



TALLINNA TEHNICAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**EESTI 330/110 KV ELEKTRISÜSTEEMI
PÜSITALITUSE MODELLEERIMINE JA ANALÜÜS
VABAVARAL PÕHINEVAS TARKVARAS**

**MODELING AND ANALYSIS OF THE ESTONIAN 330/110
KV POWER SYSTEM IN STEADY-STATE OPERATION
USING OPEN-SOURCE SOFTWARE**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Uku Sau

Üliõpilaskood 222711EAAB

Juhendaja: Henri Manninen, teadur

Tallinn 2025

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

“15.” mai 2025

Autor: Uku Sau

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö esitatud nõuetele

“15.” mai 2025

Juhendaja: Henri Manninen

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

“.....”.....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Uku Sau

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Eesti 330/110 kv elektrisüsteemi püsitalituse modelleerimine ja analüüs vabavaral põhinevas tarkvaras,

mille juhendaja on Henri Manninen,

- 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.
-

15. mai 2025

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

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Uku Sau, 222711EAAB
Õppekava, peeriala: EAAB16/22, elektroenergeetika
Juhendaja(d): teadur, Henri Manninen

Lõputöö teema:

Eesti 330/110 kV elektrisüsteemi püsitalituse modelleerimine ja analüüs vabavaral põhinevas tarkvaras

Modeling and Analysis of the Estonian 330/110 kV Power System in Steady-State Operation Using Open-Source Software

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Kas vabavaralises tarkvaras on võimalik usaldusväärselt elektrivõrgu püsitalitlust modelleerida?
2. Kui täpsed on tulemused võrreldes siiani kasutuses olevate tarkvaradega ning milliste eripäradega tuleks arvestada?
3. Kuidas käitub Eesti 330/110 kV elektrisüsteem erinevate stsenaariumite korral püsitalituses aastal 2030+?

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Võrguarvutustarkvaradega tutvumine ja lähteandmete kogumine	24.01.2025
2.	Mudelite valmimine ja katsetused	25.02.2025
3.	Erinevate stsenaariumite korral võrguarvutuste teostamine ning katsetulemuste kogumine	10.03.2025
4.	Tulemuste analüüs ja võrdlus, teoreetilise osa kirjutamine	21.03.2025
5.	Töö lõplik versioon valmis	09.05.2025

Töö keel: eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "15." mai 2025 a

Üliõpilane: ".....".....20.....a
/allkiri/
Juhendaja: ".....".....20.....a
/allkiri/
Konsultant: ".....".....20.....a
/allkiri/
Programmijuht: ".....".....20.....a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	7
Lühendite ja tähiste loetelu.....	8
1 SISSEJUHATUS.....	9
2 ELEKTRIVÕRGU MODELLEERIMINE.....	11
2.1 Võrguarvutused ning modelleerimistarkvarad	11
2.2 PSS/E.....	13
2.3 PyPowSyBl	14
3 EESTI 2030 PÕHIVÕRGU MUDEL.....	16
3.1 Lähteandmed	16
3.1.1 Ülekandeliinid	17
3.1.2 Alajaamad	19
3.1.3 Trafod	20
3.1.4 Reaktiivvõimsust kompenseerivad seadmed	20
3.2 Elektrivõrgu parameetrid	22
3.3 Valitud stsenaariumid	24
3.3.1 Tarbimine	24
3.3.2 Tootmine	26
3.4 Mudeli püsitalituse analüüs	27
4 TARKVARADE TULEMUSTE VÕRDLOS	30
4.1 Talvine maksimaalne stsenaarium.....	30
4.2 Suvine minimaalne stsenaarium	36
4.3 Stsenaariumite erinevuste võrdlus	40
4.4 Tarkvarade võrdlus	43
4.5 Järeldused	45
KOKKUVÕTE	46
SUMMARY.....	48
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	50

EESSÕNA

Käesolevas bakalaureusetöös analüüsitakse kui usaldusväärne on vabavaraline Pythoni programmeerimiskeele teek PyPowSyBI elektrivõrkude modelleerimisel. Antud teemat pole varasemalt eriti uuritud. Võrdlused teostatakse Eesti 2030. aasta elektrivõrgu ekvivalentse mudeli põhjal, mille lähteandmed on saadud avalikest allikatest. Saadud tulemusi võrreldakse klassikalise PSS/E võrguarvutustarkvaraga, samade lähteandmete puhul. Teema valiku ajendas huvi elektrisüsteemi modelleerimise vastu. Lõputöö teema pakuti välja käesoleva töö juhendaja Henri Mannineni ning Tallinna Tehnikaülikooli elektrisüsteemide uurimisrühma poolt. Autor soovib tänada töö juhendajat, kes oli bakalaureusetöö koostamisel oluliselt abiks.

Lühendite ja tähiste loetelu

PSS/E – Siemensi poolt arendatav võrguarvutustarkvara, elektrisüsteemi simulaator inseneritöö jaoks (inglise keeles *Power System Simulator for Engineering*)

PyPowSyBl – Pythoni programmeerimiskeele teek võrguarvutuste tarbeks (inglise keeles *Python Power System Blocks*)

1 SISSEJUHATUS

Elektrienergia edastamine suurtes elektrisüsteemides toimub läbi ülekandevõrkude. Selleks, et elektrivõrk toimiks, on vajalik selliste suurte süsteemide usaldusväärne toimimine. Elektrivõrkude talituse analüüsimiseks kasutatakse erinevaid võrgumudeleid ja arvutustarkvarasid. Olenevalt kontekstist valitakse võrgumudeli täpsus ja tüüp. Mudelid võivad olla nii staatilised kui ka dünaamilised.

Mudelite koostamine käib üldjuhul tuntud võrguarvutustarkvaradega, näiteks PSS/E (inglise keeles *Power System Simulator for Engineering*) [1]. Sellised tarkvarad on väga võimekad, kuid nende litsentsid võivad maksta mitmekümneid tuhandeid eurosid aastas. Alternatiiviks tasulistele tarkvaradele võiks kasutada võrguarvutusteks vabavaralisi programme. Üheks selliseks vabavaraks on Pythoni programmeerimiskeele teek PyPowSyBI (inglise keeles *Python Power System Blocks*) [2]. Siiski ei saa olla kindel, et kõigile kättesaadavad vabavaralised tarkvarad on piisavalt usaldusväärsed.

Käesoleva bakalaureusetöö peaesmärgiks on analüüsida, kas vabavaral põhinevat võrgumudeli tarkvara saab usaldusväärselt kasutada elektrivõrgu modelleerimisel ning milliste eripäradega tuleks arvestada. Töö käigus soovitakse leida lahendus järgnevatele uurimisküsimustele:

- Välja selgitada, kas vabavaralises tarkvaras PyPowSyBI on võimalik usaldusväärselt elektrivõrgu püsitalitust modelleerida.
- Võrrelda, kui täpsed tulemused saab vabavaraline Pythoni programmeerimiskeele teek PyPowSyBI, võrreldes klassikalise PSS/E arvutustarkvaraga samade lähteandmete puhul.
- Analüüsida, kuidas käitub Eesti 330/110 kV elektrisüsteem erinevate stsenaariumite korral püsitalituses aastal 2030.

Käesoleva töö raames koostati Eesti elektrivõrgu ekvivalentse püsitalituse mudelid 2030. aasta raamistikus kahes erinevas tarkvaras- PSS/E ning PyPowSyBI, kasutades samu lähteandmeid. Valiti neli erinevat püsitalituse stsenaariumit, mille alusel teostati võimsusvoogude arvutus ning ühe stsenaariumi korral lisaks ka N-1 analüüs. N-1 kriteerium viitab sellele, et elektrisüsteemi töö säiliks ka pärast ühe olulise võrguelemendi väljalülitamist [3]. Saadud tulemusi võrreldi ning analüüsiti.

Eesti 330/110 kV elektrivõrgu modelleerimisel kasutati vabalt kättesaadavaid andmeid ning vajadusel tehti lihtsustusi või eeldusi. Põhilisteks allikateks parameetrite leidmise puhul olid kõige uuem Eleringi arengukava [4], liitumisvõimsuste kaart e-Gridmap [5] ning Riigihangete register [6].

Bakalaureusetöö sisu osa koosneb kolmest peatükist. Teises peatükis räägitakse elektrivõrkude modelleerimisest ning võrguarvutustarkvaradest, keskendutakse kahele tarkvarale- PSS/E ning PyPowSyBl. Kolmandas peatükis kirjeldatakse Eesti 2030. aasta põhivõrgu lähteandmete kogumist, ekvivalentse mudeli loomist, valitud stsenaariumeid ning antakse ülevaade mudeli püsitalitusest. Neljandas osas võrreldakse kahe tarkvara tulemusi ja analüüsitakse neid ning tuuakse välja järeldused. Lisades on toodud võrgumudeli koostamisel kasutatud andmed- ülekandeliinide loend, tootmise ning tarbimise andmed stsenaariumite kaupa ja mastide joonised.

võtmesõnad: PyPowSyBl, PSS/E, võrguarvutustarkvara, elektrisüsteemi püsitalitus, bakalaureusetöö

2 ELEKTRIVÕRGU MODELLEERIMINE

Käesolev peatükk kirjeldab elektrivõrgu modelleerimise ja võrguarvutuste põhiaspekte ning tuuakse välja erinevad arvutustarkvarad, mis võimaldavad teostada võrguarvutusi. Tuuakse välja nii vabavaralisi kui ka tasulisi tarkvarasid ja selgitatakse täpsemalt käesoleva bakalaureusetöö raames kasutatavatest tarkvaradest PSS/E ja PyPowSyBI.

Klassikaliste võrguarvutustarkvarade kasutamine elektrivõrkude modelleerimisel toob esile nende kulukuse. Võimekate arvutustarkvarade litsentside hinnad võivad maksta üle kümne tuhande euro aastas. Tallinna Tehnikaülikooli elektrisüsteemide uurimisrühmas on laialdaselt kasutuses võrguarvutusteks PSS/E [1] tarkvara. Iga-aastane litsentsi maksumus ajendas uurima alternatiivseid lahendusi. Üheks selliseks alternatiiviks Pythoni programmeerimiskeele teek PyPowSyBI [2], mis on vabavaraline tarkvara võrguarvutuste teostamiseks. Siiski on vabavaraliste tarkvarade puhul oluliseks küsimuseks nende usaldusväärsus.

Varasemalt on kahe erineva tarkvara tulemuste erinevusi uuritud artiklis [7]. Uuriti võimsusvoo tulemuste erinevusi PSCAD (inglise keeles *power systems computer aided design*) [8] mudeli ning MATLAB (inglise keeles *matrix laboraory*) [9] tarkvaras koostatud arvutuste tarbeks tehtud skripti tulemusi. Analüüs teostati 30 sõlmega mudeli põhjal ning tekkivad erinevused olid kuni 5%. Siiski pole antud teemat eriti palju uuritud ning varasemates uuringutes on keskendutud võrguarvutustarkvarade puhul nende arvutuskiirusele ja võimekusele. Pythoni programmeerimiskeele erinevaid vabavaralisi võrguarvutusteeke on uuritud artiklis [10], kus võrreldi arvutuskiirust erinevate Pythoni teekide puhul. Leiti, et võrreldavatest tarkvaradest parim, võttes arvesse kiirust ja võimekust, on Pandapower [11].

2.1 Võrguarvutused ning modelleerimistarkvarad

Võrguarvutused toimuvad üldjuhul iteratiivsel teel. Võrguarvutuste tarbeks on mitmeid erinevaid meetodeid. Arvutusi on võimalik teostada käsitsi, teades põhilisi arvutusvalemeid ning vastavat algoritmi. Lihtsa kolme sõlmega võrgu puhul võib võimusuvoogude käsitsi arvutamine võtta juba aega vähemalt tunni, sest teostada on vaja mitmeid iteratsioone, olenevalt võrgu tüübist. Reaalses elektrivõrgus võib olla sadu

sõlmi ja võrgu konfiguratsioonid võivad olla keerukad, koosnedes erinevatest silmusvõrkudest. Sellise võrgu arvutamine puhtalt käsitsi ei ole otstarbekas.

Üldjuhul on võrguarvutuste jaoks esimeseks etapiks võrguvõrrandite koostamine ning eelistatud on sõlmepinge meetod [12]. Võrguvõrrandite koostamiseks on vajalik koostada esmalt juhtivuste maatriks, mis arvutatakse võrgu lähteparameetrite alusel. Vastavalt sõlmepingemaatriksile on võimalik iga sõlme kohta kirjutada välja võrguvõrrandid. Koostatud võrranditest moodustatakse mittelineaarne võrrandisüsteem. Saadud võrrandisüsteemi on võimalik lahendada erinevatel iteratiivsetel meetoditel.

Püsiseisundi arvutamiseks on erinevad meetodid, kaks kõige levinumat on Gauss-Seideli ning Newton-Raphsoni meetod [12]. Gauss-Seideli meetodi puhul on küll eeliseks, et võrrandisüsteemi koonduvus ei sõltu valitud alglähendist ning lihtne algoritm, kuid puudusteks on aeglane koonduvus ning suur iteratsioonide arv. Antud töö puhul on mõlema tarkvara puhul kasutatud aga hoopis Newton-Raphsoni meetodit, kuna see on saadaval mõlemas kasutatavas tarkvaras. Selle meetodi puhul on eelisteks kiire koonduvus, mis ei sõltu võrgu mõõtmetest. Puudusteks aga on alglähendi valiku mõju lõpptulemusele.

Võrguarvutuste lihtsustamiseks on olemas võrguarvutustarkvarad, mis aitavad sellist protsessi lihtsustada ning teostada arvutusi väga kiirelt. Erinevaid võrguarvutustarkvarasid leidub väga palju. Võrguarvutustarkvarade erinevused tulenevad näiteks nende täpsusest ning detailide lisamise võimekusest.

Tasulistest tarkvaradest, näiteks PSS/E [1] võimaldab teostada arvutusi eelkõige suurte elektrisüsteemide kontekstis ning püsitalituse modelleerimiseks, näiteks PSCAD [8] keskendub just rohkem detailsusele ning dünaamilisele analüüsile. Power World Simulator [13] võrguarvutustarkvara keskendub rohkem graafilisele kasutajaliidesele, kui konsooli teel kasutamisele. Tuuakse veel välja PowerFactory tarkvara, mille kohta on toodud välja, et seda on kasutajal lihtne kasutada ning pakub laialdaselt võimalusi, tuues välja ka erinevaid taastuenergia modelleerimisvõimalusi [14].

