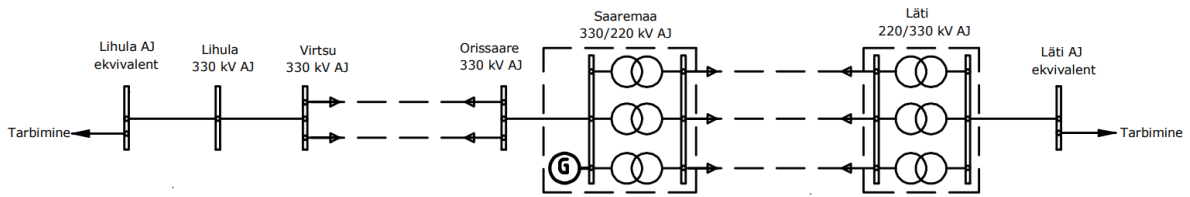
	Lihula $R, \Omega$	Lihula $X, \Omega$	Läti $R, \Omega$	Läti $X, \Omega$
<b>Tugev võrk</b>	2,23760	25,6602	4,15247	29,0250
<b>Nõrk võrk</b>	3,88872	43,8506	4,15247	29,0250

Euroopa Komisjoni määrusega nr 2016/1447 kehtestatud võrgueeskirja kohaselt võib 110 kV – 300 kV võrkudes hoida pinget kuni 1,118 korda kõrgemal nimipingest, kuid 300 kV – 400 kV võrkudes nimipingest kuni 1,097 korda kõrgemal pingel. Lõputöö hoitakse modelleerimisel 330 kV võrgus pinget kuni 1,07 korda kõrgemal nimipingest ehk 353,1 kV juures. 220 kV võrgus hoitakse võrgupinge aga nimipingest kuni 1,10 korda kõrgemana, seega kuni 242 kV juures. Sellised vahemikud on valitud, et võrku jääks ka teatud ohutusmarginaal. 220 kV võrgus on seadmete lubatud kestevpinge kõrgem ja seega saab selles võrgus kasutada nimipingest 1,10 korda kõrgemat pinget. Võrgu talitlemine maksimaalsele püsivalt lubatud pingele lähemal ehk kõrgemal pingel võimaldab vähendada elektrivõrkudes kadusid ja võimaldab tagada ka suuremad läbilaskevõimed ning suurema stabiilsuse varu. Tugeva ja nõrga võrgu modelleerimisel on eesmärgiks tagada igas alajaamas sama pingetase. Täpsemad tulemused on esitatud tabelite kujul Lisas 2 ja kõikide stsenaariumite PSS/E mudelid tulemustega on kujutatud Lisas 3.

#### 4.2.1 Variant 1

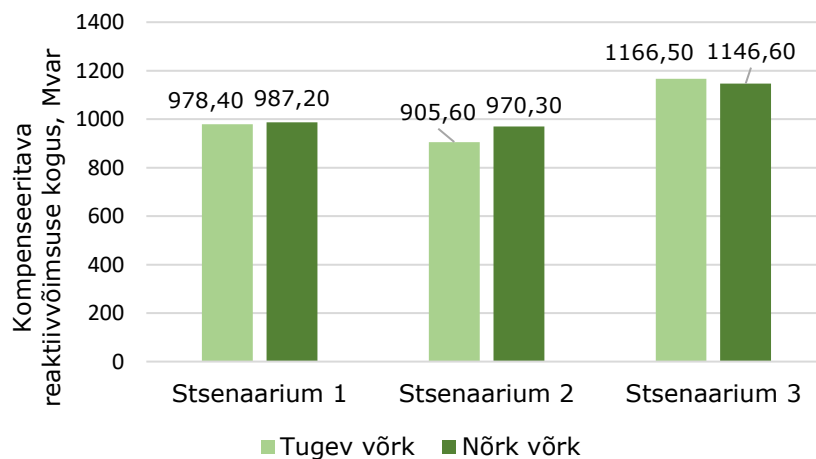
Variant üks koosneb 330 kV õhuliinidest, kahest 330 kV kaabelliinist, alajaamadest, kuuest trafost (kolm trafot Saaremaa alajaamas ja kolm trafot Läti alajaamas), kolmest Läti suunduvast 220 kV kaabelliinist, kahesuunalisest tarbimisest ja ühest tootjast. Joonis 3.2 illustreerib käsitletava variandi ühejooneskeemi. Esimese variandi kirjeldusega saab tutvuda eelpool, peatükis 4.1, kus on räägitud analüüsi metoodikast.





Joonis 4.2 Esimese variandi ühejooneskeem

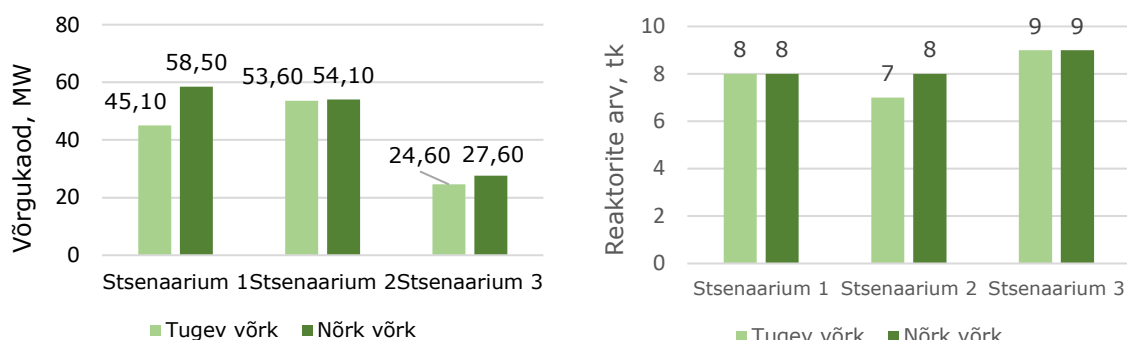
Kõige suurem reaktiivvõimsuse kompenseerimise vajadus tekib kolmanda stsenaariumiga, kus Saaremaa alajaamas toodetavast 1000 MW-st liigub pool Eestisse ja teine pool Läti suunas. Kolmandal stsenaariumil tugeva võrgu korral tuleb reaktiivvõimsust kompenseerida kokku 1166,50 Mvar. Samas aga kolmanda stsenaariumi nõrga võrgu korral tuleb võrgus tekkivat reaktiivvõimsust kompenseerida 1146,60 Mvar jagu. Kõige vähem tuleb reaktiivvõimsust kompenseerida stsenaariumil kaks, kus tugevas võrgus tekib reaktiivvõimsust 905,60 Mvar ja nõrgas võrgus 970,30 Mvar. Stsenaariumis üks tekib reaktiivi tugevas võrgus 978,40 Mvar ja nõrgas võrgus 987,20 Mvar. Tulemused kõikide esimese variandi reaktiivvõimsuse kompenseerimise stsenaariumite kohta on näidatud joonisel 3.3.



Joonis 4.3 Reaktiivvõimsuse kompenseerimise vajadus kolme erineva stsenaariumiga variandil 1

Arvestades N-1 kriteeriumit, tuleb selle variandiga ülekandevõrku kokku lisada vähemalt üheksa reaktorit reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks, mis leiti tugeva ja nõrga võrgu kolmanda stsenaariumi arvutusest. Stsenaariumil üks mõlema võrgu puhul ja stsenaariumil kaks nõrgas võrgus on vaja kaheksat reaktorit ning teisel stsenaariumil tugevas võrgus on vaja seitset reaktorit. Võrgukadu on suurim esimese stsenaariumi nõrga võrgu korral, kus kaduma läheb 58,50 MW toodetud elektrienergiast, kuid samal stsenaariumil tugevas võrgus läheb võrgukadudeks 45,1 MW. Teisel stsenaariumil läheb kaduma tugevas võrgus 53,60 MW ja nõrgas võrgus 54,1 MW ning kolmandal stsenaariumil on võrgukadu väikseim – tugevas võrgus 24,60 MW ja nõrgas võrgus

27,60 MW. Joonisel 3.4 saab tutvuda kõikide stsenaariumite võrgukadude ja võrgus olevate reaktorite arvuga.



Joonis 4.4 Kaod (vasakul) ja reaktorite arv (paremal) võrgus kolme erineva stsenaariumiga variandil 1

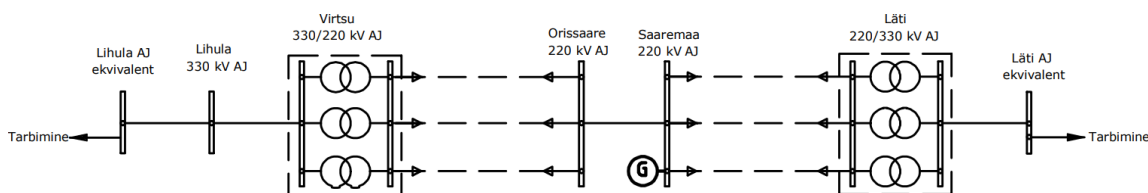
Juhul, kui välja lülitub üks Virtsu – Orissaare kaablitest ning Eesti suunal tarbitakse 1000 MW, tekib teisele kaablile tugevas võrgus koormus 168 % ja ülekoormust on 400 MVA, nõrgas võrgus on koormus 166 % ning ülekoormus 388 MVA. Selleks, et ülekoormust vältida, kui üks kaablitest pole töökorras, peab Läti osa tarbima vähemalt 450 MW. Võrku on lisatud kokku kuus trafot ning kui välja peaks lülituma Saaremaa alajaamas üks trafodest ja kogu 1000 MW tarbimine on suunatud Läti suunas, tekib teisel kahel trafol koormus nii tugevas kui ka nõrgas võrgus 124 %. Seega tekib ülekoormust kahel trafol kokku 182 MVA ning selle vältimiseks peaks Eesti pool tarbima vähemalt 200 MW. Sama situatsioon tekib tugevas võrgus ka siis, kui välja on lülitatud Läti alajaama üks trafodest, kuid nõrgas võrgus on Läti alajaamas sellises olukorras koormus 146 % ja ülekoormus 175 MVA (vt tabel 4.1).

Tabel 4.1 N-1 analüüs esimese variandi nõrga ja tugeva võrguga

Välja lülitatud element	Kontrollitav element	Koormus, %	Ülekoormus, MVA	Märkus
<b>Variant 1 TUGEV</b>				
Virtsu AJ – Orissaare AJ kaabel 1	Virtsu AJ – Orissaare AJ kaabel 2	168	399,80	
Saaremaa AJ trafo 1	Saaremaa AJ trafo 2 ja 3	124*	182,40	*ühe trafo koormus
Läti AJ trafo 1	Läti trafo 2 ja 3	124*	182,40	*ühe trafo koormus
<b>Variant 1 NÕRK</b>				
Virtsu AJ - Orissaare kaabel 1	Virtsu AJ – Orissaare AJ kaabel 2	166	388,10	
Saaremaa trafo 1	Saaremaa AJ trafo 2 ja 3	124*	182,40	*ühe trafo koormus
Läti AJ trafo 1	Läti AJ trafo 2 ja 3	123*	174,80	*ühe trafo koormus

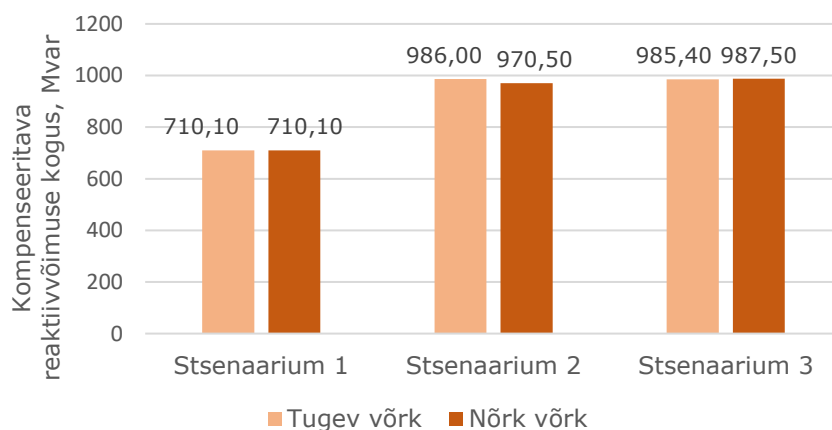
## 4.2.2 Variant 2

Teise variandi koosseisu kuuluvad 330 kV ja 220 kV õhuliinid, alajaamad, kuus 220 kV kaabelliini (Mandri-Eestist Saaremaale ja Lätti suunduvad kaabelliinid), kuus trafot (kolm trafot Virtsu alajaamas ning kolm Lätti alajaamas), kaks tarbimissuunda ja üks tootja. Selle variandi ühejooneskeemiga on võimalik tutvuda joonisel 3.5. Teise variandi kirjeldusega saab tutvuda eelpool, peatükis 4.1.



Joonis 4.5 Teise variandi ühejooneskeem

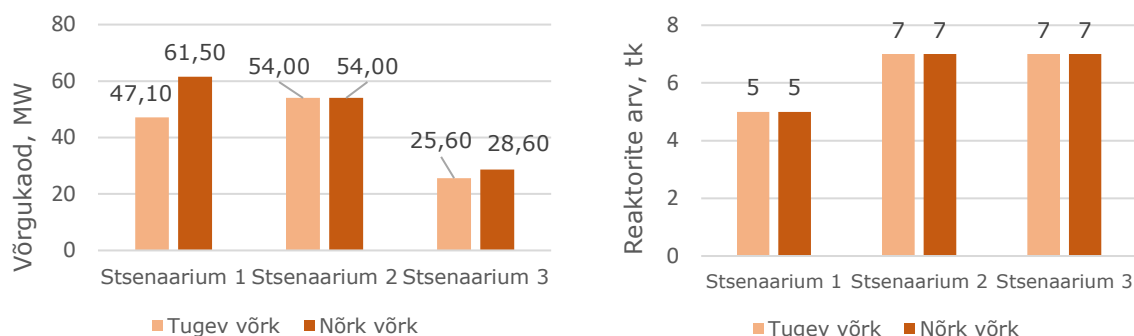
Kõige rohkem on vaja reaktiivvõimsust kompenseerida kolmandal stsenaariumil nagu ka esimese variandi puhul. Kolmandal stsenaariumil on vajalik kogu Eesti osa peale kokku kompenseerida nõrga võrguga 987,50 Mvar reaktiivvõimsust ning tugeva võrguga 985,40 Mvar reaktiivvõimsust. Samuti tuleb teisel stsenaariumil reaktiivi kompenseerida sarnases koguses – tugevas võrgus 986,00 Mvar ja nõrgas võrgus 970,50 Mvar. Esimesel stsenaariumil tuleb nii tugevas kui ka nõrgas võrgus reaktiivvõimsust kompenseerida 710,10 Mvar. Joonisel 3.6 saab näha kõikide stsenaariumite reaktiivvõimsuse kompenseerimise vajadust.



Joonis 4.6 Reaktiivvõimsuse kompenseerimise vajadus kolme erineva stsenaariumiga variandil 2

Teises variandis tuleb N-1 kriteeriumit arvestades ülekandevõrku lisada vähemalt seitse reaktorit reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks. Seitset reaktorit vajavad nii teine kui ka kolmas stsenaarium tugevas ja nõrgas võrgus. Esimesel stsenaariumil on vaja mõlemas võrgus viite reaktorit. Võrgukadu on ka sel variandil suurim esimese stsenaariumi nõrga võrgu korral, kus 61,50 MW toodetud elektrienergiast läheb võrgukadudeks, samas aga

tugevas võrgus kaob 47,1 MW. Teisel stsenaariumil läheb mõlema võrgu korral võrgus kaotsi 54,00 MW ning sarnaselt esimesele variandile on võrgukaod väikseimad kolmandal stsenaariumil – tugevas võrgus 25,60 MW ja nõrgas võrgus 28,60 MW (vt joonis 3.7).



Joonis 4.7 Kaod (vasakul) ja reaktorite arv (paremal) võrgus kolme erineva stsenaariumiga variandil 2

220 kV võrgus ühe kaabli välja lülitumine ülekoormust ei tekita ja pinged püsivad lubatud vahemikus (kuni 242 kV). Virtsu alajaamas avariolukorras, kui välja on lülitunud üks trafodest ja kogu 1000 MW tarbimine on suunatud Eesti suunas, on kahel ülejäänud trafol koormus tugevas võrgus 137 % ja nõrgas võrgus 127 % (ülekoormused vastavalt 281 MVA ja 205 MVA). Ülekoormuse vältimiseks peaks Läti poolel tarbima vähemalt 200 MW toodetud elektrienergiast. Läti alajaamas, nii tugevas kui ka nõrgas võrgus, kui kogu 1000 MW tarbitakse Lätis, tekib ühe trafo tööst väljumisel teisele kahele trafole koormus 126 % ja ülekoormus 198 MVA, mistõttu peaks Eestis tarbima vähemalt 250 MW elektrienergiat (vt tabel 4.2).

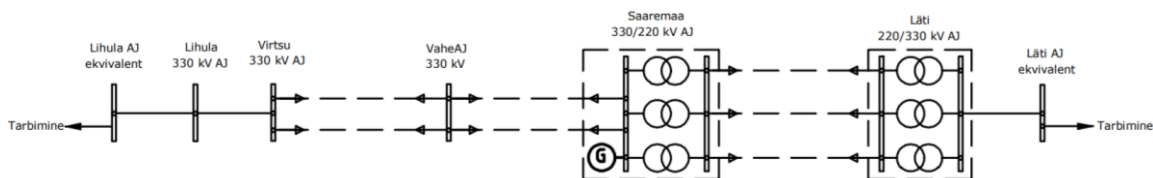
Tabel 4.2 N-1 analüüs teise variandi nõrga ja tugeva võrguga

Välja lülitatud element	Kontrollitav element	Koormus, %	Ülekoormus, MVA	Märkus
<b>Variant 2 TUGEV</b>				
Virtsu AJ trafo 1	Virtsu AJ trafo 2 ja 3	137*	281,20	*ühe trafo koormus
Läti AJ trafo 1	Läti AJ trafo 2 ja 3	126*	197,60	*ühe trafo koormus
<b>Variant 2 NÕRK</b>				
Virtsu AJ trafo 1	Virtsu trafo 2 ja 3	127*	205,20	*ühe trafo koormus
Läti AJ trafo 1	Läti trafo 2 ja 3	126*	197,60	*ühe trafo koormus

### 4.2.3 Variant 3

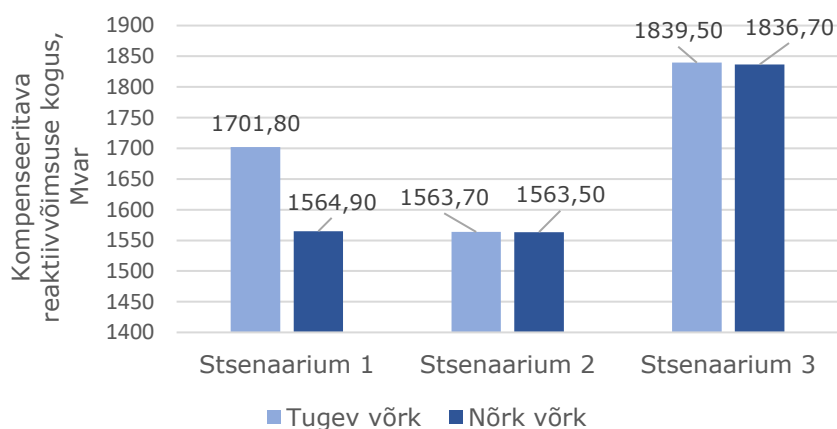
Kolmas variant koosneb 330 kV õhuliinidest, neljast 330 kV kaabelliinist, alajaamadest (lisaks vahepealne kompenseerimisalajaam), kuuest trafost (kolm trafot Saaremaa

alajaamas ning kolm Läti alajaamas), kolmest Lätti suunduvast 220 kV kaabelliinist, kahest tarbimissuunast ja ühest tootjast. Joonis 3.8 kujutab käesoleva variandi ühejooneskeemi. Kolmanda variandi kirjeldusega saab tutvuda eelpool, peatükis 4.1.



Joonis 4.8 Kolmanda variandi ühejooneskeem

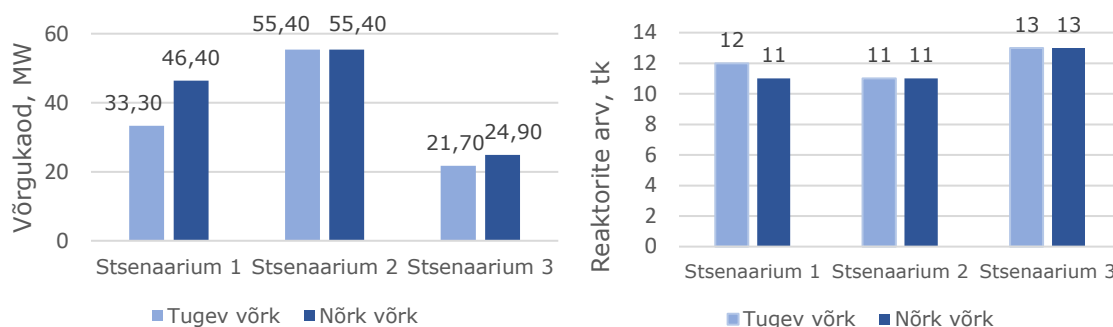
Kõige rohkem on vaja selleski variandis reaktiivvõimsust kompenseerida kolmandal stsenaariumil. Sellel stsenaariumil tuleb reaktiivi kompenseerida rohkeim aga tugeva võrgu korral, 1839,50 Mvar, nõrgas võrgus aga 1836,70 Mvar. Teise stsenaariumi reaktiivi kompenseerimise nõudlus on väikseim: tugevas võrgus 1563,70 Mvar ja nõrgas võrgus 1563,50 Mvar, kuid samuti on ka esimese stsenaariumi nõrga võrgu tulemus üpris sarnane, kus on vaja kompenseerida 1564,90 Mvar reaktiivi. Esimese stsenaariumi tugevas võrgus tuleb aga reaktiivi kompenseerida 1701,80 Mvar. Joonisel 3.9 saab tutvuda ka teiste stsenaariumite reaktiivvõimsuse kompenseerimise vajadustega.



Joonis 4.9 Reaktiivvõimsuse kompenseerimise vajadus kolme erineva stsenaariumiga variandil 3

Arvestades N-1 kriteeriumit, tuleb neljandas variandis lisada võrku vähemalt 13 reaktorit – selline tulemus on saadud kolmanda stsenaariumiga. Stsenaariumis kaks mõlema võrgu puhul ja stsenaariumis üks nõrgas võrgus on vaja lisada 11 reaktorit ning esimesel stsenaariumil tugevas võrgus on ülekandevõrgus vaja 12 reaktorit. Võrgukadu on sel variandil suurim aga teise stsenaariumi korral, kus toodetud elektrienergiast läheb võrgukadudeks 55,40 MW nii tugevas kui ka nõrgas võrgus. Vähim läheb jällegi kaduma kolmandal stsenaariumil, kus tugevas võrgus läheb võrgukadudeks 21,70 MW ja nõrgas võrgus 24,90 MW. Stsenaariumis üks tugevas võrgus läheb toodetud

elektrienergiast kaduma 33,30 MW ja nõrgas võrgus läheb kaduma 46,40 MW. Antud tulemustega saab tutvuda joonisel 3.10.



Joonis 4.10 Kaod (vasakul) ja reaktorite arv (paremal) võrgus kolme erineva stsenaariumiga variandil 3

Virtsu – Saaremaa kaabli väljalülitumisel, kui Eesti suunal tarbitakse 1000 MW, tekib teisele kaablile tugevas võrgus koormus 174 % ja ülekoormus 435 MVA, nõrgas võrgus koormus 182 % ning ülekoormus 482 MVA. Sellise olukorra vältimiseks peab Lätis tarbima vähemalt 500 MW. Tugevas võrgus, kui välja lülitub trafo Saaremaa alajaamas või Läti alajaamas, tekib kahele teisele trafodele koormus 133 % (ülekoormus 251 MVA). Selle vältimiseks peab 200 MW elektrienergiast suunama ka Eesti poolele. Nõrgas võrgus tekib samades alajaamades trafodele koormus 125 %, ülekoormus 190 MVA ja Eestis tuleb tarbida vähemalt 200 MW, et hoida ära ülekoormused trafodes. (vt tabel 4.3).

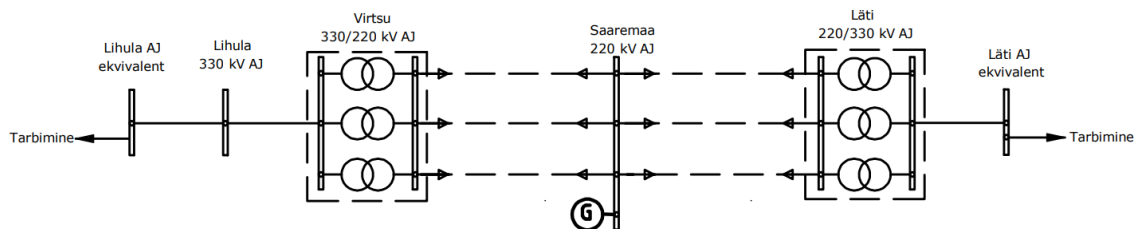
Tabel 4.3 N-1 analüüs kolmanda variandi nõrga ja tugeva võrguga

Välja lülitatud element	Kontrollitav element	Koormus, %	Ülekoormus, MVA	Märkus
<b>Variand 3 TUGEV</b>				
Saaremaa AJ trafo 1	Saaremaa AJ trafo 2 ja 3	133*	250,80	*ühe trafo koormus
Läti AJ trafo 1	Läti AJ trafo 2 ja 3	133*	250,80	*ühe trafo koormus
Virtsu AJ – Saaremaa AJ kaabel 1	Virtsu AJ – Saaremaa AJ kaabel 2	174	435,10	
<b>Variand 3 NÕRK</b>				
Saaremaa AJ trafo 1	Saaremaa AJ trafo 2 ja 3	125*	190,00	*ühe trafo koormus
Läti AJ trafo 1	Läti AJ trafo 2 ja 3	125*	190,00	*ühe trafo koormus
Virtsu AJ – Saaremaa AJ kaabel 1	Virtsu AJ – Saaremaa AJ kaabel 2	182	482,20	

#### 4.2.4 Variant 4

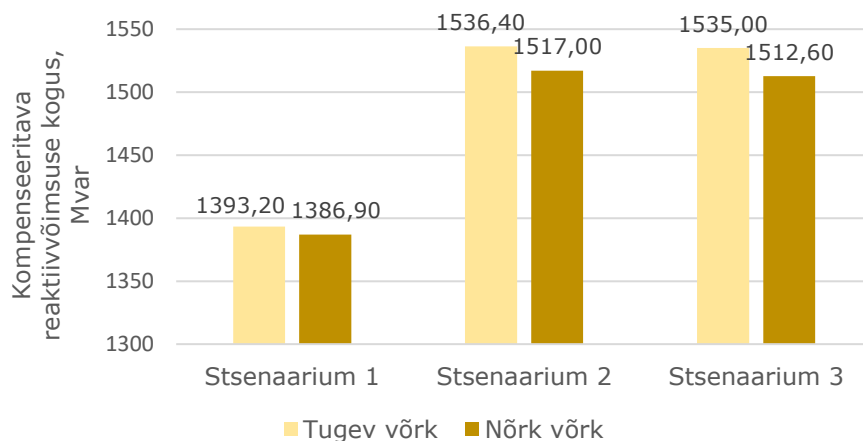
Variand neli hõlmab endas 330 kV ja 220 kV õhuline, alajaamasid, kuute 220 kV kaabelliini (Mandri-Eestist Saaremaale suunduvad kaabelliinid ja Lätti suunduvad),

kuute trafot (kolm trafot Virtsu alajaamas ning kolm Läti alajaamas), kahte tarbimissuunda ja ühte tootjat. Ühejooneskeemiga saab tutvuda joonisel 3.11. Neljanda variandi kirjeldusega saab tutvuda eelpool, peatükis 4.1.



Joonis 4.11 Neljanda variandi ühejooneskeem

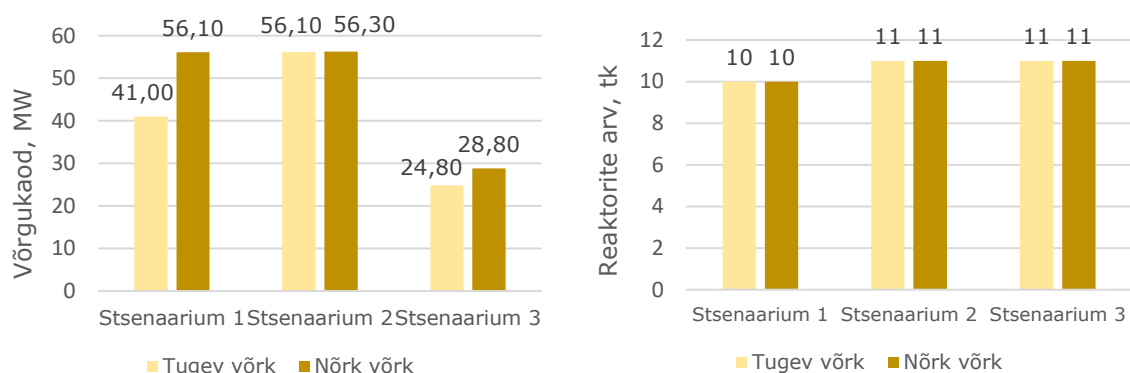
Neljast variandist ainsana on vaja selles variandis kõige rohkem reaktiivvõimsust kompenseerida teisel stsenaariumil. Stsenaariumis kaks tuleb reaktiivi kompenseerida nõrgas võrgus 1536,40 Mvar ning tugevas võrgus 1517,00 Mvar. Stsenaariumis kolm on vaja reaktiivi kompenseerida tugevas võrgus 1535,00 Mvar ja nõrgas võrgus 1512,60 Mvar. Vähim tuleb reaktiivvõimsust kompenseerida esimesel stsenaariumil: tugevas võrgus 1393,20 Mvar ja nõrgas võrgus 1386,90 Mvar (vt joonis 3.12).