Lisaks tasulistele tarkvaradele eksisteerivad ka mitmed vabavaralised võrgu modelleerimistarkvarad. Vabavaralistest lahendustest tuuakse välja eelkõige käesoleva töö raames kasutatav PyPowSyBI, mida on detailsemalt kirjeldatud ülejäärgmises alapeatükis. Lisaks sellele leidub Pythoni programmeerimiskeele teekide hulgas veel teisi lahendusi. Üheks selliseks on Pandapower [11], mis on samuti vabavaraline

tarkvara. Pandapower pakub näiteks peale püsitalituse arvutamise ka lühiste arvutamise võimekust. Lisaks Pythoni programmeerimiskeele teekidele tuuakse välja ka MATLAB [9] tarkvara, millele leidub lisapakett MATPOWER [15]. Sarnaselt eelnevalt välja toodud tarkvaradele pakub MATPOWER samuti peale püsitalituse arvutamise ka muid erinevaid funktsioone, kuid MATLAB ei ole tasuta tarkvara ning sellisel juhul ei saa seda otseselt lugeda vabavaraliseks tarkvaraks.

2.2 PSS/E

PSS/E on klassikaline võrguarvutustarkvara, mille arendajaks on Siemens [1]. Antud töö raames kasutati PSS/E versiooni 34, kuid kõige uuem hetkel saadavalolev versioon on 36. PSS/E on võimekas tarkvara ning selle kasutamiseks tuleb tutvuda selle erinevate manuaalidega. Vastavalt vajadusele, mis programmi funktsiooni on vajalik kasutada tuleks tutvuda just konkreetse manuaaliga, kuna need on suhteliselt mahukad. Programmi üldise kasutamise kohta saab leida infot tarkvara kasutamise manuaalist POM (inglise keeles *program operation manual*) [16].

PSS/E võimaldab teostada nii staatilist võimsusvoogude analüüsi kui ka dünaamilist analüüsi. Võimalik on teostada ka N-1 ja N-2 analüüse, kuid võimalusi lisaks neile on veel mitmeid. Elementide modelleerimisel kasutajaliideses on erinevate parameetrite määramiseks laialdane valik. Lisaks Newton-Raphsoni iteratiivsele meetodile, võimaldab PSS/E kasutada ka arvutustes Gauss-Seideli meetodit. Lisaks on võimalik ka arvutusi teostada kasutades mõlemat arvutusmeetodit, alustades näiteks ühega ning minnes üle teisele meetodile peale paari iteratsiooni.

Tarkvara on võimalik kasutada ka läbi Pythoni programmeerimiskeele rakendusliidese. Selle rakendusliidese kasutamist on kirjeldatud API (inglise keeles *application programming interface*) juhendis [17]. Kasutaja poolt loodud skriptidega on võimalik lihtsustada nii algandmete sisestamist kui ka tulemuste kättesaamist, samuti on võimalik erinevaid protsesse automatiseerida. PSS/E graafilises kasutajaliideses on võimalik luua erinevaid võrguskeeme, kas automaatseid või manuaalselt kasutaja enda poolt. Loodud skeemid võivad näidata nii tervet võrku kui ka konkreetset sõlme.

Andmete sisestamise poolest on valikuid mitu. Võimalus on sisestada soovitud andmed tabeli kujul olemasolevasse aknasse, kuid eksisteerib ka võimalus kasutada konsooli, et lugeda andmed soovitud failist ning selle abil vähendada andmete sisestamise vaeva, eriti kui on vajalik sisestada suures koguses algandmeid.

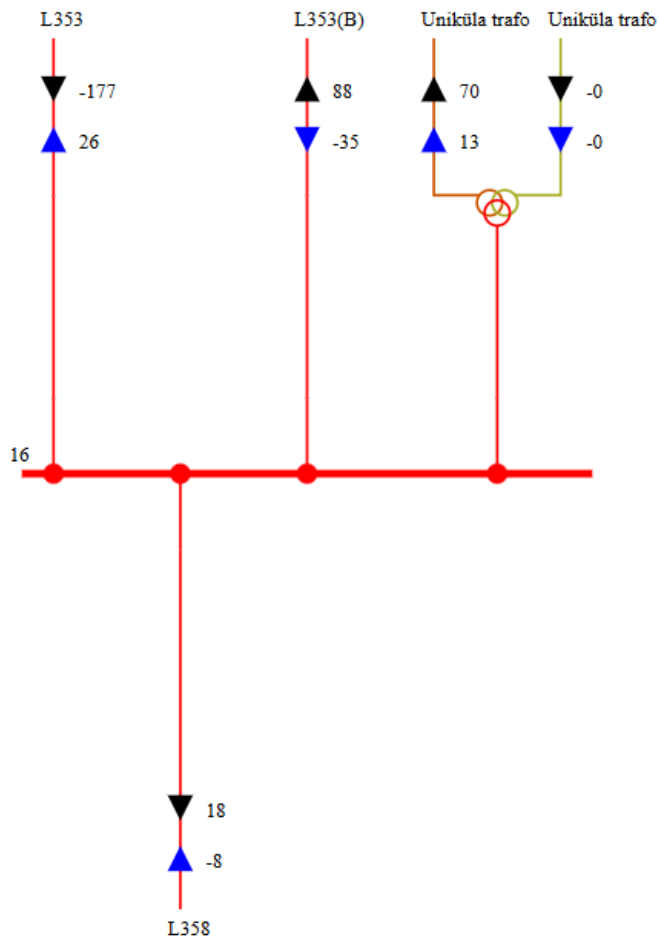
PSS/E tarkvara pakub küll palju võimalusi, kuid selle professionaalse kasutamise eest tuleb maksta, kui ei kasutata just akadeemilist varianti õppetöö raames. Selleks, et täismahus programmi kasutada ilma piiranguteta, tuleb PSS/E litsentsi eest tasuda iga aastast tasu, mis on üle kümne tuhande euro. Selleks, et hoida kokku iga-aastaselt makselt vaadeldakse vabavaralist alternatiivi.

2.3 PyPowSyBI

PyPowSyBI [2] on Pythoni programmeerimiskeelel põhinev võrguarvutuste teek, mis on arendatud Java programmeerimiskeele teegist PowSyBI (inglise keeles *Power System Blocks*) [18]. PowSyBI on osa LF Energy (*The Linux Foundation Energy*) projektist, mis arendab erinevaid vabavaralisi lahendusi. PowSyBI on kasutatud ka Baltic RCC (inglise keeles *Baltic regional coordinator center*) poolt. Baltic RCC on Balti elektrisüsteemi operaatoritele teenuseid pakkuv ettevõtte, mis teostab erinevaid analüüse ning prognoose Balti elektrisüsteemi kohta [19].

PyPowSyBI pakub võrgumodelleerimiseks mitmeid erinevaid lahendusi ning on suhteliselt võimekas. Tarkvara dokumentatsioon [2] on avalikult kättesaadav veebis. Lisaks tavalisele võimsusvoogude arvutamisele staatilise mudeliga, on võimalik teostada ka dünaamilist analüüsi. PyPowSyBI võimaldab veel ka analüüsida lühiseid ning teostada elektrivõrgu N-1 ja N-2 analüüse. Antud bakalaureusetöö raames keskendutakse staatilise mudeli võimsusvoogude arvutamisele ning N-1 analüüsile vahelduvvoolu puhul. Võimsusvoogude arvutamisel on pakutud kaks meetodit: Newton-Raphson ning Newton-Krylov, mis on kombineeritud erinevatest iteratiivsetest meetoditest, aga käesolevas töös täpsemalt ei uurita [20].

PyPowSyBI kasutamine eeldab baastadmisi Pythoni programmeerimiskeelest, kuna kogu protsess toimub kasutaja poolt loodud skriptide teel. Vastupidiselt PSS/E tarkvarale, ei ole PyPowSyBI teegil graafilist kasutajaliidest, kuid erinevaid võrgu ning sõlme skeeme on siiski võimalik luua ja kuvada, aga kõik toimub koodi teel. Alljärgnevalt joonisel 2.1 on toodud automaatselt koostatud Uniküla 330 kV sõlme skeem, mudeli kohta. PyPowSyBI kasutamisel on suureks abiks erinevad teised Pythoni programmeerimiskeele teegid, mis aitavad modelleerimist lihtsustada, eelkõige kui on tegemist suurte andmemahitudega.



Joonis 2.1 Uniküla 330 kV sõlme automaatselt koostatud skeem PyPowSyBI tarkvaras

PyPowSyBI pakub ka võimalust eksportida teiste võrguarvutustarkvarade lähteandmete faile, et arvutused ning analüüs teostada just Pythoni skriptiga kasutades PyPowSyBI tarkvara. Sisendandmete kontrollimiseks võimaldab PyPowSyBI ka mudeli lähteparameetreid kuvada kas tabelina, kasutades Pythoni programmeerimiskeele tavakäsklusi, või eksportida näiteks csv-tüüpi (inglise keeles *comma separated value*) failina.

Lisavõimaluste hulgas on veel võimalus kasutada PyPowSyBI teeki Jupyteri arenduskeskkonnas [21], mis annab juurde lisafunktsioone. Jupyteri arenduskeskkond võimaldab lisaks Pythoni programmeerimiskeele tavafunktsioonidele ka visualiseerida andmeid ning väljundeid, samuti käivitada koodi osade kaupa. PyPowSyBI poolt annab Jupyteri keskkond juurde võimaluse kuvada loodud mudeli sõlmed ning liinid geograafilisel kaardil, kui on alajaamadele määratud koordinaadid. Sellisel juhul on võimalik uurida võrgumudelit geograafilise kaardi peal ning interaktiivselt ringi liikuda nagu võimaldab PSS/E tarkvara, kui kasutaja on otsustanud luua graafilise võrgu joonise, mida antud töö raames ei tehtud ega uuritud.

3 EESTI 2030 PÕHIVÕRGU MUDEL

Elektrisüsteemi püsitalituse mudelid luuakse selleks, et analüüsida elektrivõrke, vaadeldes nende varustuskindlust ning jälgides pingeid sõlmedes, võimusvoogude jagunemist ning liine läbivaid voolusid, et jälgida liinide koormamist. Mudelite alusel on võimalik teostada erinevaid analüüse. Elektrivõrgu töökindlust on võimalik hinnata N-1 ja N-2 analüüsidega. Nende puhul jälgitakse, kuidas käitub võrk erinevate võrgu elementide väljalülitamisel. N-1 analüüsi puhul vaadeldakse läbi kõik juhud, kui lülitub välja üks suvaline võrgu element ning N-2 analüüsi puhul kaks suvalist võrguelementi.

Käesolevas töös sooviti teostada tarkvarade võrdlus just reaalsel parameetritel põhineva võrgumudeli alusel. Terve ühe riigi või piirkonna elektrivõrgu modelleerimine on aeganõudev protsess, mis nõuab palju tööd: alates andmete kogumisest, parameetrite arvutamisest kuni parameetrite sisestamise ja modelleerimisprotsessini, samuti ka arvutuste teostamine. Eesti 330/110 kV 2030. aasta ekvivalentse elektrivõrgu mudeli koostamisel lähtuti avalikult kättesaadavatest andmetest. Vajadusel tehti lihtsustusi või eeldusi, kui polnud võimalik andmeid leida.

Kirjeldatud on täpsemalt protsessi, kuidas toimus lähteandmete kogumine. Lisaks on välja toodud, kuidas arvutati elektriliinide ja trafode parameetreid. Kirjeldatud on analüüsitava stsenaariumite valikut ning koostamist. Lõpuks on toodud ülevaade võrguarvutuste teostamisest ning püsitalituse analüüsist.

3.1 Lähteandmed

Elektrivõrgu mudeli koostamiseks otsiti andmeid eelkõige veebist. Eesti põhivõrgu mudeli koostamisel lähtuti 2030. aasta lõpuseisust. Eelkõige on lähtutud Eleringi liitumisvõimsuste kaardi e-Gridmap [5] järgi. Kaardirakendus pakub valikut 2029+, mis on koostatud mudeli lähteandmete aluseks liinide osas. Veebikaart võimaldab mõõta vahemaid, mida kasutati ülekandeliinide pikkuste määramiseks.

Lisaks kaardirakendusele e-Gridmap, võeti võrgu modelleerimisel aluseks Eleringi poolt iga-aastaselt avaldatav arengukava. Aluseks võeti kõige uuem avaldatud elektrivõrgu arengukava 2025-2034 [4]. Arengukava annab ülevaate plaanitud arengutest ning tulevikuvaadetest Eesti elektrisüsteemi kohta. Arengukavas on välja toodud investeeringute plaanid, mida kasutati lähteandmeteks. Investeeringuid on toodud

kolme tüüpi- kindlad, planeeritavad ning perspektiivsed investeeringud. Mudeli lähteandmete otsimisel arvestati kindlate ja planeeritavate investeeringutega. Kindlad investeeringud on sellised, millele on Eleringil rahastus olemas ning väga suure tõenäosusega hakatakse projektiga pihta. Planeeritavate investeeringute korral on veel investeerimisotsus puudu, kuid plaanitakse lähimal ajal leida rahastus ja liikuda projektiga edasi, selliste investeeringute puhul on projekti käivitamine küll tõenäoline, kuid mitte nii tõenäoline kui kindla investeeringu puhul. Perspektiivseid investeeringuid mudeli koostamisel arvesse ei võetud, kuna nende vajadus vaadatakse paari aasta pärast uuesti üle ning seejärel tehakse otsus kas sellele rahastust hangitakse või mitte.

Andmeid otsiti ka Riigihangete registrit [6], täpsemalt otsiti erinevate alajaamade skeeme. Leitud skeemid andsid infot alajaamas paiknevatest erinevatest seadmetest ning nende parameetritest. Leiti infot näiteks põikreaktorite ning trafode kohta. Otsides andmeid hankedokumentidest, võeti aluseks kõige uuem saadavalolev hange vastava alajaama kohta, kus leidis soovitud info. Lähteandmete puhul tehti lihtsustusi olukordades, kus andmeid ei olnud võimalik leida. Sellisel juhul tehti parameetrite valikul vastavad eeldused.

3.1.1 Ülekandeliinid

Põhivõrgus kasutatavate juhtmetüüpide kohta leiti infot Eleringi hankedokumentide seast. Kasutatavate juhtmete tabel on üldjuhul hankedokumentide tehniliste nõuete all. Alljärgnev tabel 3.1 kujutab põhivõrgus kasutatavaid juhtmetüüpe ning nende pingestmeid. Konkreetne tabel pärineb õhuliini L300 rekonstrueerimise hankedokumentide seast [22].