Joonis 4.12 Reaktiivvõimsuse kompenseerimise vajadus kolme erineva stsenaariumiga variandil 4

Ühendades 220 kV kaablid läbi mere Saaremaa alajaamaga, tuleb lisada võrku vähemalt 11 reaktorit, et kompenseerida reaktiivvõimsust ja hoida pinged õiges vahemikus, arvestades seejuures N-1 kriteeriumiga. 11 reaktorit tuleb lisada nii stsenaarium kahe kui ka kolmes mõlema võrgu korral. Stsenaarium ühes tuleb võrku lisada tugevas ja nõrgas võrgus 10 reaktorit. Kõige rohkem on võrgukadu sel variandil teise stsenaariumi nõrga võrgu korral, mil 56,30 MW toodetud elektrienergiast läheb võrgukadudeks. 56,10 MW läheb kaduma nii stsenaarium kahe tugevas võrgus kui ka stsenaarium ühe nõrgas võrgus. Esimese stsenaariumi tugevas võrgus läheb kadudeks 41,00 MW ning vähim läheb kadudeks kolmandal stsenaariumil – tugevas võrgus 24,80 MW ja nõrgas võrgus

28,80 MW. Variantide tugeva ja nõrga võrgu võrgukadusid ja reaktorite arvu kolmel stsenaariumil illustreerib joonis 3.13.



Joonis 4.13 Kaod (vasakul) ja reaktorite arv (paremal) võrgus kolme erineva stsenaariumiga variandil 4

Lülitades välja ühe trafodest Virtsu alajaamas, kui kogu toodetud elektrienergiast (1000 MW) tarbitakse Eestis, tekib kahele teisele trafole koormus tugevas võrgus 128 % ja nõrgas võrgus 127 % (ülekoormused vastavalt 213 MVA ja 205 MVA). Selleks, et ülekoormust ei tekiks, tuleb Lätis tarbida vähemalt 250 MW elektrienergiat. Läti alajaamas, tugevas võrgus, tarbides 1000 MW Lätis, tekib ühe trafo tööst väljumisel olukord, kus teisel kahel trafol on koormus 133 %, mistõttu on ülekoormus 251 MVA (nõrgas võrgus koormus 129 % ja ülekoormus 220 MVA). Eestis peaks sellistel juhtudel ülekoormuse vältimiseks tarbima vähemalt 250 MW elektrienergiat (vt tabel 4.4).

Tabel 4.4 N-1 analüüs neljanda variandi nõrga ja tugeva võrguga

Välja lülitatud element	Kontrollitav element	Koormus, %	Ülekoormus, MVA	Märkus
<b>Variant 4 TUGEV</b>				
Virtsu AJ trafo 1	Virtsu AJ trafo 2 ja 3	128*	212,80	*ühe trafo koormus
Läti AJ trafo 1	Läti AJ trafo 2 ja 3	133*	250,80	*ühe trafo koormus
<b>Variant 4 NÕRK</b>				
Virtsu AJ trafo 1	Virtsu AJ trafo 2 ja 3	127*	205,20	*ühe trafo koormus
Läti AJ trafo 1	Läti AJ trafo 2 ja 3	129*	220,40	*ühe trafo koormus

## 4.3 Variantide esmase investeeringu majanduslik analüüs

Majandusliku analüüsi baasjuhtumiks on valitud variant 1 (330 kV ülekandevõrk üle Saaremaa mandri), mille suhtes teisi variante võrreldakse. Analüüsis arvutatakse Saaremaa võrgu, seejuures Eesti – Läti neljanda ühenduse maksumus, kus arvestatakse Läti-suunaliste merekaablite maksumusega kuni Eesti piirini, seega 50 km. 220 kV



kaabli maksumuseks on võetud 1,50 MEUR/km ja 330 kV kaabli maksumuseks 2,00 MEUR/km. Elering AS rakenduse *e-Gridmap* [18] andmetel on arvutuses võetud aluseks järgnevad maksumused:

- Välja toodud trafo hind 7,80 MEUR e-Gridmapis sisaldab 110 kV (0,80 MEUR) ja 330 kV (2,40 MEUR) lahtrite hindu, millest tulenevalt on trafo tegelik hind 4,60 MEUR;
- 330 kV õhuliin 0,40 MEUR/km, sama hinda kasutatakse ka 220 kV õhuliini jaoks;
- Ühe võimsuslülitiga lahter (vt Lisa 4) 2,40 MEUR;
- Reaktori ja topelt võimsuslülitiga lahtri (vt Lisa 4) hindu pole e-Gridmapis välja toodud, seetõttu kasutatakse Elering AS siseandmeid.

Maksumuste arvutamisel lähtutakse eelnevalt samas peatükis välja toodud modelleerimistulemustega. Igas alajaamas arvestatakse raskeima stsenaariumi reaktorite arvuga. Lisaks lähtutakse põhimõttest, et reaktorid paigaldatakse ühe võimsuslülitiga lahtritele, kolmest trafost kaks paigaldatakse ühe võimsuslülitiga lahtritele ja üks topelt võimsuslülititega lahtrile, õhu- ja kaabelliinid paigaldatakse topelt võimsuslülititega lahtritele töökindluse suurendamiseks. Tabelis 3.2 on võimalik tutvuda kõikide variantide majanduslikuks analüüsiks vajalike lähteandmetega.

Tabel 3.2 Variantide esmase investeringu majanduslikuks analüüsiks vajalikud lähteandmed

	<b>Variant 1</b>	<b>Variant 2</b>	<b>Variant 3</b>	<b>Variant 4</b>
Lihula 330 kV alajaama laiendus (1 ühe võimsuslülitiga ja 2 topelt võimsuslülitiga lahtrit, 1 reaktor)	x	x	x	x
Lihula – Virtsu 330 kV õhuliin 22 km	x	x	x	x
Virtsu 330 kV alajaam (2 ühe võimsuslülitiga ja 3 topelt võimsuslülitiga lahtrit, 2 reaktorit)	x		x	
Virtsu 330/220 kV alajaam (330 kV poolel - 3 ühe võimsuslülitiga ja 2 topelt võimsuslülitiga lahtrit, 3 trafot, 1 reaktor, 220 kV poolel - 3 topelt võimsuslülitiga lahtrit)		x		
Virtsu 330/220 kV alajaam (330 kV poolel - 6 ühe võimsuslülitiga ja 2 topelt võimsuslülitiga lahtrit, 3 trafot, 4 reaktorit, 220 kV poolel - 3 topelt võimsuslülitiga lahtrit)				x
Virtsu – Orissaare 330 kV kaabelliin 31,4 km (2 kaablit)	x			
Virtsu - Orissaare 220 kV kaabelliin 31,4 km (3 kaablit)		x		
Orissaare 330 kV alajaam (2 ühe võimsuslülitiga ja 3 topelt võimsuslülitiga lahtrit, 2 reaktorit)	x			
Orissaare 220 kV alajaam (2 ühe võimsuslülitiga ja 4 topelt võimsuslülitiga lahtrit, 2 reaktorit)		x		
Orissaare-Saaremaa alajaam 330 kV õhuliin 93 km	x			
Orissaare-Saaremaa alajaam 220 kV õhuliin 93 km		x		

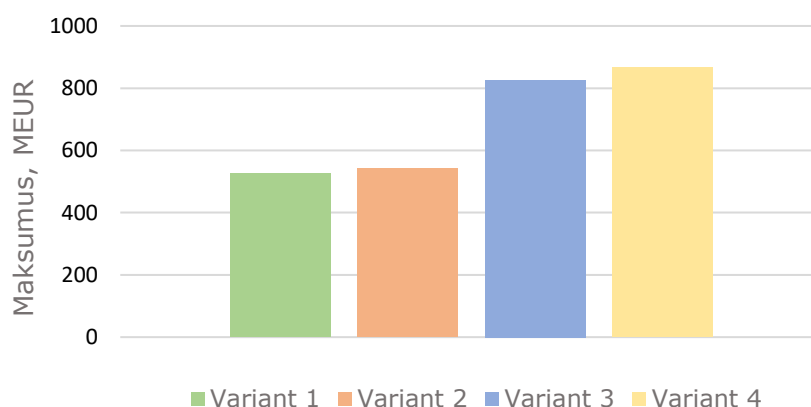
Tabel 3.2 Variantide esmase investeeingu majanduslikuks analüüsiks vajalikud lähteandmed (jätk)

Virtsu alajaam – Saaremaa alajaam 330 kV kaabelliin 111 km (2 kaablit)			x	
Virtsu alajaam – Saaremaa alajaam 220 kV kaabelliin 111 km (3 kaablit)				x
Vahepealne kompenseerimisalajaam (4 ühe võimsuslülitiga ja 4 topelt võimsuslülitiga lahtrit, 4 reaktorit)			x	
Saaremaa 330/220 kV alajaam kaabelliini korral (330 kV poolel - 5 ühe võimsuslülitiga ja 3 topelt võimsuslülitiga lahtrit, 3 trafot, 3 reaktorit, 220 kV poolel - 3 topelt võimsuslülitiga lahtrit)			x	
Saaremaa 220 kV alajaam õhuliini korral (3 ühe võimsuslülitiga ja 4 topelt võimsuslülitiga lahtrit, 3 reaktorit)		x		
Saaremaa 220 kV alajaam kaabelliini korral (4 ühe võimsuslülitiga ja 6 topelt võimsuslülitiga lahtrit, 4 reaktorit)				x
Saaremaa alajaam – Eesti piir 220 kV kaabelliin 50 km (3 kaablit)	x	x	x	x

Arvutuste põhjal leitud Saaremaa ülekandevõrgu maksumused, seejuures ka Eesti-Läti neljanda ühenduse maksumus Eesti piirini:

- Variant 1 – baasvariant, maksumus Eesti piirini 521 MEUR;
- Variant 2 – 2,86 % kallim baasvariandist, maksumus Eesti piirini 536 MEUR;
- Variant 3 – 57,53 % kallim baasvariandist, maksumus Eesti piirini 821 MEUR;
- Variant 4 – 65,42 % kallim baasvariandist, maksumus Eesti piirini 862 MEUR.

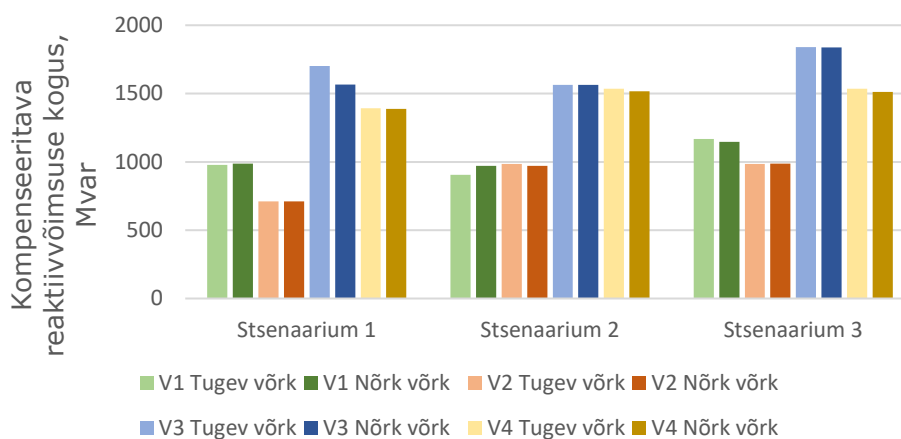
Joonisel 3.14 saab tutvuda variantide esmase investeeingu maksumusega, kus on näha, et kõige kallim on neljas variant, kus väga suurel määral moodustavad ülekandevõrgu 220 kV merekaabelliinid, mis on kõrge maksumusega. Sellele järgneb maksumuselt teine kõige kallim, kolmas variant, kus tuleb 330 kV merekaablite tõttu luua vahepeale ka lisa kompenseerimisalajaam, mis muudab maksumuse veelgi kõrgemaks. Esimene ja teine variant on maksumuselt üsna sarnased, kus variant kaks on 2,86 % kallim esimesest variandist. Majanduslikult ei ole mõistlik rajada Saaremaa võrku vaid kaabelliinidega, vaid tuleks kasutada ka õhuliine, kuna kaabelliinide maksumus on õhuliinide maksumusest neli kuni viis korda kallim.



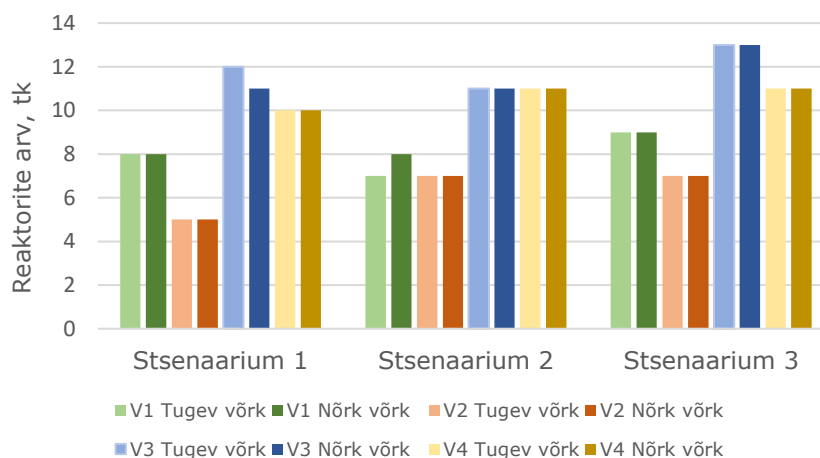
Joonis 4.14 Variantide esmase investeeingu maksumus

## 4.4 Tulemuste kokkuvõte

Lähtudes eelnevalt välja toodud tulemustest on majanduslikult kõige soodsamaks lahenduseks esimene variant, kus uue ülekandevõrgu rajamise maksumus on 521 MEUR. Seejuures teise variandi maksumus on 536 MEUR, kolmanda variandi maksumus 821 MEUR ja neljanda variandi maksumus 862 MEUR. Samas aga vajab vähim reaktiivvõimsuse kompenseerimist teine variant (vt joonis 3.14), millele reaktiivvõimsuse kompenseerimise seisukohalt on lähim esimene variant. Lisaks on nende kahe variandi puhul ka reaktorite arv väikseim (vt joonis 3.16). Kolmas ja neljas variant on nii maksumuselt kui ka reaktiivvõimsuse kompenseerimise mahult halvemad kahest esimesest variandist. Kolmas variant on tehniliselt keerukaim, kuna kaablite keskele on tarvis lisada ka kompenseerimisalajaam, mistõttu tuleb kaablitega tulla maapinnale.