Tabel 3.1 Põhivõrgus kasutatavate juhtmete tüübid [22]

U_n (kV)	Juhtmeid faasis	Juhtme mark	Max töötemperatuur °C	Max kestev °C	Max lühis °C
330	3	402-AL1/52-ST1A	80	80	200
110	1	402-AL1/52-ST1A	80	80	200
110	2, 1	242-AL1/39-ST1A	80	80	200
110	1	152-AL1/25-ST1A	80	80	200

Eelneva tabeli põhjal selgub, et kõikidel uutel ehitatavatel 330 kV pingestmel liinidel kasutatakse üldjuhul samasugust juhet. Parameetrite arvutamiseks võeti aluseks Draka tootekataloog [12], milles leidub juhe ACSR 402/52. Lähteandmete puhul eeldatakse, et kõik hetkel olemasolevad 330 kV ülekandeliinid, mis on kolme lõhisfaasiga, kasutavad seda tüüpi juhet. Selliste liinide puhul, mis on hetkel kahe lõhisfaasiga, aga Eleringi arengukava andmetel on plaanis rekonstrueerida aastaks 2030, eeldatakse et peale

renoveerimist kasutavad need samuti kolme lõhisfaasiga ACSR 402/52 juhet. Sama eeldus tehakse ka uute liinide puhul, mis on plaanis ehitada. Liinid, mis on hetkel kahe lõhisfaasiga ning ei ole infot, et need planeeritakse renoveerida, võetakse lihtsustusena, et kasutusel on samuti ACSR 402/52 juhe, aga kahe lõhisfaasiga. Parameetrite arvutamisel on eeldatud, et kõik liinid on üheahelalised ning ühisriputuse mõju ei arvestata. Liinide geomeetria on toodud tabelis 3.2 [23]. Sellised mõõtmed võeti aluseks kõikide 330 kV liinide puhul.

110 kV pingel on kasutusel erinevaid juhtmeid. Parameetrite arvutamiseks on eeldatud samuti Draka poolt pakutavad juhtmed ACSR 242/39 ning ACSR 152/25 [12]. Eeldati, et liinid kasutavad ACSR 152/25 juhet, kui ei ole muud saadavalolevat infot. Edaspidine tuvastus käis Google Maps tänavavaate [24] ning Maa-ameti kaldaerofotode [25] alusel. Kui oli näha, et 110 kV liinid on ühisriputuses 330 kV liinidega eeldati, et kasutusel on ACSR 242/39 juhe, olenevalt kas ühe või kahe lõhisfaasiga. Kui Eleringi arengukava alusel [4] on välja toodud liini planeeritav rekonstrueerimine tulevikus ning e-Gridmapis [5] on toodud välja, mis juhe valitakse liinile peale rekonstrueerimist, siis on see ka arvesse võetud.

110 kV õhuliinide puhul võeti aluseks masti geomeetria vastavalt tabelile 3.2 [12]. Valitud geomeetriat on kasutatud kõikide 110 kV liinide parameetrite arvutamisel, olenevalt sellest, mis juhtme tüüp oli kasutusel. Samuti ei ole arvestatud ühisriputuse mõjuga. 110 kV kaabelliinide puhul on eeldatud, et kõik kasutavad sama tüüpi kaablit-AHXCHBMK-W 64/110(123)kV 1x1600/35. Eeldatud, et kaablid on kolmnurkpaigutuses. Kaabli parameetrid pärinevad tootja kataloogist [26]. Viimaks on ka olemas kombineeritud õhu- ja kaabelliinid, mille korral on arvestatud kaabli osa ning õhuliini osa pikkusega ning nende parameetrid on summeeritud.

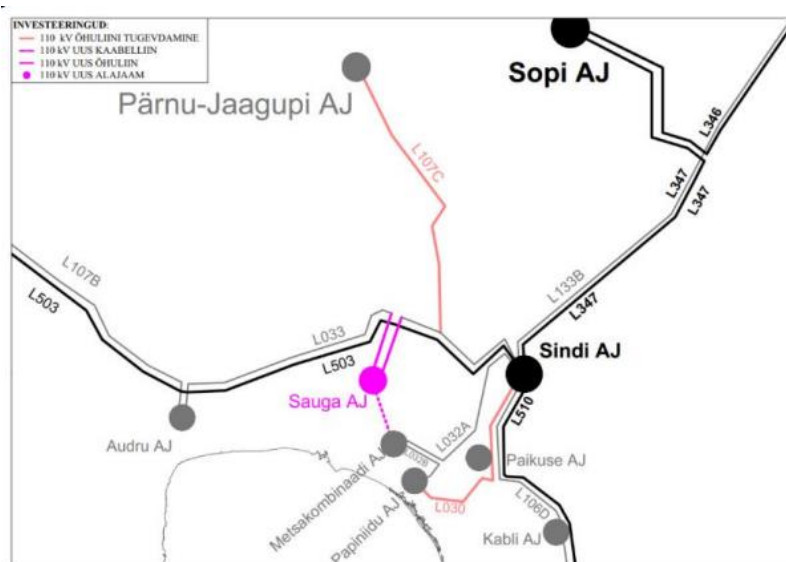
Liinide täielik tabel koos parameetrite ja juhtme tüübiga on toodud lisa 2. Liinide tähistes olevad sulud viitavad sellele, et nendes olev täht on lisatud selleks, et igale liinile oleks unikaalne tähis, sest osadel liinidel on sama tähis, sellegipoolest, et nad on seotud rohkem kui kahe alajaamaga. Liinide geomeetria jaoks valitud mastide joonised asuvad lisa 1. Liini parameetrite arvutamist on täpsemalt kirjeldatud järgmises alapeatükis.

Tabel 3.2 330 ja 110 kV liinide geomeetria [12], [23]

U (kV)	Lõhisfaaside kaugused (m)	Faasidevahelised kaugused		
		D_{AB} (m)	D_{BC} (m)	D_{AC} (m)
330		9,82		19,64
110		7,50		8,06

3.1.2 Alajaamad

Hetkel olemasolevate alajaamade asukohtade määramisega probleeme ei tekkinud, kuid aastaks 2030 on plaanitud rajada uusi alajaamasid. Osade planeeritavate alajaamade asukoht on toodud ära e-Gridmap kaardil [5], mille abil on võimalik tuvastada rajatava alajaama asukoht suhteliselt täpselt. Uued rajatavad alajaamad, mille kohta ei ole täpset asukohta toodud, nende asukoht määrati ligikaudselt. Selliste alajaamade kohta on toodud Eleringi arengukavas [4] alajaamas ligikaudne kaart. Näitena on toodud joonisel 3.1 kaart Sauga alajaama ligikaudsest paiknemisest, aga täpselt ei ole võimalik selle asukohta määratleda. Kui alajaama asukoht on määratud ligikaudselt, tähendab see, et selle alajaamaga seonduvate liinide pikkused on samuti ligikaudsed. Demonteeritavatest alajaamadest saab välja tuua ainult Pargi 110 kV alajaama, mis on plaanis asendada teises kohas paikneva Jõhvi alajaamaga. Uued planeeritavad alajaamad on toodud alljärgnevas tabelis 3.3.



Joonis 3.1 Planeeritava Sauga alajaama asukoht Eleringi arengukava andmetel [4]

Tabel 3.3 Rajatavad Eleringi alajaamad aastaks 2030, arvestades kindlaid ning planeeritavaid investeeringuid [4], [5]

Alajaam	Pingeaste(d) U (kV)	Allikas	Valmib	Asukoht
Uniküla	330/110	e-Gridmap	2028	Täpne
Lihula	330	e-Gridmap	2026	Täpne
Jõhvi	110	Arengukava	2028	Ligikaudne
Kotinuka	110	Arengukava	2030	Ligikaudne
Sauga	110	Arengukava	2030	Ligikaudne
Lemmatsi	110	Arengukava	2029	Ligikaudne
Pärna	110	Arengukava	2028	Ligikaudne

3.2 Elektrivõrgu parameetrid

Mudeli tarbeks parameetrite arvutamisel on aluseks võetud klassikalised võrguarvutusvalemid. Koostatud mudeli tarbeks on vajalik arvutada ülekandeliinide parameetrid- aktiivtakistus, reaktiivtakistus ning mahtuvusjuhtivus. Aktiivjuhtivust, koroonakadude näol ei ole arvesse võetud. Trafode puhul on samuti arvutatud nii aktiivkui ka reaktiivtakistus ning aktiiv- ja reaktiivjuhtivus. Reaktorite ja kondensaatorite puhul arvutatakse ainult reaktiivjuhtivust ning aktiivjuhtivusest tingitud kadusid ei ole samuti arvestatud. Järgnevalt on kirjeldatud mudeli parameetrite tarbeks kasutatud valemid.

Liini aktiivtakistuse leidmisel tuleb arvesse võtta nii lõhisfaaside arvu kui ka seda, et vahelduvvoolutakistus on juhtmetel umbes 2% suurem alalisvoolutakistusest [12], mis on tavaliselt tootja andmelehel toodud. Samuti on tootja kataloogis üldjuhul antud aktiivtakistuse väärtus 20°C juures. Selleks, et teisendada aktiivtakistuse väärtus teisele temperatuurile, kasutatakse valemit 3.1 [12], [42].

$$r(T) = r_0[1 + 0,004(T - T_0)] \quad (3.1)$$

kus $r(T)$ – aktiivtakistus pikkusühiku kohta temperatuuri T juures ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$),

r_0 – aktiivtakistus pikkusühiku kohta temperatuuri T_0 juures ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$),

T – temperatuur, millele juhtme aktiivtakistus taandatakse ($^{\circ}\text{C}$),

T_0 – temperatuur, mille juures juhtme aktiivtakistus on antud ($^{\circ}\text{C}$).

Ülekandeliini reaktiivtakistuse määrab ära faasijuhmete paiknemine ning nende vahelised kaugused, samuti ka lõhisfaaside omavahelised kaugused. Sama olukord on liini mahtuvusjuhtivusega. Liini reaktiivtakistuse väärtuse leidmiseks pikkusühiku kohta kasutatakse valemit 3.2 ning liini mahtuvusjuhtivuse leidmiseks valemit 3.3 [42].

$$x = 0,144 \log \frac{D_k}{r_{j \text{ ekv}}} + \frac{0,0157}{n} \quad (3.2)$$

$$b = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log \frac{D_k}{r_{j \text{ ekv}}}} \quad (3.3)$$

kus x – reaktiivtakistus pikkusühiku kohta ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$),

b – mahtuvusjuhtivus pikkusühiku kohta ($\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$),

D_k – faasidevaheline keskmine geomeetriline kaugus (m),

$r_{j\text{ ekv}}$ – faasijuhi ekvivalentne raadius (m),

n – osajuhtmete arv lõhisfaasijuhis.

Liinide geomeetriast tulenevalt arvutatakse faasidevaheline keskmine geomeetriline kaugus vastavalt valemile 3.4 ning faasijuhi ekvivalentne raadius vastavalt valemile 3.5 [42].

$$D_k = \sqrt[3]{D_{AB}D_{BC}D_{CA}} \quad (3.4)$$

kus D_{AB} – faaside A ja B vaheline kaugus (m),

D_{BC} – faaside B ja C vaheline kaugus (m),

D_{CA} – faaside C ja A vaheline kaugus (m).

$$r_{j\text{ ekv}} = \sqrt[n]{a_k^{n-1}r_j} \quad (3.5)$$

kus r_j – osajuhtme raadius (m),

a_k – osajuhtmevaheline keskmine geomeetriline kaugus lõhisfaasijuhis (m).

Mudelis kasutatavate juhtmete ja kaablite parameetrid pikkusühiku kohta on toodud tabelis 3.8. Parameetrid on arvutatud eelnevalt toodud valemite põhjal.

Tabel 3.8 Mudelis kasutatud kaablite ja juhtmete parameetrid pikkusühiku kohta

Juhe/kaabel	U (kV)	R ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	X ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	B ($\mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$)	C ($\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$)

Trafo parameetrid arvutatakse tühijooksu- ja lühiskatse tulemusena saadud väärtuste alusel. Trafo aktiivtakistus R (Ω) arvutatakse vastavalt valemile 3.6, reaktiivtakistus X (Ω) valemi 3.7 alusel, aktiivjuhtivus G (S) vastavalt valemile 3.8 ning reaktiivjuhtivus B (S) valemi 3.9 alusel [42].

$$R = \frac{\Delta P_l U_N^2}{S_N^2} \quad (3.6)$$

$$X = \frac{u_{l\%} U_N^2}{100 S_N} \quad (3.7)$$

$$G = \frac{\Delta P_t}{U_N^2} \quad (3.8)$$

$$R = \frac{I_{t\%} S_N}{100 U_N^2} \quad (3.9)$$

kus U_N – trafo nimipinge (V),

S_N – trafo näivvõimsus (VA)

ΔP_l – lühiskadu (W),

$u_{l\%}$ - lühispinge suhe nimipingesse,

ΔP_t – tühijooksukadu (W),

$I_{t\%}$ - tühijooksuvoolu suhe nimivoolu.

3.3 Valitud stsenaariumid

Eesti võrgumudeli analüüsimiseks ja võrreldavate tulemuste saamiseks koostati neli erinevat stsenaariumit. Koostatud stsenaariumid põhinesid suvistel ja talvistel miinimum ning maksimum olukordadel. Stsenaariumite jaoks on proovitud prognoosida nii tootmise kui ka tarbimise muutust, saadavalolevate andmete põhjal.

3.3.1 Tarbimine

Stsenaariumite koostamisel on arvesse võetud Eleringi arengukava [4] poolt kirjeldatud tipukoormuste kasvu. Koormuste määramisel lähtuti 2024. aasta suvistest ja talvistest koormustest ning arvestati 20% tarbimise kasvu, vastavalt Eleringi arengukavale. Nii suve kui ka talve kohta valiti kaks ekstreemsemat stsenaariumit- minimaalne ning maksimaalne tarbimine. 2024. aasta koormuste info pärineb Elering Live [43] andmetest. Alljärgnevalt tabelis 3.9 on toodud iga stsenaariumi kogu tarbimisvõimsus.

Tabel 3.9 Valitud stsenaariumid Eesti võrgumudeli jaoks

Stsenaarium	P (MW)	
	2024	2030
Talvine maksimum	1582	1898
Talvine miinimum	541	649
Suvine maksimum	1109	1331
Suvine miinimum	515	618

Koormuste jaotumine Eesti mudelis põhineb trafode näivvõimsusel ning summaarne koormus on vastavalt ära jaotatud kõikide 110 kV alajaamade vahel. Selleks otsiti Riigihangete registrist [6] erinevate alajaamade skeeme ning arvatati kokku summaarne trafode näivvõimsus iga alajaama kohta. Arvestati trafosid, mis on Eleringi ja Elektrilevi vahel, tüüpiliselt 110 kV ja keskpinge vahel. 330 kV ja 110 kV pingestmete vahelisi trafosid arvesse ei võetud. Juhul kui ei leitud infot alajaamas paiknevatest trafodest, võeti lihtsustusena selle alajaama trafo näivvõimsuseks 10 MVA, mis on suhteliselt levinud trafo väiksemate alajaamade puhul. Kui iga alajaama kohta oli välja toodud trafode kogu näivvõimsus, arvatati kokku kõikides alajaamades paiknevate trafode summaarne näivvõimsus. Selle põhjal oli võimalik välja arvutada iga konkreetse alajaama suhe kõikide süsteemi trafode summaarsesse koguvõimsusesse ning suhte alusel koormus alajaamas.