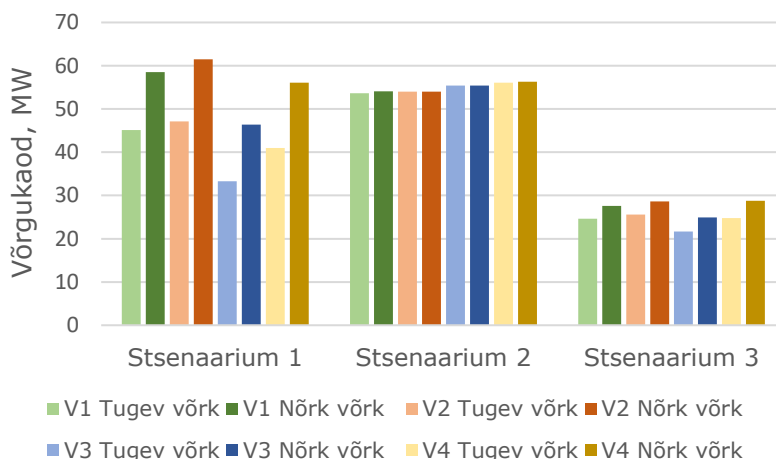


Joonis 4.15 Kõikide variantide reaktiivvõimsuse kompenseerimise vajadus nõrga ja tugeva võrgu korral



Joonis 4.16 Kõikide variantide reaktorite arv nõrga ja tugeva võrgu korral

Teise stsenaariumi juures on kõikide variantide võrgukaod üsna sarnased, jäädes vahemikku 53 – 56 MW (vt joonis 3.17). Stsenaariumi kolm võrgukaod on samuti igal variandil samas suurusjärgus, vahemikus 21 - 29 MW. Kõige suurem erinevus on aga esimese stsenaariumi võrgukadudes, kus need erinevad vahemikus 33 – 62 MW. Esimese stsenaariumi väikseim võrgukadu, 33 MW, esineb variandil kolm tugeva võrgu korral ning suurim võrgukadu, 62 MW, teise variandi tugevas võrgus. Üldiselt on kõikides variantides võrgukaod sarnased ja pole üleliia suured. Joonisel 3.17 saab tutvuda mainitud tulemustega.



Joonis 4.17 Kõikide variantide võrgukaod nõrga ja tugeva võrgu korral

Lõputöös püstitatud hüpotees - tehnilis-majanduslikult on kõige otstarbekam ülekandevõrgu loomisel kasutada võimalikult palju õhuliine - on tõene, kuna õhuliinide ühe kilomeetri hind on kaabelliinide maksumusest neli kuni viis korda madalam. Samuti on õhuliini vajadusel odavam ja lihtsam hooldada ning remontida. Seetõttu on esimene ja teine variant majanduslikult ning ka tehniliselt kõige mõistlikumad ja uus ülekandevõrk tuleks luua, kasutades võimalikult suures ulatuses õhuliine. Samas aga saab välja tuua, et kolmanda ja neljanda variandi eeliseks esimese kahe ees on aga see, et uue ühenduse loomiseks ei pea üle kogu Saaremaa ehitama pikka, peaaegu 100-kilomeetrist liini trassikoridori. Seetõttu väheneb nende variantidega mõju maaomanikele, mistõttu on ülekandevõrgu rajamine ühiskondlikust vaatest lihtsam. Ülekandevõrgu planeerimisprotsessis tuleb lisaks tehnilistele ja majanduslikele aspektidele arvestada ka looduskaitselisi piiranguid või kitsendusi ning hilisemate käidukulude minimeerimist, mida käesolevas lõputöös ei käsitletud. Nendele võivad lisanduda ka sotsiaalsed- ja poliitilised aspektid, mistõttu ülekandevõrku võidakse soovida näha hoopis muus trassikoridoris, kui lähtudes ainult tehnilistest ja majanduslikest aspektidest.

## KOKKUVÕTE

Taastuenergia kasutuselevõtt muudab elektrisüsteemi keerukaks ja suurenevad juhtimise väljakutsed, kuna elektrivõrku lisandub nii päikese- kui ka tuuleelektrijaamu. Taastuvatest allikatest elektrienergia tootmine muudab kogu võrgu ülesehitust, kuna uusi tootmisüksuseid planeeritakse peamiselt Lääne-Eestisse. Eesti jaoks on uued riikidevahelised ühendused äärmiselt olulised, et elektrienergiat importida ja eksportida, mistõttu on Elering AS uurimas võimalust luua Eesti-Läti neljas ühendus läbi Saaremaa. Selleks, et uut ühendust luua, on vaja teha Saaremaale 330 kV ülekandevõrk, sest vaid see pingeaste võimaldab tagada eeldused nii riikidevahelise ühenduseks kui meretuuleparkide süsteemiga ühendamiseks. Tänapäevane 110 kV ülekandevõrk ei ole selleks piisav. Antud lõputöö käigus uuriti Saaremaa ülekandevõrgu nelja varianti:

- Variant 1: ülekandevõrk Lihulast Saaremaa alajaamani, liikudes läbi Suure ja Väikese väina 330 kV kaablitega ja üle Saaremaa 330 kV õhuliiniga;
- Variant 2: ülekandevõrk Lihulast Saaremaa alajaamani, liikudes läbi Suure ja Väikese väina 220 kV kaablitega ja üle Saaremaa 220 kV õhuliiniga;
- Variant 3: ülekandevõrk Lihulast Saaremaa alajaamani, liikudes lõunast läbi Saaremaa rannikumere 330 kV kaablitega;
- Variant 4: ülekandevõrk Lihulast Saaremaa alajaamani, liikudes lõunast läbi Saaremaa rannikumere 220 kV kaablitega.

Ülekandevõrgu modelleerimiseks kasutati arvutustarkvara PSS/E. Igale variandile teostati N-1 analüüs. Selle käigus analüüsiti, mis juhtub mõne reaktori, trafo või liini tööst väljumisel ja kõikide variantidega modelleeriti läbi kolm järgmist stsenaariumi:

1. Stsenaarium 1: Saaremaa alajaamas toodetakse 1000 MW, kogu toodetud elektrienergia tarbitakse Eesti suunal;
2. Stsenaarium 2: Saaremaa alajaamas toodetakse 1000 MW, kogu toodetud elektrienergia tarbitakse Läti suunal;
3. Stsenaarium 3: Saaremaa alajaamas toodetakse 1000 MW, toodetud elektrienergiast 500 MW tarbitakse Eesti suunal ja teine 500 MW tarbitakse Läti pool.

Peale stsenaariumite modelleerimist loodi igale variandile majanduslik analüüs Elering AS rakenduse *e-Gridmap* andmetel.

Lõputöös püstitatud hüpotees, et tehnilis-majanduslikult on kõige otstarbekam ülekandevõrgu loomisel kasutada võimalikult palju õhuliine, osutus tõeseks. Õhuliini ühe kilomeetri maksumus on kaabelliini maksumusest neli kuni viis korda odavam

olenevalt kasutatavast pingeastmest. Esimene ja teine variant on odavaimad lahendused ning ka tehniliselt mõistlikud variandid, sest nende reaktiivvõimsuse kompenseerimise vajadused on kõige väiksemad. Üldjoontes võib öelda, et esimene ja teine variant on maksumuselt ja reaktiivvõimsuse kompenseerimise vajaduselt üpris sarnased, kus teise variandi maksumus on esimesest vaid 2,86 % kallim ja esimeses tuleb reaktiivi kompenseerida maksimaalselt 1166,50 Mvar ja teises 987,50 Mvar. Samuti on omavahel sarnased kolmas ja neljas variant, kus variant kolm on esimesest variandist 57,53 % kallim ning neljas variant on esimesest 65,42 % kulukam. Kolmandas variandis tuleb reaktiivvõimsust maksimaalselt kompenseerida 1839,50 Mvar ja neljandas variandis 1536,40 Mvar. Kolmanda variandi juures on tarvis kaablite keskele lisada ka kompenseerimisalajaam, kuna tegemist on liialt pikkade 330 kV merekaablitega, kus reaktiivvõimsust toodetakse liialt, mille tõttu pinge alaneb märkimisväärselt.

Lõputöös ei ole variantide valikul arvestatud looduskaitse- ja Natura 2000 aladega, mis mängivad samuti olulist rolli trassikoridori planeerimisel. Samuti pole ka arvestatud ehitus-, hooldus- ja käidukuludega. Tuleviku vaates on võimalik antud töö põhjal luua variantidele ka analüüs, arvestades looduskaitsealasid, ühiskondlikku mõju ja ehituskulusid. Lisaks saab järgnevatel modelleerimistel arvestada ka Saaremaa elektrienergia tarbimisvajadusega.

## SUMMARY

The electrical system becomes more complicated when renewable energy sources, like wind and solar power plants are added to the grid. The entire grid's structure is changed by the usage of renewable energy, as new generating plants are progressively located in western Estonia. For Estonia, to import and export energy, cross-country connections are crucial. This is the reason why Elering AS is looking into the feasibility of establishing a fourth connection between Estonia and Latvia, via the island of Saaremaa. As there is now just a partial of the 110 kV main grid on the island, a transmission grid must be developed on Saaremaa in order to create the new interconnection. The next four Saaremaa transmission grid options were examined for this thesis:

- Option 1: a transmission grid from Lihula to the Saaremaa substation through the two straits with 330 kV cables and over Saaremaa with a 330 kV overhead line;
- Option 2: a transmission grid from Lihula to the Saaremaa substation through the two straits with 220 kV cables and over Saaremaa with a 220 kV overhead line;
- Option 3: a transmission grid from Lihula to the Saaremaa substation going from the south through the Saaremaa coastal sea with 330 kV cables;
- Option 4: a transmission grid from Lihula to the Saaremaa substation going from the south through the coastal sea of Saaremaa with 220 kV cables.

The transmission grid was modelled using the PSS/E calculation program. The N-1 analysis was conducted for each option, and the three scenarios with the next options were modelled:

1. Scenario 1: 1000 MW is generated at the Saaremaa substation, all generated electricity is consumed in Estonia;
2. Scenario 2: 1000 MW is generated at the Saaremaa substation, all generated electricity is consumed in Latvia;
3. Scenario 3: 1000 MW is generated at the Saaremaa substation, 500 MW of the generated electricity consumed in Estonia and the remaining 500 MW consumed in Latvia.

Following the scenario modeling, each option's economic analysis was carried out using data from the Elering AS e-Gridmap.

The raised hypothesis: technically and economically the most beneficial is to use overhead lines as much as possible when creating a transmission grid, turned out to be true. The cost of one kilometer of an overhead line is four to five times cheaper than

the cost of a cable, depending on the used voltage level. The first and second options are the cheapest, while being also technically reasonable options, because their reactive power compensation needs are the smallest. In general, the costs and reactive power compensation needs of options one and two are rather close, option two is just 2,86 % more expensive than option one and the first option requires a maximum of 1166,50 Mvar of compensation, as opposed to 987,50 Mvar for the second option. With option three being 57,53% more expensive than option one, and option four being 65,42% more expensive than the first option, the third and fourth options are thus comparable to one another. 1839,50 Mvar of reactive power must be compensated in the third option, and 1536,40 Mvar in the fourth. Because of the very lengthy 330 kV subsea cables in option three, where the reactive power output becomes excessively large and results in a noticeable voltage drop, a compensating substation must be added halfway through the transmission line.

The choice of options in this thesis do not take into account the nature conservation and Natura 2000 areas, which also play an important role in the planning of the route corridor. Construction, maintenance, and operating costs are also not considered. In the future perspective, based on this work, it is possible to create an analysis of the options considering nature reserves, social impact, and construction costs. In addition, the following modelling should also take into account the electricity consumption needs of Saaremaa.



## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Elering AS, „Eesti elektrivarustuskindluse aruanne.” Elering.ee. Kasutatud: May. 9, 2024. [Võrgumaterjal.] Saadaval: [https://elering.ee/sites/default/files/2023-12/Elering\\_VKA\\_2023\\_WEB.pdf](https://elering.ee/sites/default/files/2023-12/Elering_VKA_2023_WEB.pdf)
- [2] G. Nauseda *et al.*, „The Marienborg declaration.” Regeringen.dk. Kasutatud: April. 17, 2024. [Võrgumaterjal.] Saadaval: [https://www.regeringen.dk/media/11544/the-marienborg-declaration-\\_300822.pdf](https://www.regeringen.dk/media/11544/the-marienborg-declaration-_300822.pdf)
- [3] Regionaal- ja Põlluministeerium, „Eesti-Läti neljas elektriühendus.” Riigiplaneering.ee. Kasutatud: April. 29, 2024. [Võrgumaterjal.] Saadaval: <https://www.riigiplaneering.ee/riigi-eriplaneeringud/eesti-lati-neljas-elektriuhendus/eesti-lati-neljanda-elektriuhenduse>
- [4] Riigikogu, „Kliimapoliitika põhialused aastani 2050.” Kliimaministeerium.ee. Kasutatud: April. 17, 2024. [Võrgumaterjal.] Saadaval: <https://kliimaministeerium.ee/media/9407/download>
- [5] Planeerimine.ee, „Üleriigiline planeering “Eesti 2030+”.” Planeerimine.ee. Kasutatud: May. 9, 2024. [Võrgumaterjal.] Saadaval: <https://planeerimine.ee/ruumiline-planeerimine/yrp/>
- [6] Elering AS, „Elektrisüsteem.” Elering.ee. Kasutatud: March. 22, 2024. [Võrgumaterjal.] Saadaval: <https://www.elering.ee/elektrisusteem>
- [7] Elering AS, „Elering taotleb Eesti-Läti elektriühenduse rajamise tingimuste määramiseks riigi eriplaneeringut.” Elering.ee. Kasutatud: April. 17, 2024. [Võrgumaterjal.] Saadaval: <https://www.elering.ee/elering-taotleb-eesti-lati-elektriuhenduse-rajamise-tingimuste-maaramiseks-riigi-eriplaneeringut>
- [8] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, „Eesti ja Läti sõlmisid ühise meretuulepargi eelarendamise leppe.” MKM.ee. Kasutatud: April. 12, 2024. [Võrgumaterjal.] Saadaval: <https://mkm.ee/uudised/eesti-ja-lati-solmisid-uhise-meretuulepargi-eelarendamise-leppe>

- [9] M. Mäekivi, „Elering ja Läti AST asuvad neljandat Eesti-Läti elektriühendust rajama.“ ERR.ee. Kasutatud: April. 17, 2024. [Võrgumaterjal.] Saadaval: <https://www.err.ee/1609137740/elering-ja-lati-ast-asuvad-neljandat-eesti-lati-elektriuhendust-rajama>
- [10] Siemens, „PSS®E – high-performance transmission planning and analysis software.“ Siemens.com. Kasutatud: March. 18, 2024. [Võrgumaterjal.] Saadaval: <https://www.siemens.com/global/en/products/energy/grid-software/planning/pss-software/pss-e.html>
- [11] E. Tiigimägi, *Elektrivõrgud*. Tallinn: TTÜ kirjastus, 1997.
- [12] Vabariigi Valitsus. (2024, Jan. 1). *Elektrisüsteemi toimimise võrgueeskiri*. [Võrgumaterjal.] Saadaval: <https://www.riigiteataja.ee/akt/121022019002>
- [13] Euroopa Komisjon. (2017, Aug. 2). *Regulation - 2017/1485*. [Võrgumaterjal.] Saadaval: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN-ET/TXT/?from=EN&uri=CELEX%3A32017R1485>
- [14] Majandus- ja taristuminister. (2022, Feb. 6). *Ehitise kaitsevööndi ulatus, kaitsevööndis tegutsemise kord ja kaitsevööndi tähistusele esitatavad nõuded*. [Võrgumaterjal.] Saadaval: <https://www.riigiteataja.ee/akt/128062015004?leiaKehtiv>.
- [15] Bronmetal, „Aluminium cable / ACSR.“ Bronmetal.com. Kasutatud: April. 12, 2024. [Võrgumaterjal.] Saadaval: <https://www.bronmetal.com/wp-content/uploads/aluminium-cable-acsr-en-en.pdf>
- [16] Viljandi Raadioklubi MTÜ, „Valemid (kogumik valemeid erinevate väärtuste arvutamiseks).“ Es7club.ee. [Võrgumaterjal.] Kasutatud: March. 17, 2024. Saadaval: <https://www.es7club.ee/info/81-valemid-erinevate-vaartuste-arvutamiseks#XL-Induktiivtakistus>
- [17] A. Avingu et al., „Reaktiivvõimsuse kompenseerimine Eesti elektrisüsteemis.“ Elering.ee. Kasutatud: April. 3, 2024. [Võrgumaterjal.] Saadaval: [https://elering.ee/sites/default/files/attachments/20180220\\_reaktiivv%C3%B5imsuse\\_aruanne\\_v2\\_Limited.pdf](https://elering.ee/sites/default/files/attachments/20180220_reaktiivv%C3%B5imsuse_aruanne_v2_Limited.pdf)

- [18] Elering AS, „e-Gridmap.“ Vla.elering.ee. Kasutatud: April. 29, 2024.  
[Võrgumaterjal.] Saadaval: <https://vla.elering.ee/>
- [19] Shaw Power Technologies, Inc., „PSS/E™ 30 Users Manual.“ Researchgate.net.  
Kasutatud: March. 18, 2024. [Võrgumaterjal.] Saadaval:  
[https://www.researchgate.net/profile/Chanchai\\_Tanucharoensup/post/PSS-E-user-manual/attachment/5e870ddfcfe4a77177746460/AS%3A876180899127297%401585909213540/download/PSS-E%E2%84%A2+v30+USERS+MANUAL.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Chanchai_Tanucharoensup/post/PSS-E-user-manual/attachment/5e870ddfcfe4a77177746460/AS%3A876180899127297%401585909213540/download/PSS-E%E2%84%A2+v30+USERS+MANUAL.pdf)

**LISAD**

## Lisa 1 PSS/E tarkvara lahendusmeetodid – Newton-Raphson ja Gauss-Seidel

Lisas 1 on välja toodud arvutustarkvaras PSS/E kasutatavad lahendusmeetodid.

Tabel L1. 1 PSS/E tarkvara poolt kasutatavad lahendusmeetodid [19]

Meetod	Milles seisneb?	Eelised	Puudused
<b>Newton</b>	Iteratiivse protsessiga lähendatakse lahendust järk-järgult, lähtudes eelnevast lahendusest ja süsteemi tasakaalu võrranditest.		
Fikseeritud jakobiaaniga Newton-Raphson	Newton-Raphsoni meetodi variant, kus võrrandid lahutatakse lineaarseteks ja nende lahendamisel kasutatakse algsest lahendusest tuletatud "fikseeritud kaldenurka".	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vähem arvutuslikult keeruline kui täis Newton-Raphson meetod.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Võib nõuda rohkem iteratsioone kui täis Newton-Raphson meetod;</li> <li>Kaugemate lahenduste korral võib olla vähem efektiivne.</li> </ul>
Täielik Newton-Raphson	Meetod kasutab täielikku Newton-Raphsoni iteratsiooniprotsessi, kus lahendust lähendatakse täielikult mitme muutuja tasakaalu võrrandite süsteemi abil.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Väga kiire koonduvus (täpsus saavutatakse vähem kui viie iteratsiooniga);</li> <li>Kiire ja kindel koondumine;</li> <li>Võrgu mõõtmetest sõltumatu koonduvuskiirus;</li> <li>Hõredustehnika rakendamise tõttu suhteliselt väike mälu mahu vajadus (Gauss-Seidelil väiksem);</li> <li>Tunduvalt kõrgem lahenduskindlus kui Gauss-Seideli meetodil;</li> <li>Hea ühilduvus optimeerimisarvutustega</li> <li>Negatiivsete järjestikjuhtivuste arvestamise võimalus.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Väga suur arvutuste maht ühel iteratsioonil (igal iteratsioonil tuleb uuesti arvutada jakobiaani elemendid ja lahendada võrrandisüsteem);</li> <li>Tundlikkus pinge algühendi suhtes;</li> <li>Keerukam algoritm.</li> </ul>

Tabel L1. 2 PSS/E tarkvara poolt kasutatavad lahendusmeetodid [10] (jätk)

Meetod	Milles seisneb?	Eelised	Puudused
Lõhestatud Newton-Raphson	Newton-Raphsoni meetodi variant, kus komponentide vahelised sõltuvused lahutatakse, luues lõhestatud süsteemi tasakaalu võrrandite süsteem.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vähem arvutuslikult keeruline, kui täielik Newton-Raphson meetod.</li> </ul>	Võib olla vähem efektiivne süsteemide korral, kus komponentide vahelised sõltuvused on tugevad.
<b>Gauss</b>	Meetod on lineaarne iteratiivne meetod, mis lahendab süsteemi tasakaalu võrrandeid järjestikku. Igas iteratsioonis arvutatakse iga muutuja uus väärtus, lähtudes eelmise iteratsiooni tulemustest.		
Gauss-Seidel	Seisneb voolude balansi kujul esitatud sõlmevõrrandite süsteemi ja sõlmevoolude avaldiste iteratiivses lahendamises.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mälu mahu vajadus väikene;</li> <li>Ühel iteratsioonil väike arvutuste maht;</li> <li>Koonduvuskiirus ja lahendikindlus ei sõltu pinge alglahendist;</li> <li>Lihtne algoritm</li> <li>Võimaldab jälgida mittekoondumise põhjusi ja probleemseid võrguosi.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aeglane koonduvus (suur iteratsioonide arv);</li> <li>Stabiilsuse piiri lähedal;</li> <li>Sõlmede arvu suurenemisel, kasvab vajalike iteratsioonide arv;</li> <li>Pikk arvutusaeg;</li> <li>Mõningal juhul mittekoondumine.</li> </ul>
Modifitseeritud Gauss-Seidel	Modifitseeritud Gauss-Seideli iteratiivne algoritm kasutab sekundaarset reguleerimist, mis põhineb igal primaarpinge muutusel, et võimaldada negatiivsete reaktantsharude kujutamist esimest tüüpi lattide vahel.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tõhusam klassikalisest Gauss-Seideli meetodist</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mõne süsteemi korral ebastabiilsus</li> </ul>

## Lisa 2 Variantide täielikud modelleerimistulemused kolmel stsenaariumil

Lisas 2 tuuakse välja nõrga ja tugeva võrgu kolme stsenaariumi ja kõikide variantide modelleerimistulemuste täielikud tulemused. Järgnevates tabelites tähendavad stsenaariumid järgmist: stsenaarium 1 - Saaremaa alajaamas toodetakse 1000 MW, tarbimine Eesti suunas, stsenaarium 2 – Saaremaa alajaamas toodetakse 1000 MW, tarbimine Läti suunas, stsenaarium 3 – Saaremaa alajaamas toodetakse 1000 MW, tarbimine Eesti ja Läti vahel jaotatud.

Tabel L2.1 Lähteandmed esimese variandi tugeva võrguga

<b>Variant 1 tugev võrk</b>	Lihula AJ	Virtsu AJ	Orissaare AJ	Saaremaa AJ enne trafot	Saaremaa AJ peale trafot	Läti AJ enne trafot	Läti AJ ekvivalent	Kokku
<b>Stsenaarium 1</b>								
Vajalik reaktiivi kompenseerimine [Mvar]	0	56,30	73,30	0	415,60	433,20	0	978,40
Reaktorite arv [tk]	0	1	1	0	3	3	0	8
Pinge [kV]	348,90	350	350,40	353,10	236,40	236,20	353,1	
Pinge suhtühikutes [s.ü.]	1,06	1,06	1,06	1,07	1,07	1,07	1,07	
Generaatorid („+“ toodab, „-“ tarbib)	-954,90			1000,00			0	45,10
<b>Stsenaarium 2</b>								
Vajalik reaktiivi kompenseerimine [Mvar]	106,80	141,30	141,30	0	295,00	221,20	0	905,60
Reaktorite arv [tk]	1	1	1	0	2	2	0	7
Pinge [kV]	349,80	350,80	350,90	353,10	239,00	237,40	353,10	
Pinge suhtühikutes [s.ü.]	1,06	1,06	1,06	1,07	1,09	1,08	1,07	
Generaatorid („+“ toodab, „-“ tarbib)	53,60			1000,00			-1000,00	53,6
<b>Stsenaarium 3</b>								
Vajalik reaktiivi kompenseerimine [Mvar]	105,20	139,10	139,40	0	418,40	364,40	0	1166,50
Reaktorite arv [tk]	1	1	1	0	3	3	0	9
Pinge [kV]	347,20	348,10	348,50	353,10	237,20	236,60	353,10	
Pinge suhtühikutes [s.ü.]	1,05	1,05	1,06	1,07	1,08	1,08	1,07	
Generaatorid („+“ toodab, „-“ tarbib)	-475,40			1000,00			-500,00	24,60

Tabel L2.2 Lähteandmed esimese variandi nõrga võrguga

<b>Variant 1 nõrk võrk</b>	Lihula AJ	Virtsu AJ	Orissaare AJ	Saaremaa AJ enne trafot	Saaremaa AJ peale trafot	Läti AJ enne trafot	Läti AJ ekvivalent	Kokku
Stsenaarium 1								
Vajalik reaktiivi kompenseerimine [Mvar]	0	0	72,60	0	535,80	378,80	0	987,20
Reaktorite arv [tk]	0	0	1	0	4	3	0	8
Pinge [kV]	345,90	348,40	348,90	353,10	234,90	235,70	352,50	
Pinge suhtühikutes [s.ü.]	1,05	1,06	1,06	1,07	1,07	1,07	1,07	
Generaatorid („+“ toodab, „-“ tarbib)	-941,50			1000,00			0	58,50
Stsenaarium 2								
Vajalik reaktiivi kompenseerimine [Mvar]	55,70	211,80	139,60	0	293,00	270,20	0	970,30
Reaktorite arv [tk]	1	2	1	0	2	2	0	8
Pinge [kV]	348,30	348,50	348,70	353,10	238,20	235,90	353,10	
Pinge suhtühikutes [s.ü.]	1,06	1,06	1,06	1,07	1,08	1,07	1,07	
Generaatorid („+“ toodab, „-“ tarbib)	54,10			1000,00			-1000,00	54,10
Stsenaarium 3								
Vajalik reaktiivi kompenseerimine [Mvar]	88,40	122,50	122,90	0	416,70	396,10	0	1146,60
Reaktorite arv [tk]	1	1	1	0	3	3	0	9
Pinge [kV]	346,80	348,30	348,80	353,10	236,70	235,70	353,10	
Pinge suhtühikutes [s.ü.]	1,05	1,06	1,06	1,07	1,08	1,07	1,07	
Generaatorid („+“ toodab, „-“ tarbib)	-472,40			1000,00			-500,00	27,60



Tabel L2.3 Lähteandmed teise variandi tugeva võrguga

<b>Variant 2 tugev võrk</b>	Lihula AJ	Virtsu AJ enne trafot	Orissaar re AJ	Saaremaa AJ	Läti AJ enne trafot	Läti AJ peale trafot	Läti AJ ekvivalent	Kokku
Stsenaarium 1								
Vajalik reaktiivi kompenseerimine [Mvar]	0	0	0	429,30	0	280,80	0	710,10
Reaktorite arv [tk]	0	0	0	3	0	2	0	5
Pinge [kV]	348,90	350,00	235,20	235,40	238,40	349,70	353,10	
Pinge suhtühikutes [s.ü.]	1,06	1,06	1,07	1,07	1,08	1,06	1,07	
Generaatorid („+“ toodab, „-“ tarbib)	-952,90			1000,00			0	47,10
Stsenaarium 2								
Vajalik reaktiivi kompenseerimine [Mvar]	137,10	137,60	142,20	429,30	0	139,80	0	986,00
Reaktorite arv [tk]	1	1	1	3	0	1	0	7
Pinge [kV]	345,60	346,20	234,70	235,40	235,70	349,00	353,10	
Pinge suhtühikutes [s.ü.]	1,05	1,05	1,07	1,07	1,07	1,06	1,07	
Generaatorid („+“ toodab, „-“ tarbib)	54,00			1000,00			-1000,00	54,00
Stsenaarium 3								
Vajalik reaktiivi kompenseerimine [Mvar]	137,80	138,90	0	429,30	0	279,40	0	985,40
Reaktorite arv [tk]	1	1	0	3	0	2	0	7
Pinge [kV]	346,50	347,80	236,80	235,40	237,20	348,90	353,10	
Pinge suhtühikutes [s.ü.]	1,05	1,05	1,08	1,07	1,08	1,06	1,07	
Generaatorid („+“ toodab, „-“ tarbib)	-474,40			1000,00			-500,00	25,60