Eeldati, et reaktiivvõimsus moodustas igas alajaamas 30% aktiivvõimsusest. Sellisel juhul tuleb võimsustegur umbes 0,96. Selle valiku tingis arutelu juhendajaga ning vastavalt võrgueeskirja poolt toodud nõuded tarbijatele, kus üldjuhul ei tohi tarbija poolne koormuse võimsustegur olla väiksem kui 0,9 [44]. Selle põhjal tehti vastav eeldus. Koormuste jagunemise tabel iga alajaama kohta on toodud lisa 3. Lühike näide koormuste määramise meetodikast on toodud tabelis 3.10 koguvõimsuse 100 MW jagunemine nelja alajaama vahel.

Tabel 3.10 Koormuste jagunemise määramise meetodika näide

Alajaam	Trafode summaarne näivvõimsus S (MVA)	Suhe summaarsesse näivvõimsusesse	P (MW)
1	80	0,426	42,6
2	56	0,298	29,8
3	32	0,170	17,0
4	20	0,106	10,6
Kokku	188	1	100

3.3.2 Tootmine

Tootmise modelleerimisel on lähtutud Eleringi arengukavas toodud andmetest [4], kus on välja toodud nimekiri Eestis paiknevatest tootmisvõimsustest. Kõik tootmisüksused, mis on 5 MW või suuremad on tootmise stsenaariumite koostamisel arvesse võetud. Langetatud on Eesti elektrijaama tootmisvõimsust 200 MW peale ning ära on jäetud Balti elektrijaam, vastavalt Eleringi varustuskindluse analüüsi prognoosile [45]. Tootmisvõimsusena on arvesse võetud ka Kiisa avarielektrijaam. Tuuleelektrijaamade võimsused on jäetud samaks. Mudelisse tootmisvõimsuste lisamisel on eeldatud, et tootmisüksus on ühendatud kõige lähememal olevasse alajaama 110 kV pingestmele, erandid on alajaamade puhul, kus 110 kV pingestet ei ole, siis on ühendatud tootmisüksus 330 kV pingestmele.

Päikese tootmisvõimsuste andmed on saadaval maakonna kaupa. Lihtsustusena on valitud igas maakonnas üks alajaam, kuhu on ühendatud kogu selles maakonnas asuv päikesetootmine. Lisaks on tootmisvõimsusi konservatiivselt suurendatud 20%. Reaktiivvõimsuse võimekuse poolest on generaatorite piirideks võetud 33% aktiivvõimsusest kõikide tootmisüksuste puhul, vastavalt võrgueeskirjale [44]. Erinevat tüüpi tootmisüksustel on küll erinevad piirid, kuid lihtsustusena on see kõigile generaatoritele samaks jäetud.

Mudelisse on lisatud ka mõlemad alalisvoolukaablid Estlink 1 ja Estlink 2, võimsusega 350 ja 650 MW vastavalt [45]. Selleks, et alalisvoolukaablid mudelisse lisada, tehti nende jaoks eraldi sõlm, koos generaatoriga või koormusega, väljendades kas importi või eksporti vastavalt. Mõlemad sõlmed ühendati ideaalse liiniga vastava alajaamaga, kuhu need ühendatud on. Estlink 1 Harku alajaama ning Estlink 2 Püssi alajaama, kusjuures mõlemad loodud sõlmed on 330 kV nimipingega. Stsenaariumite puhul on eeldatud, et talvel toimub nendega maksimaalne import ning suvel maksimaalne eksport. Kui võrgus on võimsustest puudu võetakse puudujääk Lätist ning kui ülejääk, siis eksporditakse Lähti.

Läti sõlm on valitud süsteemisõlmeks, mis hoiab tasakaalu võimsuste puudu- või ülejäägi korral mudelis. Generaator süsteemisõlmes on ühendatud 330 kV pingestmele. Kuna Eesti ja Läti vahel on ka peale kolme 330 kV liini ka kaks 110 kV liini, siis on tekitatud ka Läti 110 kV sõlm, ning nende vahele kahemähiseline trafo.

Vastavalt stsenaariumile on valitud kui palju on saadavalolevat tootmisvõimsust erinevat tüüpi elektrijaamades on vaadates maksimaalset tootmisvõimsust. Valikul on lähtutud sarnaste päevade tootmisandmetest Elering Live [43] järgi. Tootmisüksuste

võimekused stsenaariumide kaupa on toodud tabelis 3.11 ning täpsemalt tootmisüksuste kaupa on toodud lisas 4.

Tabel 3.11 Saadavalolevad tootmisvõimused vastavalt stsenaariumile

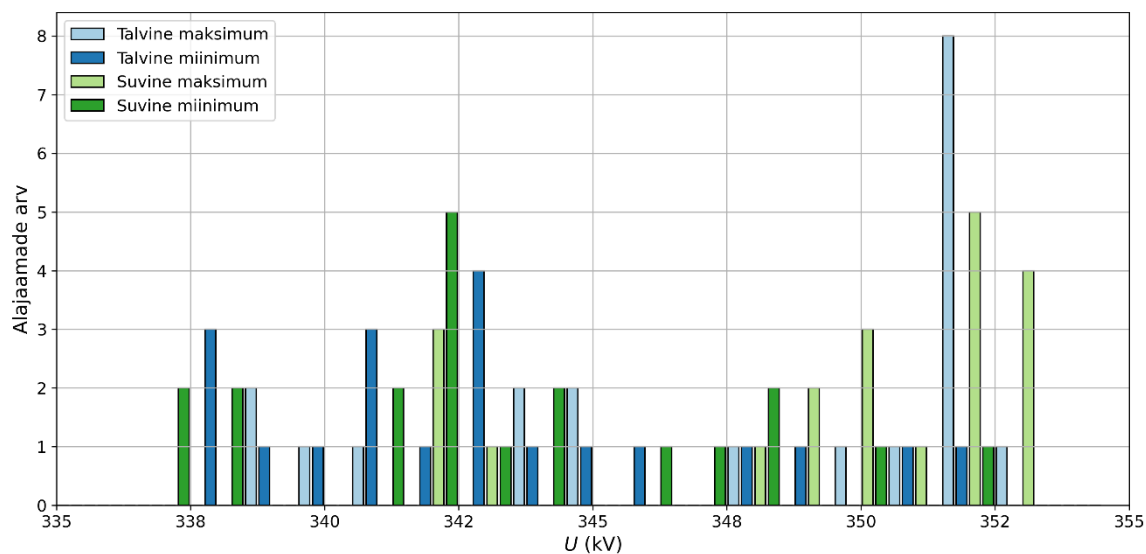
Elektrijaama tüüp	Saadavalolev võimsus maksimaalsest võimekusest			
	Talvine maksimum	Talvine miinimum	Suvine maksimum	Suvine miinimum
Soojusjaamad	100%	100%	100%	100%
Tuulejaamad	0%	50%	10%	10%
Päikesejaamad	0%	0%	25%	25%
Estlink 1 ja 2	100%	100%	0%	0%

3.4 Mudeli püsitalituse analüüs

Mõlemas tarkvaras koostatud võrgumudel koosnes 208 sõlmest ning 266 liinist. Mudelite koostamisele järgnes kahes erinevas tarkvaras võrguarvutuste teostamine. Sellise suurusega võrgumudeli koostamine on ajamahukas protsess, arvestades et mudel tuli koostada kahes erinevas tarkvaras ning jälgida algandmete samasust. Samadel algtingimustel teostati iga stsenaariumi korral nii PSS/E kui ka PyPowSyBI mudeliga võimsusvoogude arvutus. Lisaks teostati N-1 analüüs talvise maksimumi stsenaariumiga.

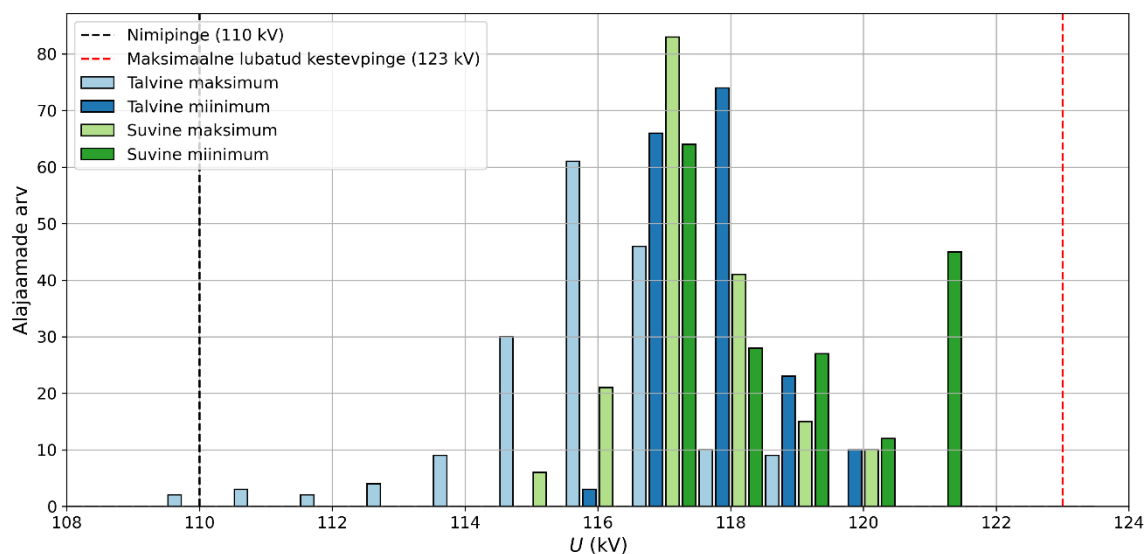
Võrguarvutuse teostamisel optimeeriti reaktoritega generaatorite reaktiivvõimsuse tootmist ning tarbimist. Püsitalituse analüüsil vaadeldi eelkõige sõlmetes olevaid pingeid. Kondensaatorpatareide kasutamine võrgus ei olnud vajalik, kuna pinged olid nimipingest kõrgemad, aga siiski lubatud piirides. Samuti oli näha, et valdav osa generaatoritest tarbisid reaktiivvõimsust kõikide stsenaariumide korral. Vastavalt standardile EVS-EN IEC 60038:2012 [46] on 330 kV nimipingega võrgus suurim lubatud kestevpinge 362 kV ning 110 kV võrgus 123 kV.

330 kV võrguosas paikevate sõlmede pinged on toodud joonisel 3.2. Näib, et pinged on lubatud piiride sees ning ei ole eriti piiri lähedal. Siiski on kõik pinged nimipingest tunduvalt kõrgemad. Erinevate stsenaariumite puhul ei ole otsest korrelatsiooni pingete muutumise osas näha. Siiski ilmneb minimaalse stsenaariumi korral, et valdav osa pingetest on kõrgemad, kui üldiselt. Siiski on ka talvise maksimaalse stsenaariumi korral pinged kõrgemal poolel. Generaatorid 330 kV võrgus hoiavad pinged 1,07 suhtühikut nimipinge suhtes, mis on umbes 353 kV. Siiski on paljud generaatorid hoopis sõlmede 110 kV poolele ühendatud.



Joonis 3.2 Pinged sõlmedes mudeli 330 kV võrguosas kõikide stsenaariumite korral

110 kV võrguosas olevate sõlmede pinged on toodud joonisel 3.3. Graafikult ilmneb, et pinged võrgus on kõrgemad, kui kogu süsteemi koormus on väiksem. Antud juhul on kõige kõrgemad pinged suvise minimaalse stsenaariumi korral, kus koormus on kõige väiksem ning pinged kõige madalamad talvise maksimaalse stsenaariumi korral, kui koormus süsteemis kõige suurem. 110 kV poolel hoiavad generaatorid samuti pinget 1,07 suhtühikut nimpinge suhtes, mis on 117,5 kV. Mitmete sõlmede pingete väärtused suvise minimaalse stsenaariumi korral on suhteliselt lähedal võrgu suurimale lubatavale kestevpingele.



Joonis 3.3 Pinged sõlmedes mudeli 110 kV võrguosas kõikide stsenaariumite korral

Võrgus pinge hoidmiseks oli suvise ja talvise minimaalse stsenaariumi korral töös valdav osa põikreaktoreid, mis tarbisid liinide poolt genereeritud reaktiivvõimsust. Arvestades veel, et pinged olid suhteliselt lähedale lubatavale maksimaalsele võrgu kestevpingele, on oht, et mõne reaktori rikke või tarbija koormuse vähenemisel tõuseb pinge liiga kõrgele. Seetõttu peaks olema reservis piisavalt reaktoreid või teisi reaktiivvõimsust kompenseerivaid seadmeid. Alljärgnevalt on toodud tabelis 3.12 reaktorite poolt kompenseeritava summaarse reaktiivvõimsuse hulk süsteemis ning kui palju on reaktorite osas reservi iga stsenaariumi korral.

Tabel 3.12 Põikreaktorite poolt kompenseeritav summaarne reaktiivvõimsus ning reservis oleva reaktiivvõimsuse hulk mudelis iga stsenaariumi korral

Stsenaarium	Kompenseeritav reaktiivvõimsus reaktorite poolt Q (Mvar)	Reservis olevate reaktorite summaarne reaktiivvõimsus Q (Mvar)
Talvine maksimum	410	1010
Suvine maksimum	360	1060
Talvine miinimum	760	660
Suvine miinimum	920	500

Kompenseerimise vajadus üldjuhul suureneb, mida väiksem on süsteemi koormus, siiski on antud juhul erandiks suvine maksimaalne stsenaarium, kus kompenseeritakse vähem kui talvisel maksimaalses stsenaariumis. Tingitud võib see olla suuremast generaatorite hulgast suvise stsenaariumi puhul, kuna rohkem generaatoreid tarbib reaktiivvõimsust. Suvise minimaalse stsenaariumi korral on reservis umbes 500 Mvar reaktiivvõimsuse tarbimise võimekust, mis on alla poole koguvõimekusest. Antud juhul tuleb kogu süsteemi reaktorite summaarne kompenseerimisvõimekus 1420 Mvar, kuhu ei ole arvestatud generaatorite võimekust ega sünkoonkompensaatorite võimekust.

Lisaks pingetele vaadeldi ka N-1 olukorda talvise maksimaalse stsenaariumi korral. Tehti kogu mudelile N-1 analüüs ning leiti, et pingete osas võrgus kõrvalekaldeid ei tekkinud. Samuti ei tekkinud probleeme liinide ülekoormamisega. Siiski ei olnud tagatud N-1 kriteerium igale mudelis paiknevale alajaamale, sest leidis ka ühe liiniga toidetavaid alajaamu. Sellegipoolest, ei ole mudelis arvestatud jaotusvõrguga, mis tõenäoliselt võimaldab mõne ühe liini toitega alajaamal edasi toimetada, säilitades tarbijatele võrguühenduse.