Tabel L2.4 Lähteandmed teise variandi nõrga võrguga

<b>Variant 2 nõrk võrk</b>	Lihula AJ	Virtsu AJ enne trafot	Orissaare AJ	Saaremaa AJ	Läti AJ enne trafot	Läti AJ peale trafot	Läti AJ ekvivalent	Kokku
Stsenaarium 1								
Vajalik reaktiivi kompenseerimine [Mvar]	0	0	0	429,30	0	280,80	0	710,10
Reaktorite arv [tk]	0	0	0	3	0	2	0	5
Pinge [kV]	341,60	343,60	232,40	235,40	238,40	349,70	353,10	
Pinge suhtühikutes [s.ü.]	1,04	1,04	1,06	1,07	1,08	1,06	1,07	
Generaatorid („+“ toodab, „-“ tarbib)	-938,50			1000,00			0	61,50
Stsenaarium 2								
Vajalik reaktiivi kompenseerimine [Mvar]	121,40	0	280,00	429,30	0	139,80	0	970,50
Reaktorite arv [tk]	1	0	2	3	0	1	0	7
Pinge [kV]	346,60	347,8	232,90	235,40	235,70	349,00	353,10	
Pinge suhtühikutes [s.ü.]	1,05	1,05	1,06	1,07	1,07	1,06	1,07	
Generaatorid („+“ toodab, „-“ tarbib)	54,00			1000,00			-1000,00	54,00
Stsenaarium 3								
Vajalik reaktiivi kompenseerimine [Mvar]	137,10	0	141,70	429,30	0	279,40	0	987,50
Reaktorite arv [tk]	1	0	1	3	0	2	0	7
Pinge [kV]	345,50	347,70	234,20	235,40	237,20	348,90	353,10	
Pinge suhtühikutes [s.ü.]	1,05	1,05	1,06	1,07	1,08	1,06	1,07	
Generaatorid („+“ toodab, „-“ tarbib)	-471,40			1000,00			-500,00	28,60

Tabel L2.5 Lähteandmed kolmanda variandi tugeva võrguga

<b>Variant 3 tugev võrk</b>	Lihula AJ	Virtsu AJ	Vahealajaam	Saaremaa AJ enne trafot	Saaremaa AJ peale trafot	Läti AJ	Läti AJ ekvivalent	Kokku
Stsenaarium 1								
Vajalik reaktiivi kompenseerimine [Mvar]	138,20	140,70	567,60	0	427,80	427,50	0	1701,80
Reaktorite arv [tk]	1	1	4	0	3	3	0	12
Pinge [kV]	347,00	350,20	351,60	353,10	235,00	234,90	353,10	
Pinge suhtühikutes [s.ü.]	1,05	1,06	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	
Generaatorid („+“ toodab, „-“ tarbib)	-966,70			1000,00			0	33,30
Stsenaarium 2								
Vajalik reaktiivi kompenseerimine [Mvar]	142,30	144,10	574,80	0	424,50	278,00	0	1563,70
Reaktorite arv [tk]	1	1	4	0	3	2	0	11
Pinge [kV]	352,10	354,30	353,80	353,10	234,10	232,00	353,10	
Pinge suhtühikutes [s.ü.]	1,07	1,07	1,07	1,07	1,06	1,05	1,07	
Generaatorid („+“ toodab, „-“ tarbib)	55,40			1000,00			-1000,00	55,40
Stsenaarium 3								
Vajalik reaktiivi kompenseerimine [Mvar]	139,50	282,00	568,40	0	427,20	422,40	0	1839,50
Reaktorite arv [tk]	1	2	4	0	3	3	0	13
Pinge [kV]	348,60	350,50	351,90	353,10	234,80	233,50	353,10	
Pinge suhtühikutes [s.ü.]	1,06	1,06	1,07	1,07	1,07	1,06	1,07	
Generaatorid („+“ toodab, „-“ tarbib)	-478,30			1000,00			-500,00	21,70

Tabel L2.6 Lähteandmed kolmanda variandi nõrga võrguga

<b>Variant 3 nõrk võrk</b>	Lihula AJ	Virtsu AJ	Vahealajaam	Saaremaa AJ enne trafot	Saaremaa AJ peale trafot	Läti AJ	Läti AJ ekvivalent	Kokku
Stsenaarium 1								
Vajalik reaktiivi kompenseerimine [Mvar]	0	141,20	568,40	0	427,80	427,50	0	1564,90
Reaktorite arv [tk]	0	1	4	0	3	3	0	11
Pinge [kV]	347,90	350,70	351,90	353,10	235,00	234,90	353,10	
Pinge suhtühikutes [s.ü.]	1,05	1,06	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	
Generaatorid („+“ toodab, „-“ tarbib)	-953,60			1000,00			0	46,40
Stsenaarium 2								
Vajalik reaktiivi kompenseerimine [Mvar]	142,20	144,00	574,80	0	424,50	278,00	0	1563,50
Reaktorite arv [tk]	1	1	4	0	3	2	0	11
Pinge [kV]	351,90	354,20	353,80	353,10	234,10	232,00	353,10	
Pinge suhtühikutes [s.ü.]	1,07	1,07	1,07	1,07	1,06	1,05	1,07	
Generaatorid („+“ toodab, „-“ tarbib)	55,40			1000,00			-1000,00	55,40
Stsenaarium 3								
Vajalik reaktiivi kompenseerimine [Mvar]	138,50	281,00	567,60	0	427,20	422,40	0	1836,70
Reaktorite arv [tk]	1	2	4	0	3	3	0	13
Pinge [kV]	347,40	349,8	351,60	353,10	234,80	233,50	353,10	
Pinge suhtühikutes [s.ü.]	1,05	1,06	1,07	1,07	1,07	1,06	1,07	
Generaatorid („+“ toodab, „-“ tarbib)	-475,10			1000,00			-500,00	24,90

Tabel L2.7 Lähteandmed neljanda variandi tugeva võrguga

<b>Variant 4 tugev võrk</b>	Lihula AJ	Virtsu AJ enne trafot	Virtsu AJ peale trafot	Saaremaa AJ	Läti AJ enne trafot	Läti AJ peale trafot	Läti AJ ekvivalent	Kokku
Stsenaarium 1								
Vajalik reaktiivi kompenseerimine [Mvar]	0	0	410,70	572,40	0	410,10	0	1393,20
Reaktorite arv [tk]	0	0	3	4	0	3	0	10
Pinge [kV]	343,10	343,00	230,20	235,40	237,00	345,10	353,10	
Pinge suhtühikutes [s.ü.]	1,04	1,04	1,05	1,07	1,08	1,05	1,07	
Generaatorid („+“ toodab, „-“ tarbib)	-959,00			1000,00			0	41,00
Stsenaarium 2								
Vajalik reaktiivi kompenseerimine [Mvar]	136,20	0	556,00	572,40	0	271,80	0	1536,40
Reaktorite arv [tk]	1	0	4	4	0	2	0	11
Pinge [kV]	344,50	344,80	232,00	235,40	234,20	344,10	353,10	
Pinge suhtühikutes [s.ü.]	1,04	1,04	1,05	1,07	1,06	1,04	1,07	
Generaatorid („+“ toodab, „-“ tarbib)	56,10			1000,00			-1000,00	56,10
Stsenaarium 3								
Vajalik reaktiivi kompenseerimine [Mvar]	134,60	0	548,00	572,80	0	279,60	0	1535,00
Reaktorite arv [tk]	1	0	4	4	0	2	0	11
Pinge [kV]	342,50	342,80	230,30	235,50	237,20	349,00	353,10	
Pinge suhtühikutes [s.ü.]	1,04	1,04	1,05	1,07	1,08	1,06	1,07	
Generaatorid („+“ toodab, „-“ tarbib)	-475,20			1000,00			-500,00	24,80

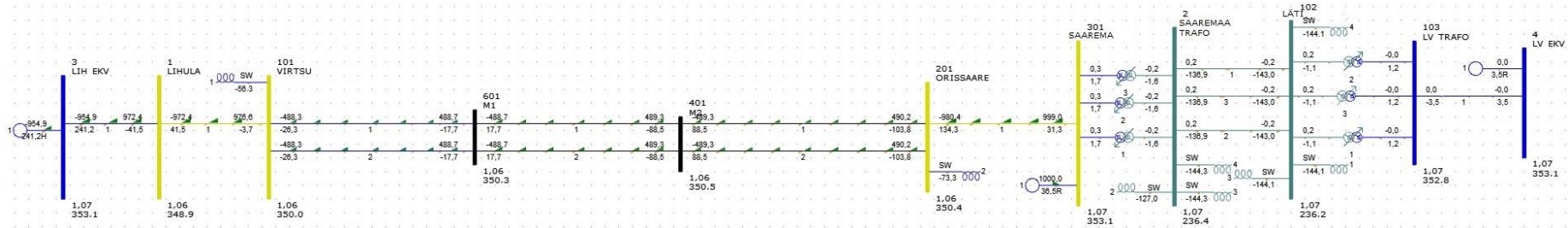
Tabel L2.8 Lähteandmed neljanda variandi nõrga võrguga

LISA 3

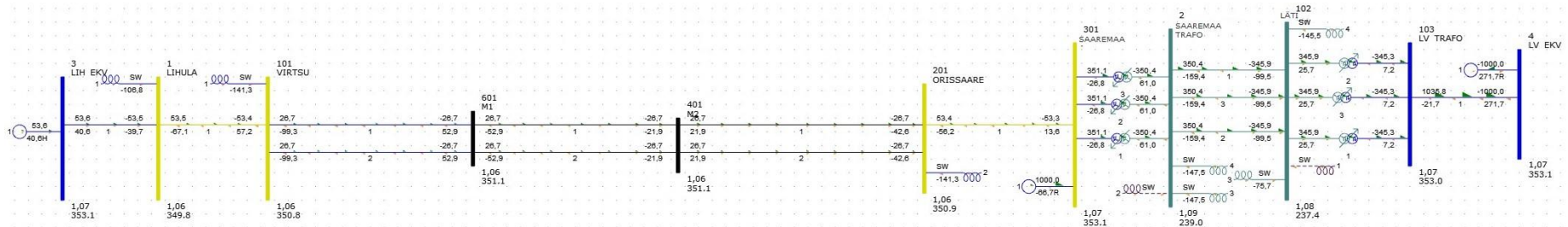
<b>Variant 4 nõrk võrk</b>	Lihula AJ	Virtsu AJ enne trafot	Virtsu AJ peale trafot	Saaremaa AJ	Läti AJ enne trafot	Läti AJ peale trafot	Läti AJ ekvivalent	Kokku
Stsenaarium 1								
Vajalik reaktiivi kompenseerimine [Mvar]	0	0	404,40	572,40	0	410,10	0	1386,90
Reaktorite arv [tk]	0	0	3	4	0	3	0	10
Pinge [kV]	336,20	337,60	228,50	235,40	237,00	345,10	353,10	
Pinge suhtühikutes [s.ü.]	1,02	1,02	1,04	1,07	1,08	1,05	1,07	
Generaatorid („+“ toodab, „-“ tarbib)	-943,90			1000,00			0	56,10
Stsenaarium 2								
Vajalik reaktiivi kompenseerimine [Mvar]	118,80	0	554,00	572,40	0	271,80	0	1517,00
Reaktorite arv [tk]	1	0	4	4	0	2	0	11
Pinge [kV]	342,90	343,50	231,60	235,40	234,20	344,10	353,10	
Pinge suhtühikutes [s.ü.]	1,04	1,04	1,05	1,07	1,06	1,04	1,07	
Generaatorid („+“ toodab, „-“ tarbib)	56,30			1000,00			-1000,00	56,30
Stsenaarium 3								
Vajalik reaktiivi kompenseerimine [Mvar]	116,40	0	544,40	572,40	0	279,40	0	1512,60
Reaktorite arv [tk]	1	0	4	4	0	2	0	11
Pinge [kV]	339,50	340,50	229,50	235,40	235,80	344,20	353,10	
Pinge suhtühikutes [s.ü.]	1,03	1,03	1,04	1,07	1,07	1,04	1,07	
Generaatorid („+“ toodab, „-“ tarbib)	-471,20			1000,00			-500,00	28,80

## Lisa 3 Modelleerimistulemused PSS/E tarkvaras

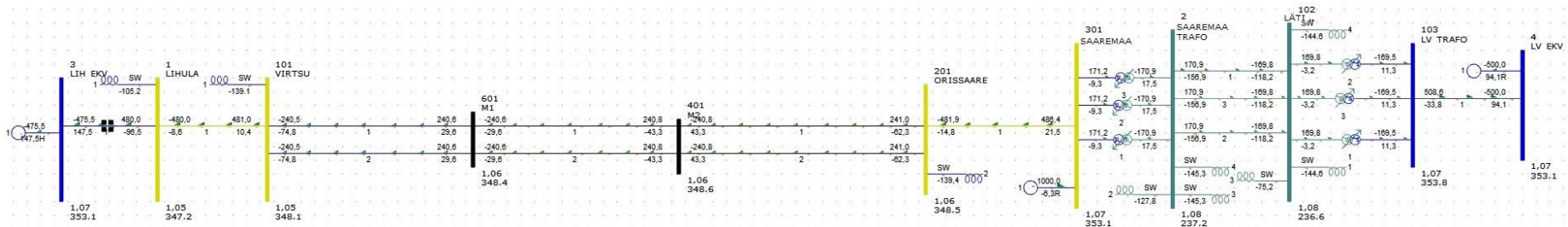
Lisas 3 on välja toodud iga stsenaariumi tugeva ja nõrga võrgu modelleerimistulemused.



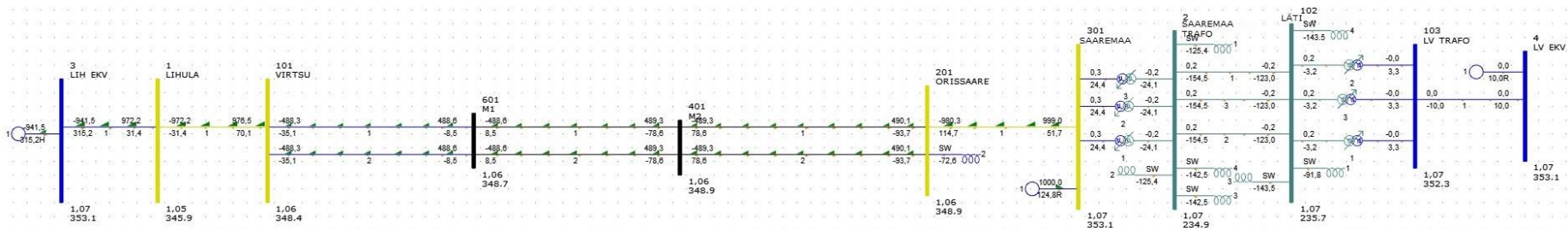
Joonis L3.1 Variant 1 tugev võrk stsenaarium 1 PSS/E-s



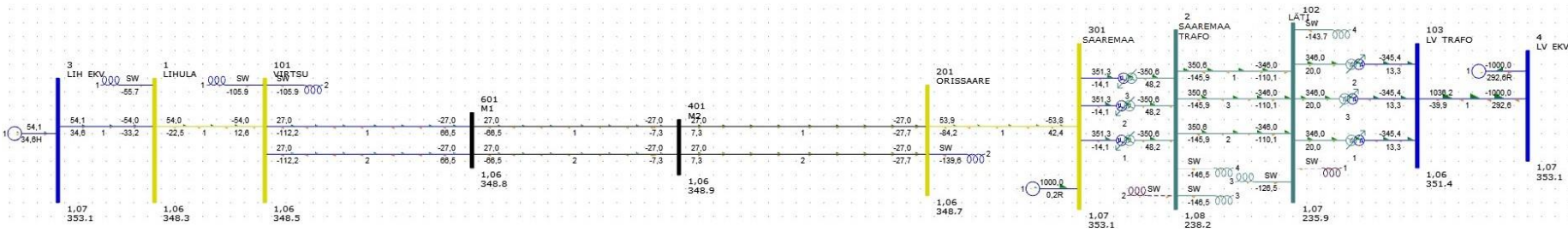
Joonis L3.2 Variant 1 tugev võrk stsenaarium 2 PSS/E-s



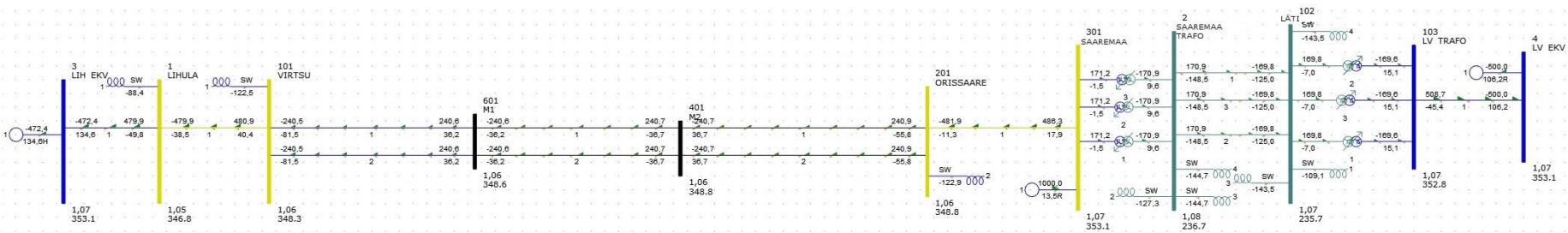
Joonis L3.3 Variant 1 tugev võrk stsenaarium 3 PSS/E-s



Joonis L3.4 Variant 1 nõrk võrk stsenaarium 1 PSS/E-s

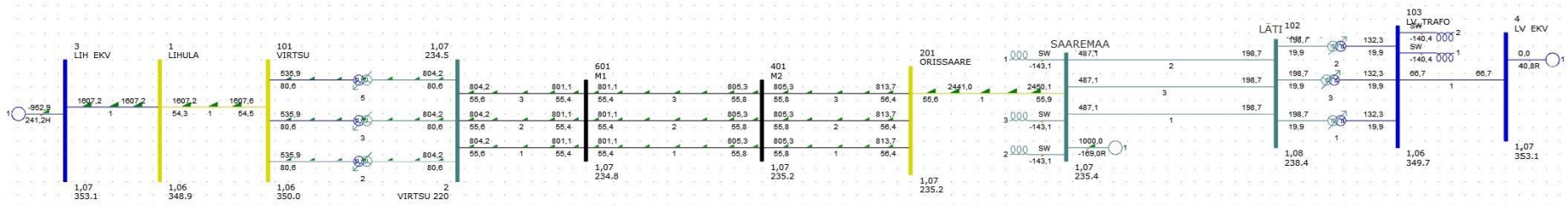


Joonis L3.5 Variant 1 nõrk võrk stsenaarium 2 PSS/E-s

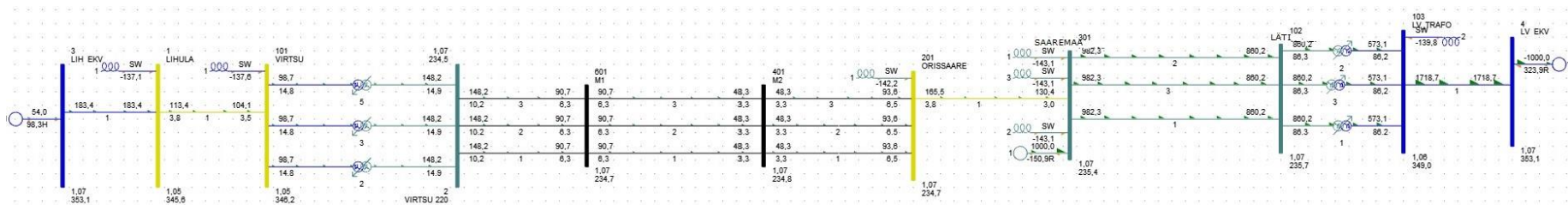


Joonis L3.6 Variant 1 nõrk võrk stsenaarium 3 PSS/E-s

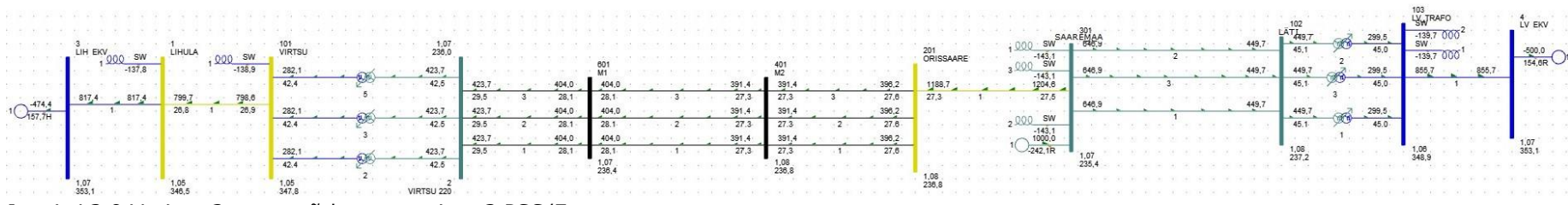




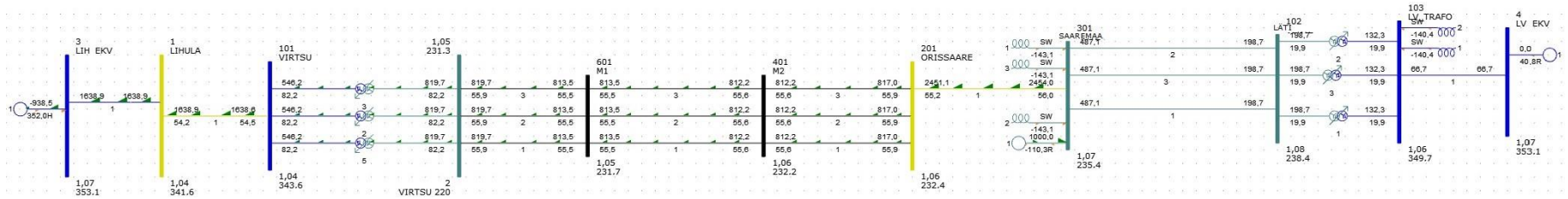
Joonis L3.7 Variant 2 tugev võrk stsenaarium 1 PSS/E-s



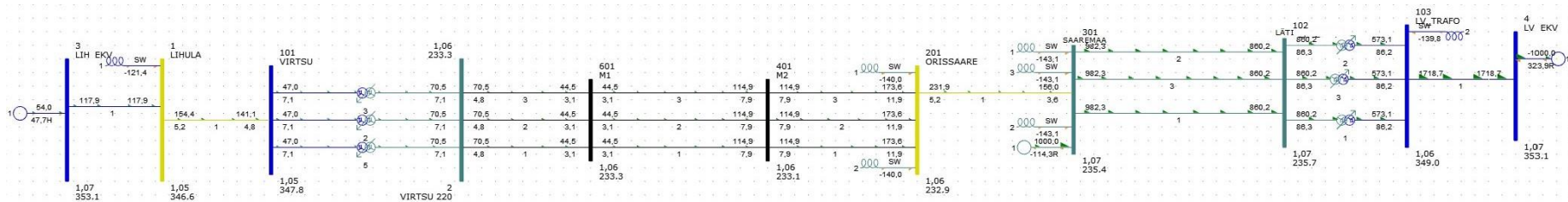
Joonis L3.8 Variant 2 tugev võrk stsenaarium 2 PSS/E-s



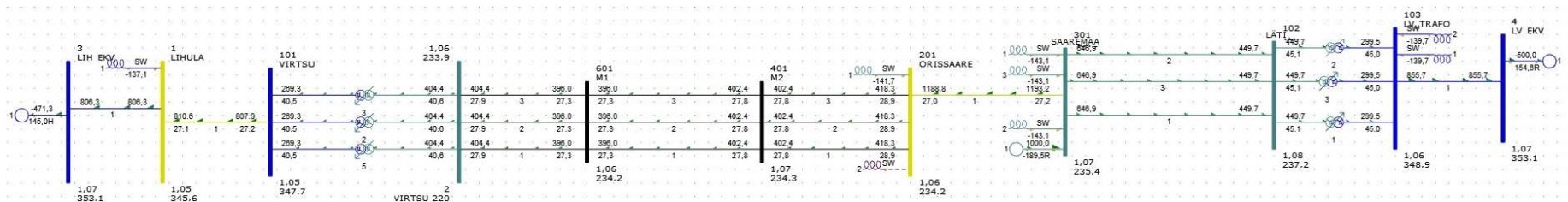
Joonis L3.9 Variant 2 tugev võrk stsenaarium 3 PSS/E-s



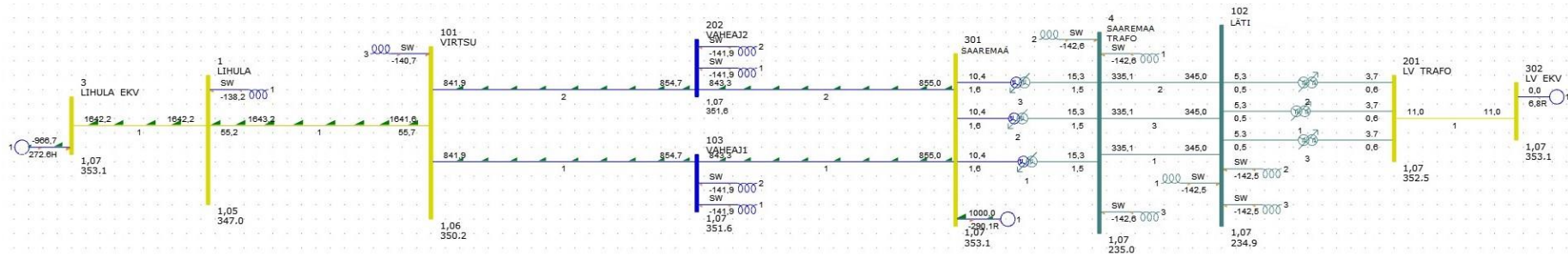
Joonis L3.10 Variant 2 nõrk võrk stsenaarium 1 PSS/E-s



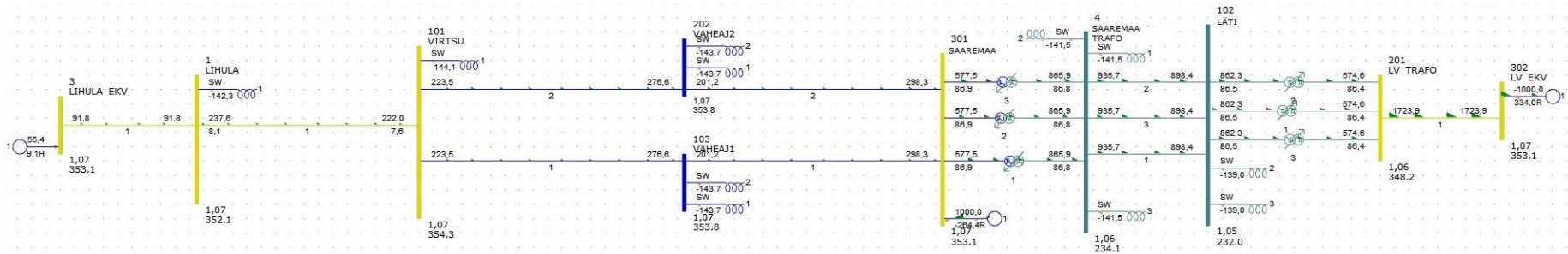
Joonis L3.11 Variant 2 nõrk võrk stsenaarium 2 PSS/E-s



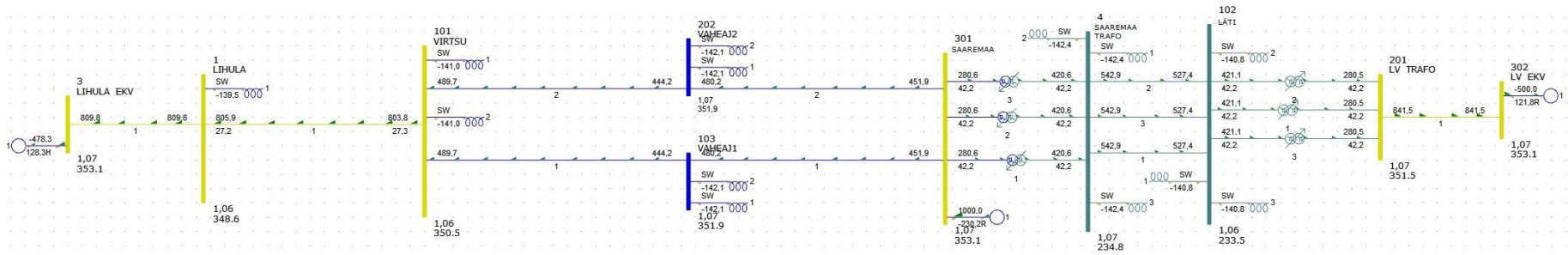
Joonis L3.12 Variant 2 nõrk võrk stsenaarium 3 PSS/E-s



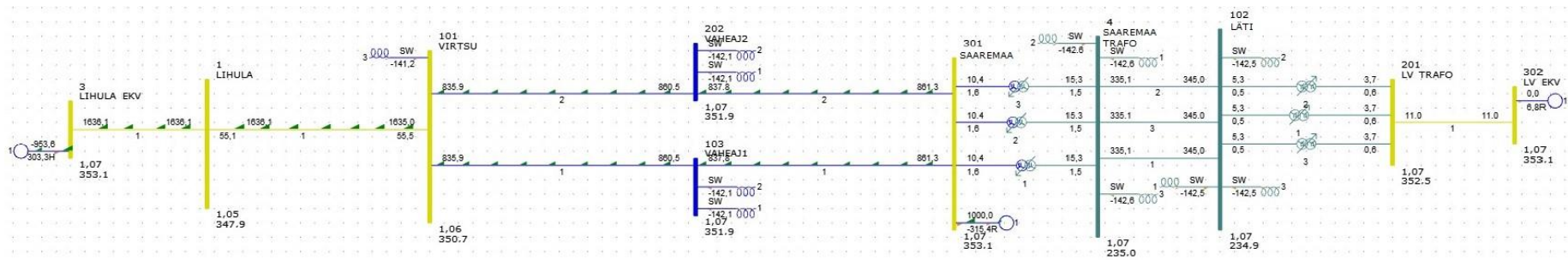
Joonis L3.13 Variant 3 tugev võrk stsenaarium 1 PSS/E-s