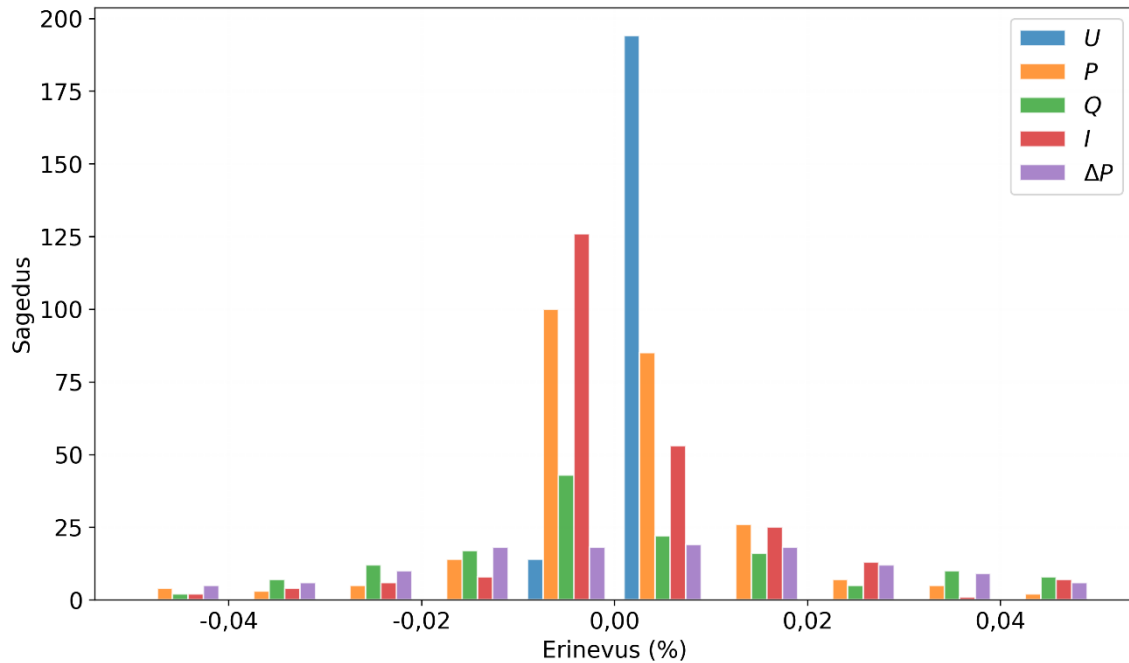
4 TARKVARADE TULEMUSTE VÕRDLUK

Võrguarvutustarkvarade võrdlemiseks koostati võimsusvoo analüüsi tulemuste kohta graafikud ning tabelid, et saada ülevaade tekkinud erinevustest. Võrreldavate suuruste täpsus valiti PSS/E järgi, kuna selle poolt antud arvud olid väiksema täpsusega. Järgnevalt on kajastatud erinevusi nii arvuliselt kui ka protsentuaalselt. Protsendilise erinevuse leidmisel on baasväärtuseks võetud PSS/E mudeli arvutustulemused ning protsent näitab kui erinev on PyPowSyBI poolt leitud väärtus PSS/E suhtes. Protsentuaalset erinevust eelistati seetõttu, et erinevad näitajad oleksid omavahel võrreldavad. Detailsemalt uuriti talvist maksimaalset ning suvist minimaalset stsenaariumi. Nende kahe stsenaariumi puhul on kõige suuremad erinevused lähteandmete suhtes: tootmine ja tarbimine erineb kõige rohkem. Talvise minimaalse ning suvise maksimaalse stsenaariumi kohta ei ole detailsemat ülevaadet tehtud.

4.1 Talvine maksimaalne stsenaarium

Talvise maksimaalse stsenaariumi puhul vaadeldakse esmalt tekkinuid protsentuaalseid erinevusi üldiselt ning seejärel vaadeldakse täpsemalt erijuhte ning ekstreemsemaid erinevusi. Selleks, et saada üldine pilt tekkinud erinevustest, koostati histogramm, kuhu on kantud PyPowSyBI tulemuste protsentuaalsed erinevused. Vaadeldud on liinide puhul võimsusvoogusid, voolu ning aktiivvõimsuskadusid. Reaktiivvõimsuskadusid ei võrrelda, kuna kahe tarkvara poolt antav väärtus esindab erinevat parameetrit. PSS/E poolt antav väärtus kujutab ainult liinis tekkivat reaktiivtakistusest tekkivat kadu, kuid PyPowSyBI tarkvara poolne väärtus näitab summaarset reaktiivvõimsuskadu, kus on arvesse võetud nii induktiivne kui ka mahtuvuslik reaktiivvõimsus. Kirjeldatud asjaolu võiks edasistes lõputöodes uurida põhjalikumalt.

Histogramm talvise stsenaariumi erinevuste kohta on toodud joonisel 4.1. Histogramm on jaotatud vahemikeks 0,01% ning kogu joonise ulatus on -0,05% kuni 0,05%, kuhu jääb sisse valdav osa tarkvarade puhul tekkinud erinevustest. Piirkonnast välja jäävat osa ei ole antud joonisel vaadeldud, kuna sellele on keskendutud järgnevalt. Joonise põhjal on näha, et suur osa tulemustest erinevad väga vähesel määral ning tulemused kummagi tarkvara puhul on ligilähedased.



Joonis 4.1 Histogramm talvise maksimaalse stsenaariumi kohta. Kujutatud on vastavalt esinemissagedusele protsentuaalsete erinevuste jagunemine. U – pingete sõlmes, P – liini aktiivvõimsusvoog, Q – liini reaktiivvõimsusvoog, I – liini vool, ΔP – liini aktiivvõimsuskadu

Kõige täpsemad tulemused on sõlmede pingete seas, kus tekkinud erinevused jäävad vahemikku $-0,01\%$ kuni $0,01\%$. Kõige ebatäpsemad tulemused on liini reaktiivvõimsuste ning aktiivvõimsuskadude korral, kus erinevused on kõige rohkem hajutatud. Sellegipoolest jääb ikkagi valdav osa erinevusi nulli lähedale, arvestades et joonise skaala on väike.

Vaadates täpsemalt esinevaid erinevusi sõlmede pingete ning nurkade osas ei ületanud need $0,01\%$. Pingete puhul on järgnevalt kajastatud protsendilised väärtused täpsusega neli komakohta. Suurimad erinevused nii positiivsele poolele kui ka negatiivsele poolele ning nende protsentuaalne erinevus on toodud tabelis 4.1. Antud juhul oli peaaegu kõik erinevused positiivses suunas. Toodud on viis suurimat erinevust positiivses suunas ning üks ainuke erinevus negatiivses suunas.

Keskmine erinevus pingete osas on umbes 2 volti ning protsentuaalselt $0,0015\%$ sõlmede pingete puhul. Pinge nurkade puhul ei ole aga eraldi väärtusi välja toodud, kuna nende täpsus on kaks komakohta ning erinevus oli valdavates sõlmedes null. Mõnes üksikus sõlmes oli nurkade erinevus $0,01^\circ$, mis ei ole märkimisväärne erinevus ning vaadeldes kogu mudelit üldiselt on ligilähedane tulemus.

Tabel 4.1 Pingete ekstreemsemad erinevused sõlmedes talvise maksimaalse stsenaariumi korral

Sõlm	PyPowSyBI U (kV)	PSS/E U (kV)	Erinevus	
			U (kV)	%
Lihula 330 kV	344,1357	344,1236	0,0121	0,0063
Sindi 330 kV	345,2305	345,2200	0,0105	0,0053
Sopi 330 kV	345,3678	345,3579	0,0099	0,0047
Harku 330 kV	339,9912	339,9814	0,0098	0,0029
Aruküla 330 kV	340,0849	340,0756	0,0093	0,0027
Nuia haru 110 kV	117,0910	117,0911	-0,0001	-0,0001
Keskmine	-	-	0,0020	0,0015

Generaatorite osas tekkivaid erinevusi ei ole eelneval histogrammil kujutatud, kuna neid on arvuliselt vähe ehk andmehulgad ei ole piisavalt võrreldavad. Alljärgnevalt on toodud tabelis 4.2 generaatorite osas tekkinud erinevused. Toodud on ainult need generaatoriga sõlmed, kus oli märgata mingit erinevust reaktiivvõimsuste suhtes. Antud stsenaariumi korral oli mudelis 16 generaatorit, millest kümne puhul tekkisid erinevused ning kuue puhul oli väärtus identne.

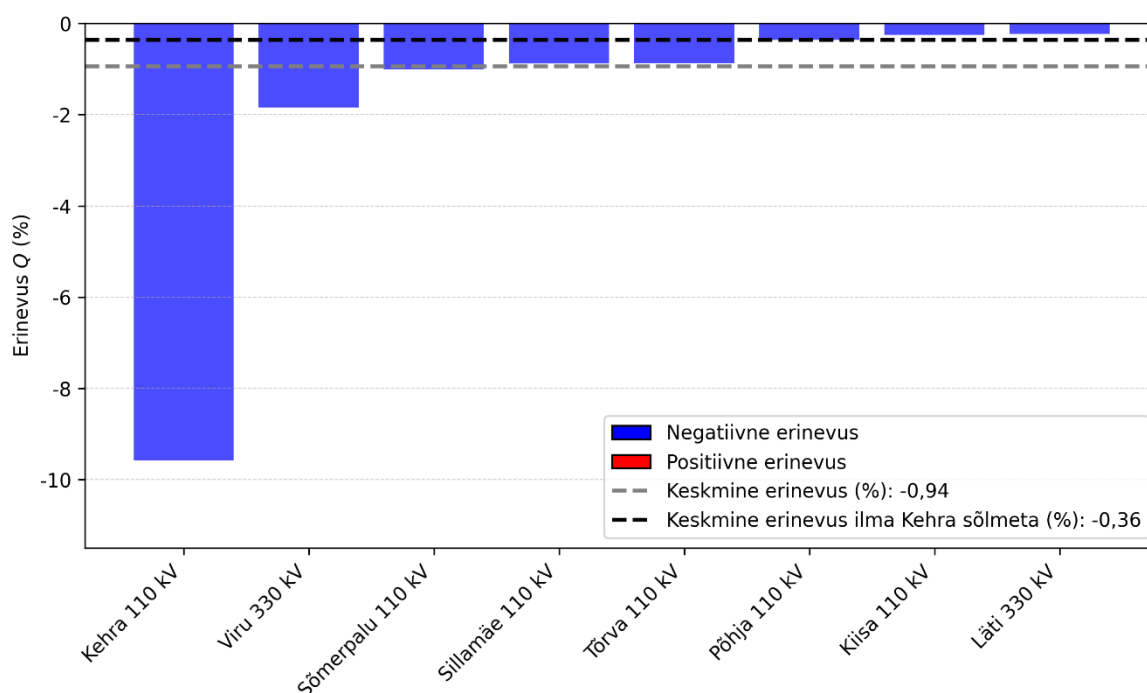
Aktiivvõimuste võrdlemine ei anna suurt ülevaadet, kuna kõikide võrgus olevate generaatorite aktiivvõimsuse sättepunkt oli fikseeritud kindlale väärtusele ning ainsana oli muutuv Läti tasakaalusõlm. Aktiivvõimsuse genereerimise erinevus Läti sõlmes oli kõigest 9,3 kW. Võimsusvoo tulemuste poolest on PSS/E ja PyPowSyBI poolt generaatorite võimsuste märgid vastupidised, mis on tingitud vastavalt programmide eripärale. Parema loetavuse mõttes on võetud arvesse PSS/E variant, et positiivne aktiivvõimsus näitab genereerimist ning negatiivne näitab tarbimist, sama loogika kehtib ka reaktiivvõimsuse puhul.

Tabel 4.2 Generaatorite võimsuste erinevused talvise maksimum stsenaariumi korral

Sõlm	PyPowSyBI		PSS/E		Erinevused		
	P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)	Q (%)
Läti 330 kV	-87,6600	-67,5363	-87,6693	-67,3790	0,0093	-0,1573	-0,23
Viru 330 kV	482,0000	-19,1651	482,0000	-18,8190	0,0000	-0,3461	-1,84
Kiisa 110 kV	250,0000	-63,5166	250,0000	-63,3556	0,0000	-0,1610	-0,25
Põhja 110 kV	77,0000	-10,3433	77,0000	-10,3060	0,0000	-0,0373	-0,36
Sillamäe 110 kV	23,0000	-0,8631	23,0000	-0,8556	0,0000	-0,0075	-0,88
Anne 110 kV	22,0000	-7,2600	22,0000	-7,2600	0,0000	0,0000	0,00
Kehra 110 kV	14,0000	0,4071	14,0000	0,4502	0,0000	-0,0431	-9,58
Imavere 110 kV	10,0000	3,3000	10,0000	3,3000	0,0000	0,0000	0,00
Sõmerpalu 110 kV	10,0000	1,4804	10,0000	1,4955	0,0000	-0,0151	-1,01
Tõrva 110 kV	7,0000	-1,8061	7,0000	-1,7904	0,0000	-0,0157	-0,87
Keskmine	-	-	-	-	-	-0,0489	-0,94

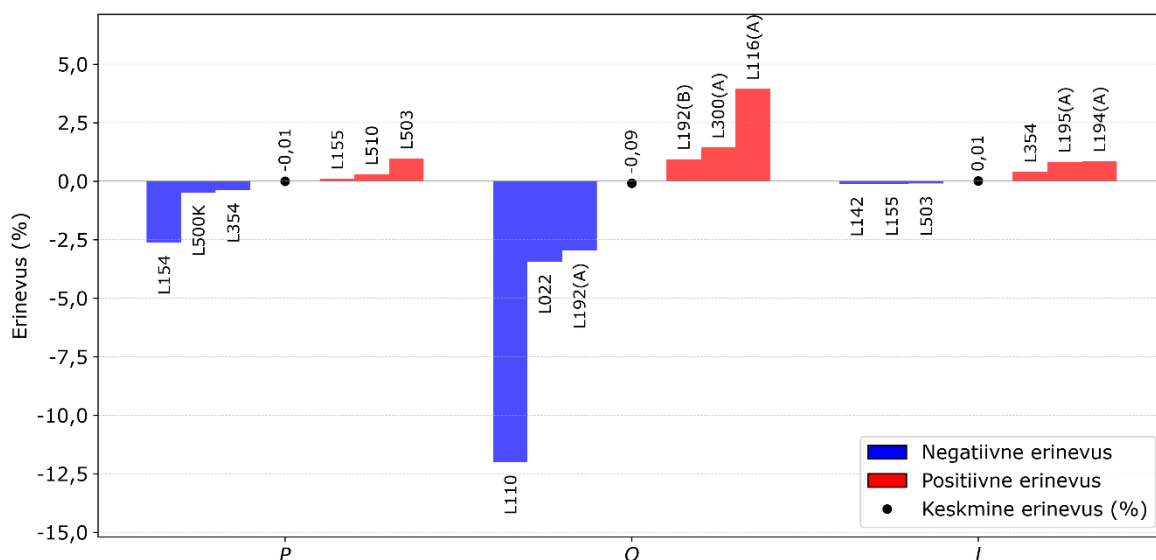
Siiski on erinevused sõlmedes asuvate generaatorite puhul väiksed ning kõikide sõlmede keskmine reaktiivvõimsuse erinevus on umbes -0,05 Mvar ning keskmine erinevuse protsent on -0,94% arvestades kõiki sõlmi. Negatiivne erinevus näitab seda, et PyPowSyBI poolsed tulemused on väiksemad kui PSS/E poolt leitud väärtused. Protsentuaalsed erinevused on lisaks toodud ka joonisel 4.2, kus on kujutatud kõik generaatoriga sõlmed, kus oli reaktiivvõimsuste osas erinevus ning samuti on toodud keskmine erinevus.

Valdav osa erinevusi jääb vahemikku 0% kuni -2% kui välja jätta Kehra 110 kV sõlmes tekkinud generaatori erinevus. Suur protsendiline erinevus sõlmes tuleneb väiksest reaktiivvõimsuse väärtusest generaatori puhul. Kahe tarkvara vaheline väärtuste vahe on absoluutväärtuse poolest lähedane teiste tekkinud generaatori erinevustega, aga PSS/E baasväärtus milles suhtes tekkinud protsentuaalset erinevust leitakse on väikekõigest 0,45 Mvar. Vaadeldes aga absoluutväärtuse poolest suurimat erinevust, mis on Viru 330 kV sõlmes, on protsentuaalne erinevus kõigest -1,84%, kuna PSS/E baasväärtuseks on -18,8 Mvar. Kui jätta välja Kehra sõlm keskmise erinevuse arvutamisest, siis oleks keskmine hoopis -0,36%, mis näitab, et üks konkreetne sõlm mõjutab keskmist suurel määral.



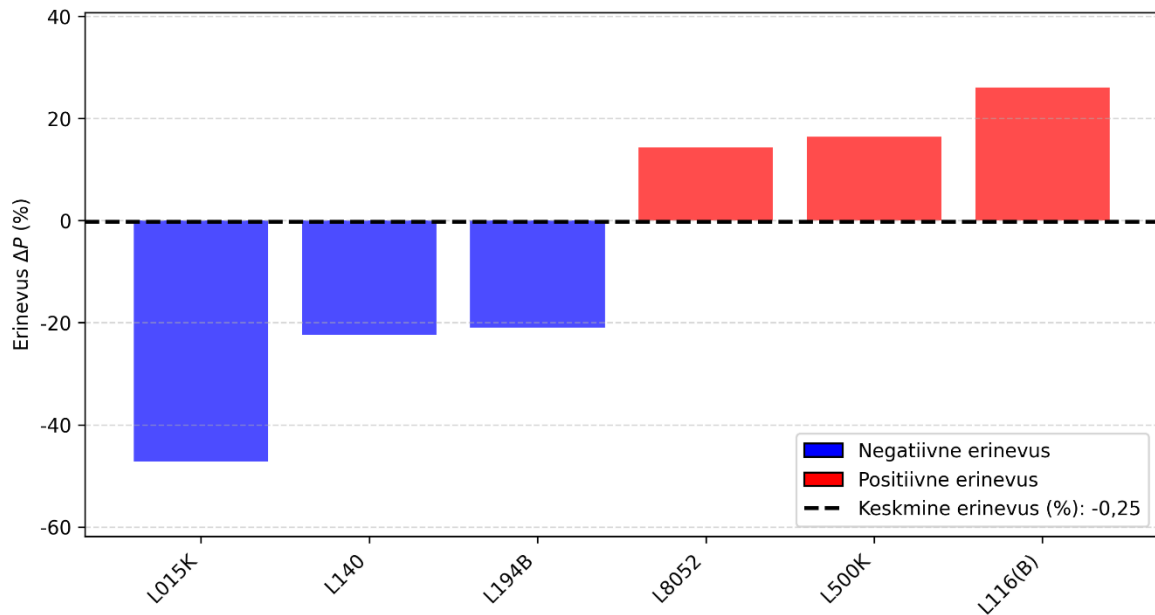
Joonis 4.2 Reaktiivvõimuste protsentuaalsed erinevused generaatorite osas talvise maksimaalse stsenaariumi korral

Liinide poolest on vaadeldakse samuti ekstreemsemaid tekkinud erinevusi väärtuste puhul täpsemalt. Sarnaselt pingetele on leitud liini näitajate puhul tekkinud protsentuaalne erinevus iga parameetri puhul eraldi. Tulemuste seast leiti iga parameetri kohta kolm ekstreemsemat väärtust nii positiivsele poolele kui ka negatiivsele poolele. Väärtused on kujutatud joonisel 4.3, kus on toodud lisaks ka keskmine erinevus vastava parameetri puhul.



Joonis 4.3 Liinide võimsusvoogude ning voolu ekstreemsemad erinevused ning keskmine protsentuaalne erinevus talvise maksimaalse stsenaariumi korral

Kuna aktiivvõimsuse puhul on tegemist väikeste väärtustega, siis tingib see suuremad protsentuaalsed erinevused. Kõige suurem protsendiline erinevus aktiivvõimsuskadude osas lekkis liinis L015K. Aktiivvõimsuskao väärtus antud liinis on ligikaudu 0,1 vatti PSS/E puhul ning 0,2 vatti PyPowSyBl puhul. Erinevus kahe tarkvara vahel on umbes 0,1 vatti ning protsentuaalne erinevus tuleb nende alusel ligikaudu 50%. Sama seis on ka teiste ekstreemsete piirjuhtude puhul, kus nullilähedane aktiivvõimsuskadu liinis tingib tarkvarade vahelise väiksemagi erinevuse korral suure protsentuaalse erinevuse. Aktiivvõimsuskadude ekstreemsemad piirjuhud toodud eraldi joonisel 4.4 koos keskmise erinevusega, kus on näha ekstreemsed väärtused, aga siiski keskmine protsentuaalne erinevus tuleb väike ning lähedane eelnevatele keskmistele.



Joonis 4.4 Liini aktiivvõimsuskadude ekstreemsemad erinevused ning keskmine protsentuaalne erinevus talvise maksimaalse stsenaariumi korral

Kui eelnevate jooniste järgi kõrvale jätta aktiivvõimsuskad, mille suured protsendilised erinevused on tingitud väikestest absoluutväärtustest, siis suurimad erinevused ilmsid reaktiivvõimsuste osas, mille puhul on sarnaselt väikeste väärtuste puhul protsendilised erinevused suured. Siiski ei ole tekkinud erinevuste suurused märkimisväärsed ning võib lugeda ligilähedaseks ning piisavalt täpseteks. Kõige täpsemad tulemused nii keskmise kui ka piirjuhtude poolest olid liini aktiivvõimsuse ning voolu puhul.

N-1 analüüs talvise maksimaalse stsenaariumi korral teostati esmalt arvestades lubatud pingepiire vastavalt standardile EVS-EN 60038:2012 [46] ning arvestades liini voolu lubatud piire. Leiti, et kummagi tarkvara puhul ei tekkinud N-1 analüüsi korral ühtegi lubatud piiridest kõrvalekallet. Ilmneb, et tarkvarade puhul erinevust ei tekkinud.

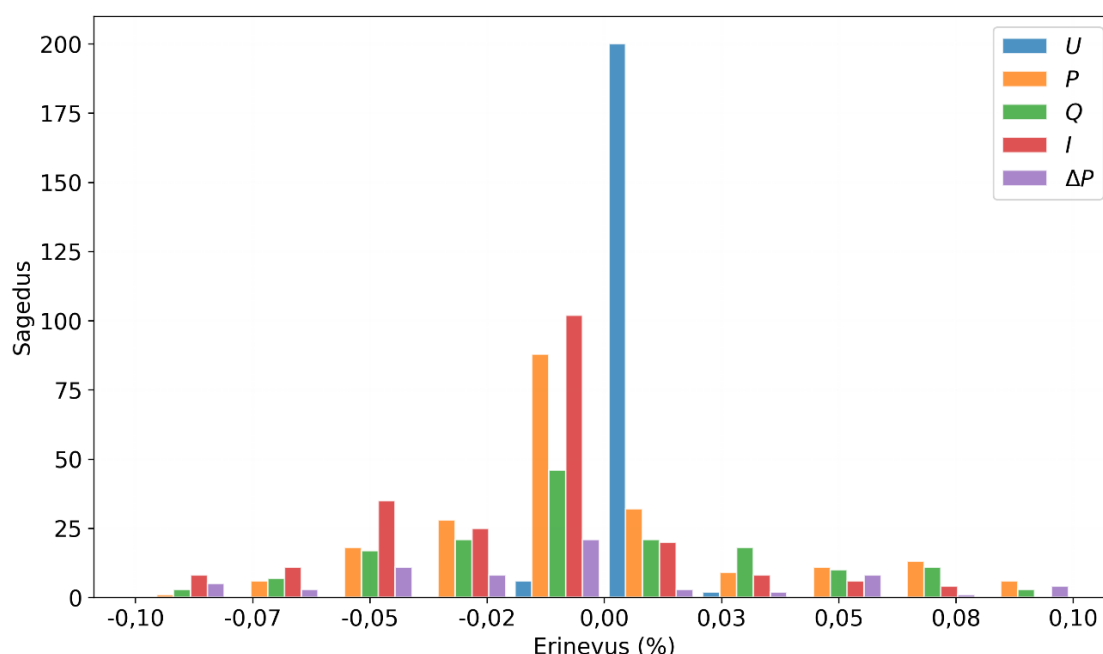
Selleks, et uurida täpsemalt, kas tarkvarad leiavad sama arvu kõrvalekaldeid N-1 analüüsi puhul, langetati pingete osas lubatud kõikumist esmalt +/-10% nimipingeni, mille puhul ei esinenud samuti kõrvalekaldeid. Siis võeti piirideks +/-9,5% nimipingest. Sel juhul ületasid osades sõlmedes pinged etteantud piire ning oli võimalik analüüsida tulemusi kahe tarkvara vahel. Täpsem ülevaade on toodud tabelis 4.3. Tekkinud kõrvalekallete arv oli mõlema tarkvara puhul identne. Kõrvalekaldeid tekkisid pingete osas, kus selle väärtus mõnes sõlmes tõusis liiga kõrgeks. Liinide ülekoormamisega probleeme ei tekkinud.

Tabel 4.3 N-1 analüüsi korral tekkinud kõrvalekallete arv mõlema tarkvara puhul talvise maksimaalse stsenaariumi korral. Pingete osas lubatud kõrvalekalle +/-9,5% nimipingest

Liini väljalülitus	Piiridest kõrvalekallete koguarv võrgus	
	PyPowSyBI	PSS/E
L106A(B)	4	4
L106A(A)	3	3
L033(B)	1	1

4.2 Suvine minimaalne stsenaarium

Sarnaselt talvisele stsenaariumile on ka suvise minimaalse stsenaariumi puhul vaadeldud esmast üldist histogrammi erinevuste kohta ning siis täpsemalt ekstreemsemaid erijuhte. Liinide ning sõlmede näitajate erinevuste jagunemine on toodud joonisel 4.5. Antud juhul on histogrammi skaalat suurendatud, sest erinevused olid rohkem hajutatud, eelkõige reaktiivvõimsuste ning aktiivvõimsuskadude korral. Erinevusi on vaadeldud vahemikus -0,1% kuni 0,1% sammuga 0,02%. Pinged on sarnaselt eelnevaga väga väikeste erinevustega jäädes protsendiliselt -0,01% ja 0,01% vahele. Kuigi näitajad on rohkem hajutatud, on siiski suurem osa erinevusi nullilähedased ning arvestades väikest skaalat, on tekkinud erinevused tarkvarade vahel minimaalsed.



Joonis 4.5 Histogramm suvise minimaalse stsenaariumi kohta. Kujutatud on vastavalt esinemissagedusele protsentuaalsete erinevuste jagunemine. U – pingete sõlmes, P – liini aktiivvõimsusvoog, Q – liini reaktiivvõimsusvoog, I – liini vool, ΔP – liini aktiivvõimsuskadu

Keskendudes pingete ja nurkade ekstreemsematele erinevustele, on suurimad kõrvalekalded toodud tabelis 4.4, kus on toodud viis suurimat erinevust positiivsele poolele ning kaks erinevust negatiivsele poolele. Valdav osa pingeid olid PyPowSyBI korral kõrgemad kui PSS/E tulemustes. Siiski on erinevused väga väikesed arvestades arvude skaalat. Pingete väärtused on elektrisüsteemides üldjuhul kilovoltides, aga vead on antud juhul voltides.