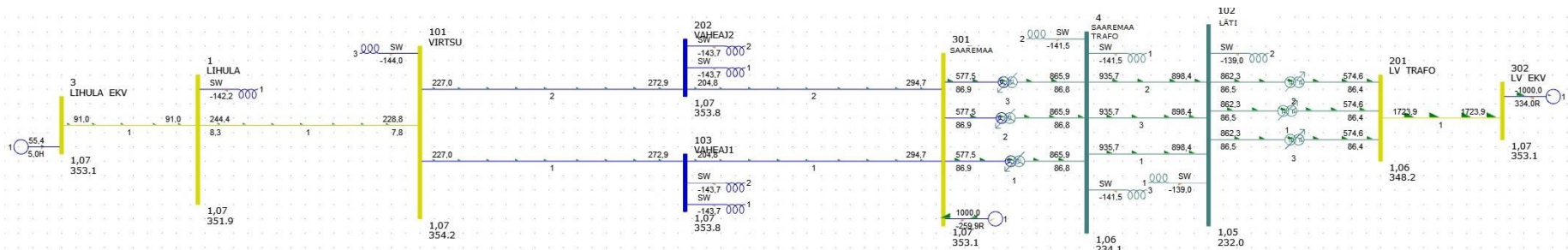
Joonis L3.14 Variant 3 tugev võrk stsenaarium 2 PSS/E-s



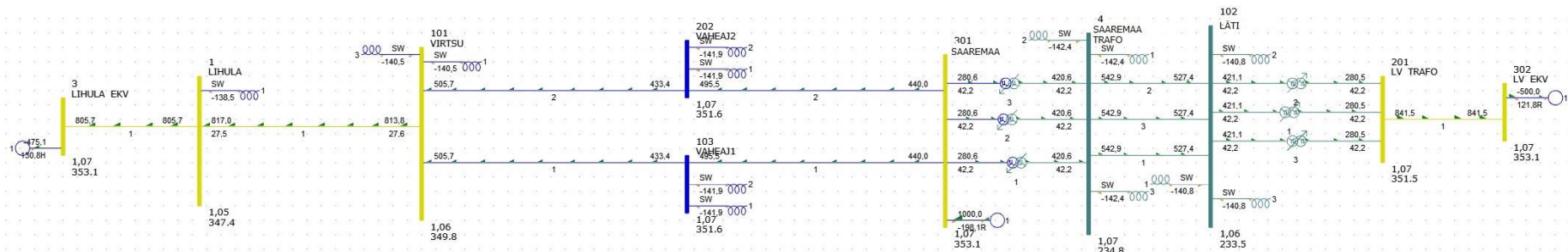
Joonis L3.15 Variant 3 tugev võrk stsenaarium 3 PSS/E-s



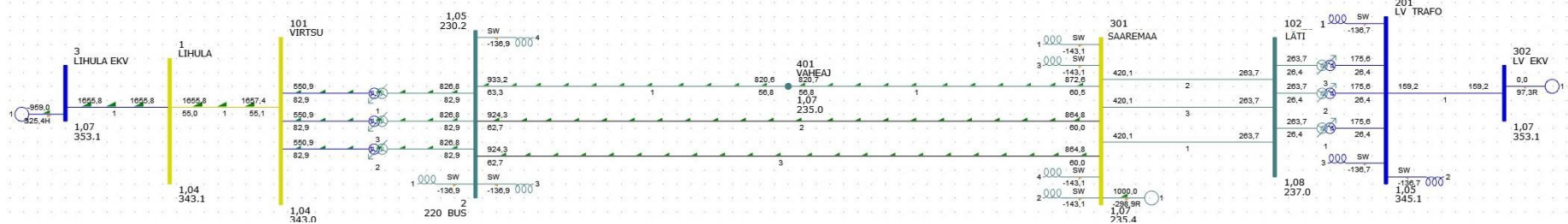
Joonis L3.16 Variant 3 nõrk võrk stsenaarium 1 PSS/E-s



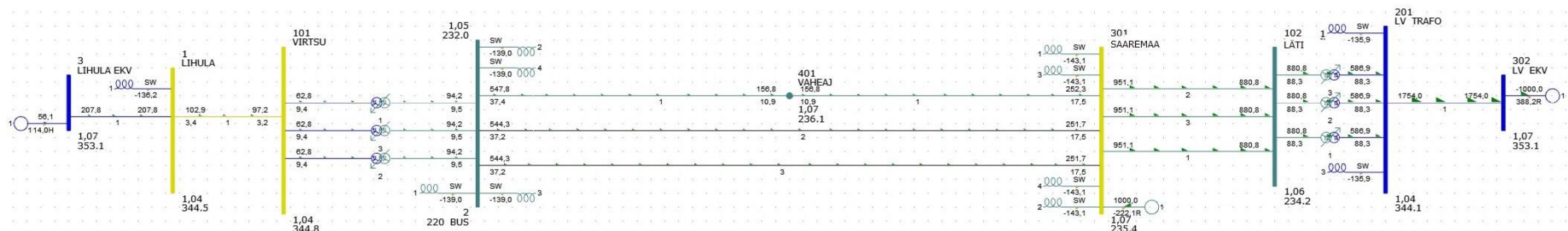
Joonis L3.17 Variant 3 nõrk võrk stsenaarium 2 PSS/E-s



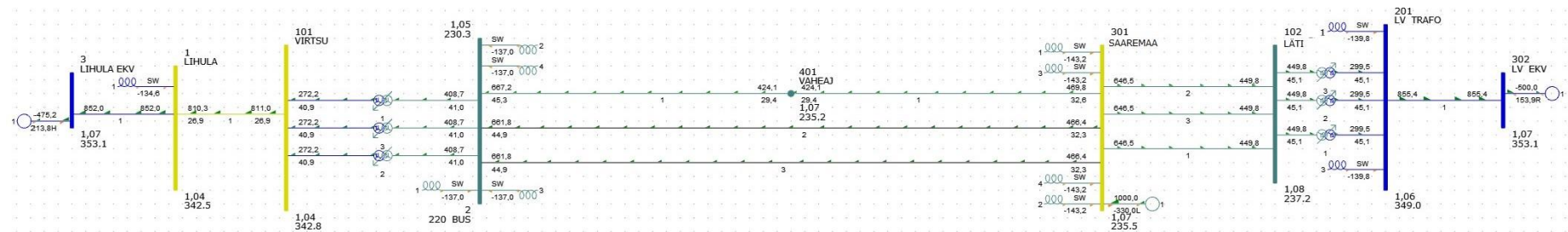
Joonis L3.18 Variant 3 nõrk võrk stsenaarium 3 PSS/E-s



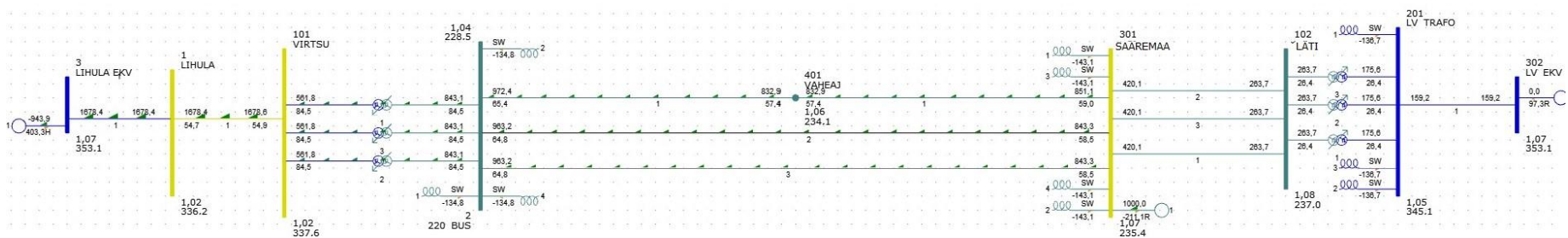
Joonis L3.19 Variant 4 tugev võrk stsenaarium 1 PSS/E-s



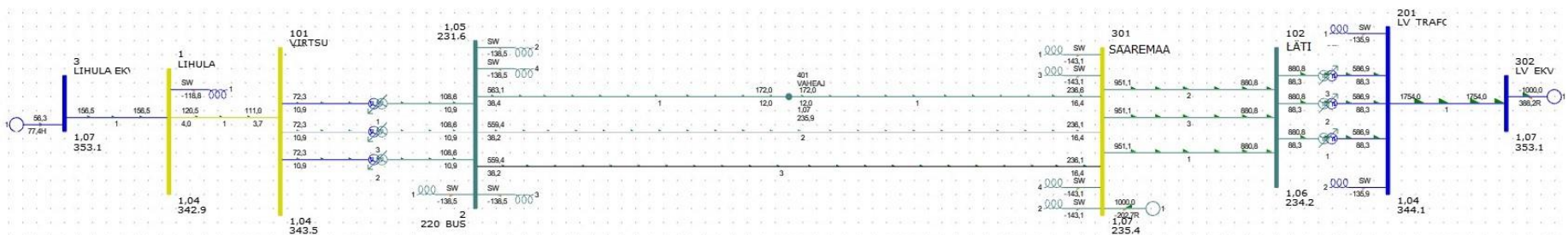
Joonis L3.20 Variant 4 tugev võrk stsenaarium 2 PSS/E-s



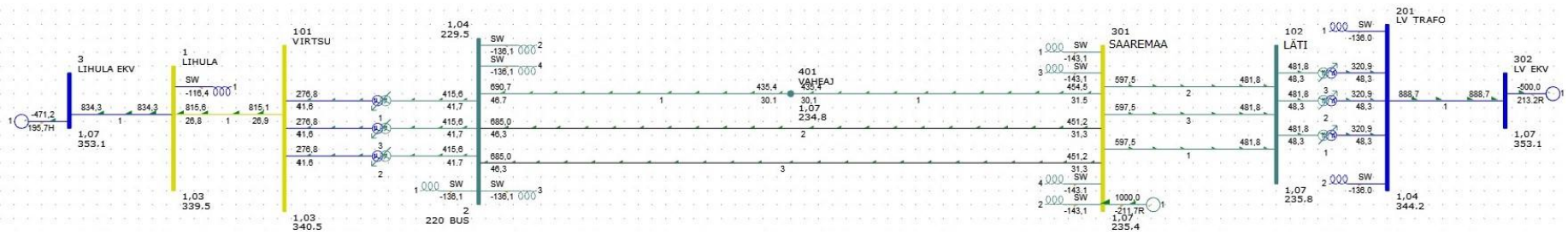
Joonis L3.21 Variant 4 tugev võrk stsenaarium 3 PSS/E-s



Joonis L3.22 Variant 4 nõrk võrk stsenaarium 1 PSS/E-s



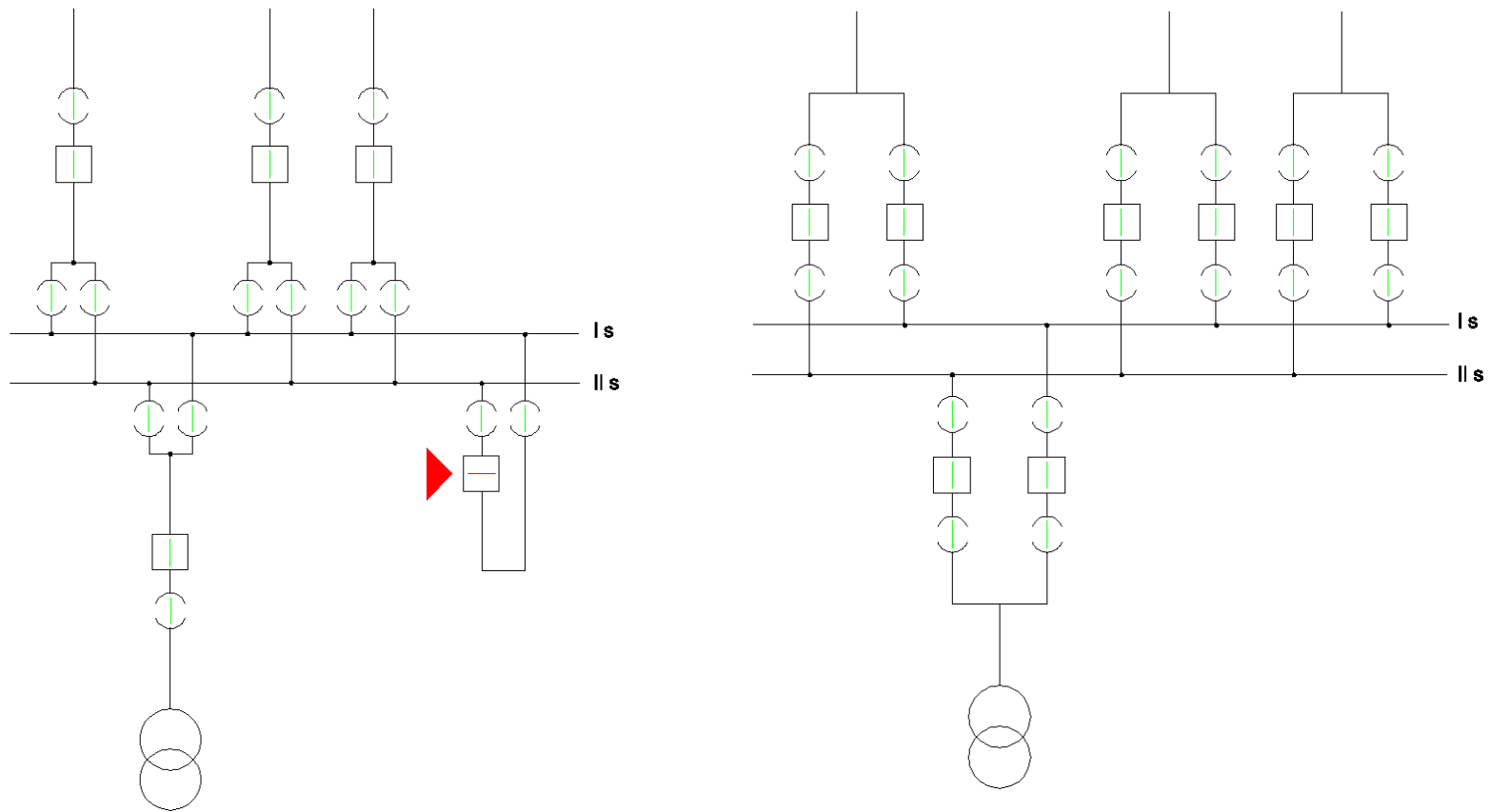
Joonis L3.23 Variant 4 nõrk võrk stsenaarium 2 PSS/E-s



Joonis L3.24 Variant 4 nõrk võrk stsenaarium 3 PSS/E-s

## Lisa 4 Ühe ja topelt võimsuslülititega lahtrite selgitavad joonised

Lisas 4 saab tutvuda ühe ja topelt võimsuslülititega lahtrite selgitavate joonistega.



Joonis L4. 1 Ühe võimsuslülitiga lahter (paremal) ja kahe võimsuslülitiga lahter (vasakul)