Tabel 4.4 Pingete ekstreemsemad erinevused sõlmedes suvise minimaalse stsenaariumi korral

Sõlm	PyPowSyBI U (kV)	PSS/E U (kV)	Erinevus	
			U (kV)	%
Kunda 110 kV	120,2732	120,2432	0,0300	0,0249
Liiva 110 kV	120,2747	120,2447	0,0300	0,0249
Viru-Nigula 110 kV	120,5037	120,4835	0,0202	0,0168
Rakvere 330 kV	350,3702	350,3502	0,0200	0,0057
Haljala haru 110 kV	120,2861	120,2676	0,0185	0,0154
Haljala 110 kV	120,2781	120,2596	0,0185	0,0154
Rakvere 20 kV	19,7271	19,7273	-0,0002	-0,0010
Püssi 20 kV	19,0074	19,0078	-0,0004	-0,0020
Keskmine	-	-	0,0056	0,0042

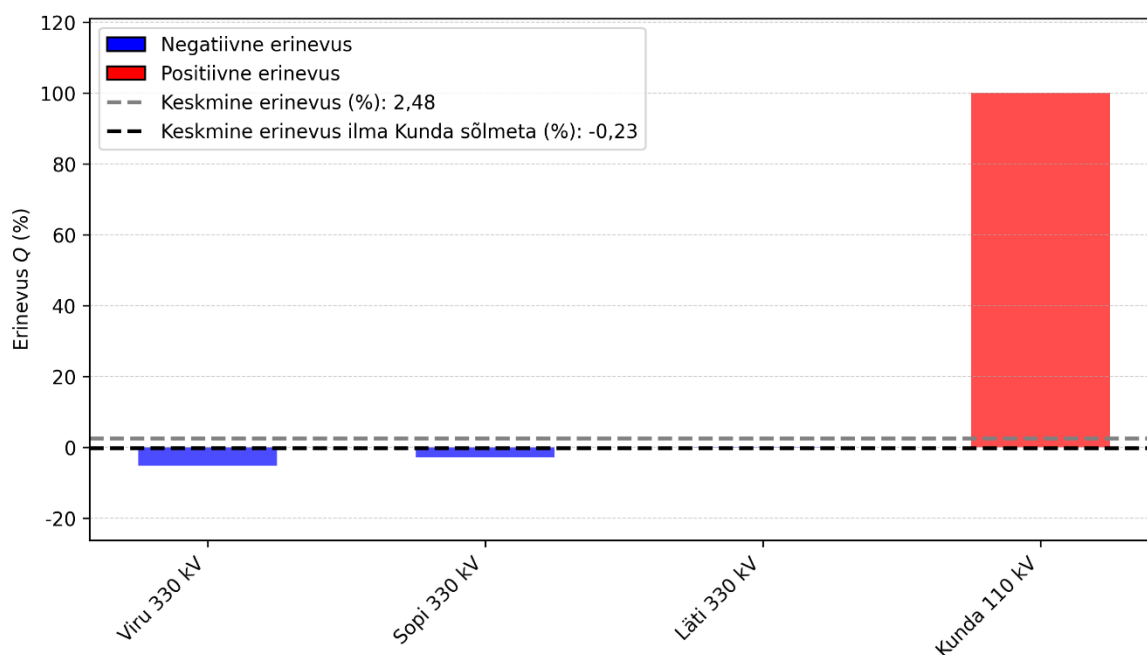
Generaatorite osas on erinevused toodud tabelis 4.5. Suvise stsenaariumi korral oli mudelis 37 generaatorit, millest neljas tekkisid erinevused. Väikesed väärtused tekitavad sarnaselt eelnevaga suuri protsentuaalseid erinevusi. Kunda 110 kV sõlmes tekitab reaktiivvõimsuste erinevus 0,33 Mvar, kuid protsentuaalselt 100%, kuna PyPowSyBI tarkvaras on reaktiivvõimsus 0 Mvar, aga PSS/E põhjal tarbitakse seal sõlmes -0,33 Mvar. Vaadeldes suurimat reaktiivvõimsuste erinevust, on see hoopis Viru 330 kV sõlmes. Protsendiliselt on see aga ainult -5%.

Tabel 4.5 Generaatorite võimsuste erinevused talvise maksimum stsenaariumi korral

Sõlm	PyPowSyBI		PSS/E		Erinevus		
	P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)	Q (%)
Läti 330 kV	146,9218	-130,8376	147,1583	-130,6700	0,2365	-0,1676	-0,13
Viru 330 kV	482,0000	12,1330	482,0000	12,7943	0,0000	-0,6613	-5,17
Sopi 330 kV	59,0000	12,5365	59,0000	12,8995	0,0000	-0,3630	-2,81
Kunda 110 kV	1,0000	0,0000	1,0000	-0,3300	0,0000	0,3300	100,00
Keskmine	-	-	-	-	-	-0,0233	2,48

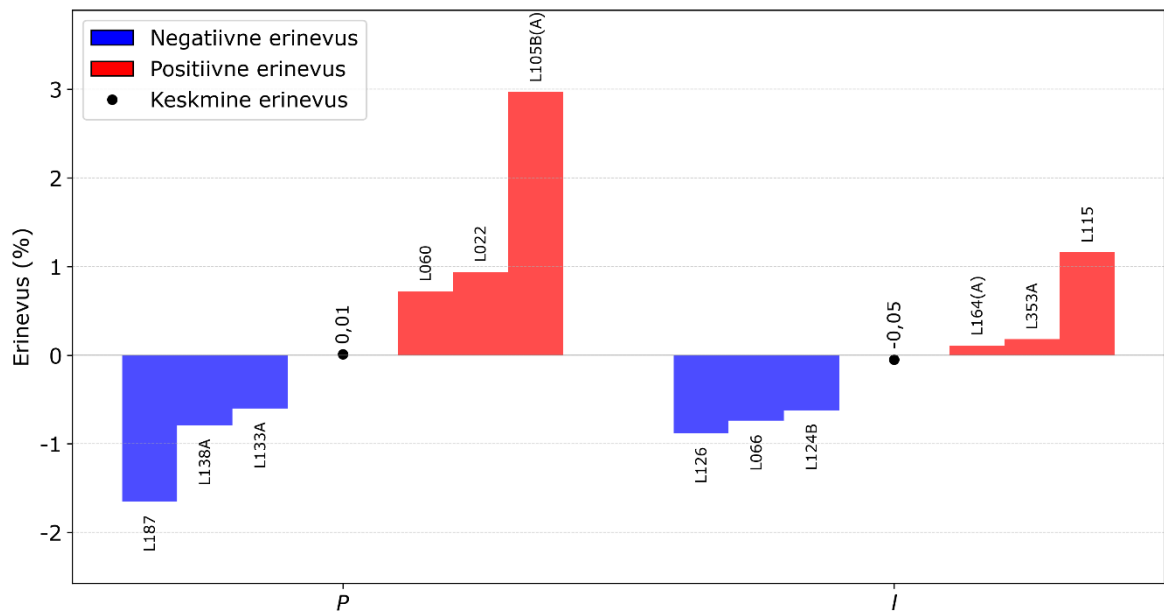
Selleks, et saada parem ülevaade on koostatud joonis 4.6, kus on ära toodud tekkinud erinevuste protsendid graafiliselt ning lisaks kantud joonisele kaks keskmist väärtust: arvestades kõiki sõlmi ning jättes välja Kunda 110 kV sõlme. Selgub, et ühe sõlme mõju keskmisele on väga suur. Kui muidu saadi erinevuste keskvaärtuseks 2,48%, siis nüüd

on keskmine erinevus kõigest -0,23%. Keskmine erinevus on hoopis teises suunas ning arvuliselt väiksem.



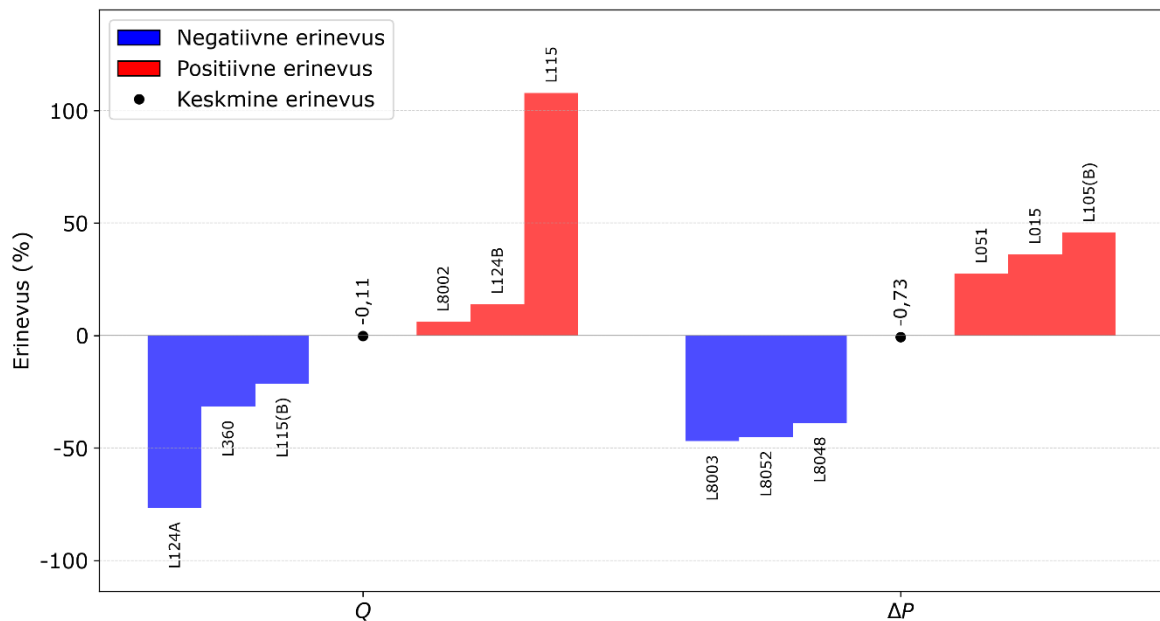
Joonis 4.6 Reaktiivvõimuste protsentuaalsed erinevused generaatorite osas suvise minimaalse stsenaariumi korral

Liinide osas on suvisel stsenaariumil vaadatud eraldi esmalt liini voolu ning aktiivvõimsusvoogu, et tulemused oleksid sarnase skaalaga. Andmed on toodud joonisel 4.7. Aktiivvõimsuse ja voolu osas on ekstreemsed erinevused suhteliselt väikesed, jäädes 3% sisse. Keskmised protsentuaalsed erinevused on nullilähedased, mis on sarnane tulemus võttes arvesse talvise stsenaariumi puhul leitud näitajaid.



Joonis 4.7 Liinide aktiivvõimsusvoo ning voolu ekstreemsemad erinevused ning keskmine protsentuaalne erinevus suvise minimaalse stsenaariumi korral

Liini aktiivvõimsuskadude osas esineb sarnane muster, kui talvise stsenaariumi puhul, et aktiivvõimsuskadude erinevus on protsendiliselt väga suur, sest tegemist on väikeste väärtustega. Suvise stsenaariumi puhul on ka reaktiivvõimsustega sarnane lugu, et väikesed väärtused tekitavad ekstreemseid erinevuste piirjuhte. Joonise 4.8 põhjal on näha, et ekstreemsemad erinevused tekkisid reaktiivvõimsuste suhtes, mis ületavad ka aktiivvõimsuskadude puhul tekkivaid ekstreemseid piirjuhte. Liinis L115 on reaktiivvõimsusvoo erinevus üle 100%, mis on seotud jällegi väikeste väärtustega. Erinevus kahe tarkvara vahel on 0,21 Mvar, PSS/E poolt leitud tulemus on 0,19 Mvar, mis tingib suure erinevuse protsendi, kuid absoluutväärtuse poolest ei ole erinevus suurim. Kõige suurema erinevusega on liin L347, mis erineb 0,22 Mvar, aga protsendiliselt ainult 0,78%. Kuna sellised ekstreemse väärtused võivad moonutada keskmist ning anda vale ülevaate, on järgnevalt vaadeldud tulemusi, jättes välja ekstreemsemad erinevused.

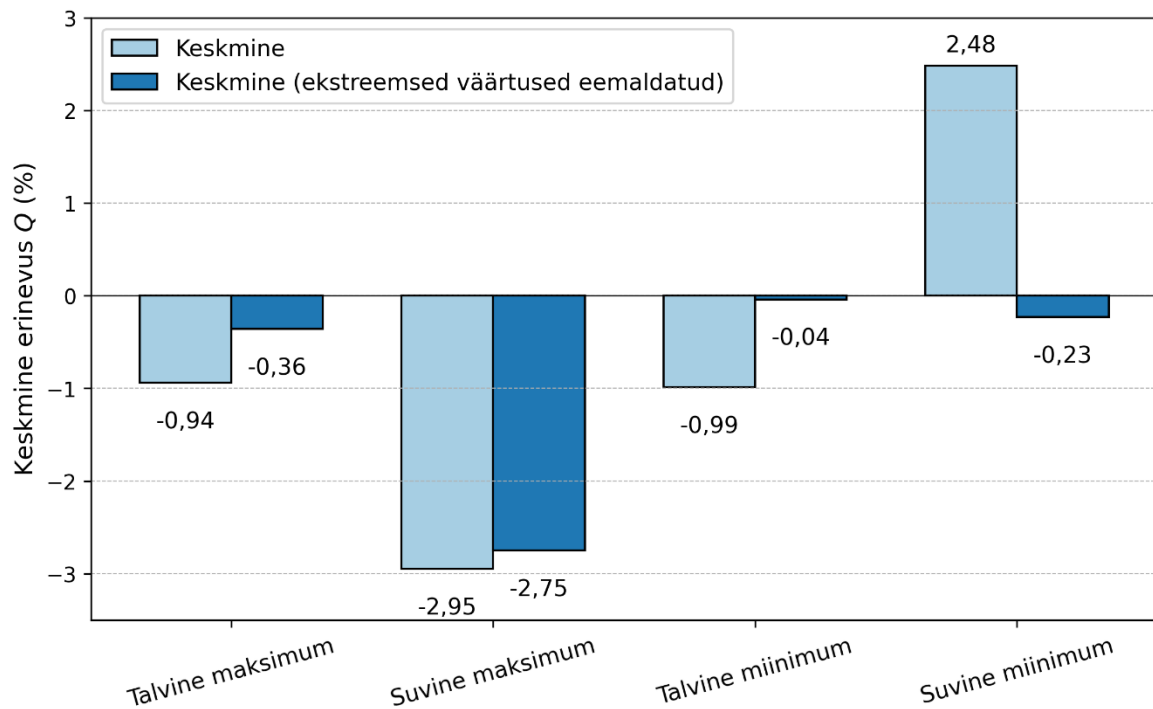


Joonis 4.8 Liinide reaktiivvõimsusvoo ning aktiivvõimsuskao ekstreemsemad erinevused ning keskmine protsentuaalne erinevus suvise minimaalse stsenaariumi korral

4.3 Stsenaariumite erinevuste võrdlus

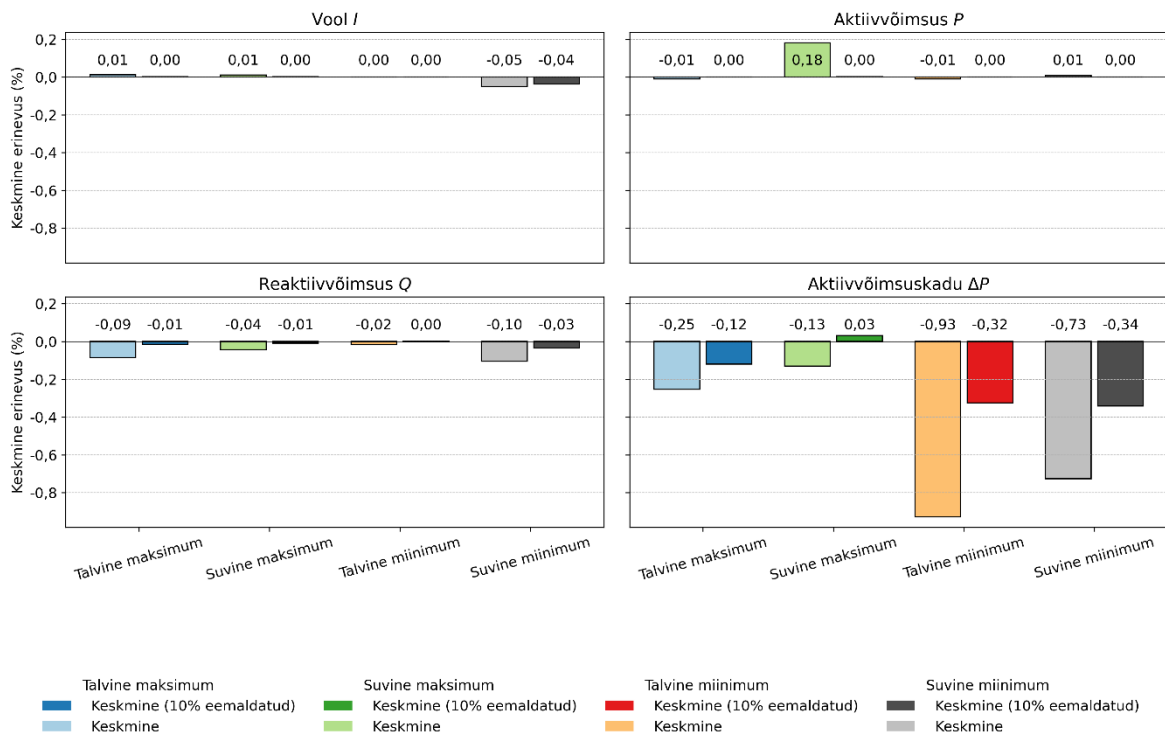
Vaadeldes kõiki stsenaariumeid üldiselt, ei ole pingete osas eraldi võrdlust välja toodud, kuna erinevused jäid väikseks ning olid ligilähedased mõlema tarkvara korral. Pingete keskmine erinevus jäi iga stsenaariumi vahemikku -0,01% kuni 0,01%. Pinge nurkade osas on samuti tulemused kõikide stsenaariumite korral praktiliselt identsed erinedes maksimaalselt 0,01° võrra üksikutes sõlmedes.

Generaatorite osas on keskmised protsendilised erinevused toodud kokkuvõtvalt joonisel 4.9. Toodud on nii keskmine protsentuaalne erinevus arvestades kõiki generaatoreid ning keskmine, kus on ära jäetud ekstreemsemad erinevused, mis moonutavad liialt keskmist. Erinevuste puhul ei ole otsest korrelatsiooni vaid on suhteliselt suvaliselt jaotunud stsenaariumite vahel, mis võib olla põhjustatud väiksest andmehulgast. Siiski mõjutab ekstreemsete väärtuste eemaldamine keskmist suurel määral kolme stsenaariumi puhul. Kõige suuremad erinevused tekkisid suvise maksimaalse stsenaariumi korral: -2,75%. Vaadeldes tulemusi üldiselt jäävad tekkinud erinevused generaatorite osas -2,75% ja -0,04% vahele, võttes arvesse keskmiseid erinevusi, kus on arvestamata jäetud ekstreemsemad punktid. Tekkivad erinevused ei ole siiski märkimisväärsed ning neid võib lugeda suhteliselt täpseteks.



Joonis 4.9 Reaktiivvõimsuste keskmised protsentuaalsed erinevused generaatorite osas kõikide stsenaariumite puhul. Toodud on nii keskmine arvestades kogu andmehulka ning keskmine erinevus, jättes arvestamata ekstreemsed punktid

Liinide osas tekkivad keskmised erinevused iga stsenaariumi kohta on kokkuvõtvalt toodud joonisel 4.10. Joonisel on toodud neli graafikut, millest igaüks kujutab vastavat parameetrit. Kajastatud on nii keskmised erinevused arvestades kõiki väärtusi ning samuti on toodud ka keskmised protsentuaalsed erinevused jättes arvestamata 5% väärtustest nii negatiivselt kui ka positiivselt poolelt, et üksikud ekstreemsed väärtused ei mõjutaks üldist keskmist suurel määral, andes vale ülevaate. Edaspidi on analüüsitud just keskmisi, kus on ekstreemsed väärtused välja jäetud.



Joonis 4.10 Liini näitajate keskmised protsentuaalsed erinevused kõikide stsenaariumite puhul. Toodud on nii keskmine arvestades kogu andmehulka ning keskmine erinevus, jättes arvestamata 5% ekstreemsematest väärtustest mõlemalt poolt andmehulgast

Kõige suuremad erinevused esinesid aktiivvõimsuskao osas, mis tulenevad selle puhul esinevatest väikestest absoluutväärtustest. Järgnevalt olid suurimad erinevused reaktiivvõimsusvoo osas. Kõige täpsemad väärtused olid voolu ja aktiivvõimsusvoo osas. Siiski on tekkinud erinevused minimaalsed. Kui võrrelda erinevusi stsenaariumite vahel on näha, et valdavas osas langeb erinevuste suurus kokku süsteemi kogukoormusega. Mida suurem on koormus süsteemis seda väiksem on erinevus. Kui koormus süsteemis on madal toodetakse liinide poolt rohkem reaktiivvõimsust alakoormatuse tõttu. Genereeritavat reaktiivvõimsust on vaja kompenseerida, et pinged ei läheks üle lubatud piiride. Madalama koormuse korral on süsteemis reaktiivvõimsusvood suuremad ning vajadus kompenseerida suurem. Võrreldes suvist minimaalset stsenaariumit kui reaktiivvõimsusvoo keskmine erinevus on -0,03% ning talvist maksimaalset, kus see on -0,01% on see trend näha.

Vaadeldes keskmisi erinevusi, kus on ära jäetud 10% ekstreemsematest väärtustest, jäävad keskmised erinevused vahemikku 0,03% kuni -0,34%, mille puhul on kirjeldavad mõlemad väärtused aktiivvõimsuskadude erinevusi. Jättes need vaatluse alt välja jäävad erinevused vahemikku -0,04% kuni 0,00%. Kõikide näitajate puhul erinevused tarkvarade vahel praktiliselt olematud ning ligilähedased.

4.4 Tarkvarade võrdlus

Üldjoones saab leitud tulemuste ja nende võrdluse põhjal väita, PyPowSyBI poolt saadud tulemused olid PSS/E omadega võrreldes suhteliselt ligilähedased. Aktiivvõimsusest tingitud erinevused olid enamasti seotud eelkõige Läti sõlmega, kus siis erinevused tulid sisse kas selle sõlmega seotud liinidest või generaatori poole pealt. Samuti olid teistel juhtudel erinevused seotud eelkõige sõlmedega, kus leidusid tootmisüksused.

Suurimad erinevused tekkisid eelkõige reaktiivvõimsuste osas nagu kirjeldatud eelnevas alapeatükis. Reaktiivvõimsusvoogude suhtes tekkinud erinevused on suuremad tõenäoliselt sellepärast, et kui reaktiivvõimsuste kohta on generaatoritele ette antud kindel sätteväärtus, siis reaktiivvõimsuse osas on ette antud konkreetsed piirid ning generaator on lülitatud pinge juhtimise režiimile. Kui erinevate tarkvarade puhul on seatud arvutustele erinevad iteratsioonide täpsused, siis see võib tingida erinevuste tekke. Teostades võrguarvutusi, oli näha, et iteratsioonide arv stsenaariumi kohta oli suurem PyPowSyBI korral.

Lisaks võivad erinevused sisse tulla näiteks tarkvarade eripäradest, kus teatud algandmete sisestamine erineval kujul võib selle põhjustada. Näiteks on erinevused liini mahtvusjuhtivuse sisestamisel, kus PSS/E nõuab kogu liini mahtuvuse väärtust, aga PyPowSyBI mahtvusjuhtivuse väärtust mõlemas liini otsas. Siiski on see vähetõenäoline, kuna liinide ja trafode parameetrid olid igas stsenaariumis samad, aga tekkinud erinevused muutusid vastavalt stsenaariumile ning eelkõige vastavalt reaktiivvõimsusele süsteemis.

Erinevad võrguelemendid võivad olla tarkvarades teistmoodi modelleeritud. PSS/E puhul oli võimalik manuaalset leida infot, kuidas elemendid on modelleeritud. Kuna käesoleva töö raames ei kasutatud eriti palju erinevaid võrguelemente, siis kõige keerulisemaks kasutatud elementidest võiks lugeda kolmemähiselisest trafot.

Trafode modelleerimine võrguarvutustarkvaradega võib olla keerukas protsess. Näiteks trafo modelleerimisel PSS/E tarkvaraga on valikus kas sisestada parameetrid suhtühikutes või siis trafo lühiskatse ja tühijooksu katse alusel saadud näitajad. Samuti on küsitud on just mähiste vahelisi parameetreid. PyPowSyBI küsib trafo kohta hoopis aktiiv- ja reaktiivtakistust ning aktiiv- ja reaktiivjuhtivust. Lisaks on vaja sisestada antud väärtused mähise kohta, mitte mähiste vahelisi näitajaid. Sellisel juhul on vaja parameetrid ümber arvutada ning see võib kaasa tuua ümardamisest tingitud vigu. Kuna aga andmete sisestamisel prooviti hoida võimalikult suurt täpsust, siis tõenäoliselt ei ole erinevuste tekkimise põhjus algandmetes, sest erinevused olid seotud eelkõige

sõlmedega, milles oli generaator või reaktiivvõimsust kompenseeriv element ning nende sõlmedega seotud liinides.

Kui võrrelda mõlema tarkvara kasutamist, siis olenevalt eelistustest võivad tekkida erinevad vaatenurgad. Siiski on uuemale kasutajale lihtsam toimetada PyPowSyBI teegiga, kui on olemas baasteadmised Pythoni programmeerimiskeelest. Kuna PSS/E tarkvaras on väga palju erinevaid võimalusi ning kasutamisiise, siis kasutamisega alustades võib tunduda keerukas ning arusaamatu. Siiski on kõik võimalused, mida on vaja põhiliseks lihtsamaks analüüsiks erinevate võrkude puhul olemas mõlemas tarkvaras.

PyPowSyBI kohta on välja toodud, et selle tarkvara loomise mõte oli teha võimekas, kuid siiski lihtsasti arusaadav tarkvara [18]. Võrreldes PSS/E tarkvaraga on PyPowSyBI tunduvalt lihtsam kasutada. Väga oluline osa mõlema tarkvara puhul on manuaalidega tutvumine ning info otsimine vastava funktsiooni kohta. PSS/E manuaale on mitmeid erinevaid ning need on väga mahukad ning keerukad. PyPowSyBI dokumentatsioon [2] on veebis saadaval ning lihtsasti navigeeritav. Funktsioonide ja käskude selgitused on toodud lühidalt ning on kergelt leitavad.

Võrguarvutuste järel tulemuste kättesaamine on tunduvalt lihtsam PyPowSyBI puhul, kus on seda võimalik teha konkreetsete käskudega ning salvestades kogu andmehulk failina ning sama skripti abil, kus teostati ka võimsusvoogude analüüs. PSS/E võimsusvoogude arvutuse tulemuste kättesaamine on kasutatud PSS/E versioonis 34 on võimalik vaid konsooli teel. Ainsad väärtused, mida kuvab PSS/E tavalises kasutajaliideses, on sõlmede pingete ja nurkade väärtused. Selleks, et saada kätte liinide võimsusvoogude andmeid tabeli kujul ning muude elementide väärtusi, tuleb esmalt tutvuda mahuka PSS/E API rakendusliidese manuaaliga. Parameetreid, mida on võimalik väljastada on küll tunduvalt rohkem kui PyPowSyBI korral, aga protsess on keerukam. PSS/E programmi kasutajaliideses on küll võimalik luua erinevaid aruandeid, liinide võimsusvoogude ja kadude kohta, ning salvestada need tekstifailina, kuid see on rohkem visuaalseks ülevaateks, sest programmi enda kuvatavad andmete ülevaade ei ole eriti mugav edasiseks andmetöötluks, kui on soovitakse näiteks luua ülevaatlik tabel.

4.5 Järeldused

Eesti võrgu toimimisest püsitalitusel 2030. aastal on näha, et pinged võrgus on küll kõrged, aga siiski jäävad lubatud piiridesse. Pinge sõltus paljuski süsteemi koormusest. Liinide ülekoormamise probleeme ei teki, pigem on probleem just vastupidine, et liinid on alakoormatud. Sellest on põhjustatud ka kõrged pinged süsteemis ning vajadus liinide poolt genereeritud reaktiivvõimust kompenseerida. Suur hulk toimivaid reaktoreid süsteemis tekitab jällegi probleeme võrgukindluse mõistes kui peaks mõni neist seademetest rikki minema.

Eelneva tulemuste analüüsi ja võrdluse põhjal selgus, et nii võimsusvoogude analüüsi teostamisel nelja erineva stsenaariumi korral kui ka N-1 analüüsi korral, olid saadavad tulemused ligilähedased. Arvestades modelleerimisel tehtavaid lihtsustusi, ei mõjuta tarkvarade vahel tekkivad erinevused üldist lõpptulemust. Tekkinud erinevused kahe tarkvara- PSS/E ja PyPowSyBI vahel olid suurimad liini aktiivvõimsuskadude ning reaktiivvõimsuste osas.

Erinevused reaktiivvõimsuste osas tulenevad tõenäoliselt sellest, et kui aktiivvõimsuse puhul on generaatoritele etteantud konkreetne sätteväärtus, siis reaktiivvõimsuse puhul on ette antud lubatud piirid. Keskmised erinevused generaatorite reaktiivvõimsuste osas jäid vahemikku -2,75% ja -0,04%, mis näitab et arvutuste korral võib esineda tarkvarade puhul teatud erinevusi, kuid need ei ole märkimisväärsed. Arvutamiste teostamisel võivad tarkvarade puhul erineda näiteks ette antud arvutustäpsused reaktiiv- ja aktiivvõimsuse osas, millest võivad olla tingitud tekkinud erinevused. Antud juhtu toetab ka erinevus iteratsioonide arvu puhul, mis kolme stsenaariumi korral oli erinev. PyPowSyBI iteratsioonide arv oli üldiselt suurem, mis annab mõista, et antud tarkvara puhul võivad olla etteantud arvutuste täpsuspiirid suuremad.

Võttes arvesse erinevate stsenaariumite puhul leitud erinevuste protsendilisi keskväärtusi, jäid erinevused reaktiivvõimsusvoogude puhul vahemikku -0,03% kuni 0,00%. Analüüsi põhjal saab pidada PyPowSyBI poolt saadud arvutustulemused piisavalt täpseks ning usaldusväärseks, kuna võttes arvesse modelleerimisel tehtuid lihtsustusi ning näitajate suurusjärku ei mängi tekkinud erinevused lõpptulemuses suurt rolli.

Pingete osas jäid keskmised erinevused alla 0,01% ning pinge nurkade erinevused ei erinenud rohkem kui 0,01 võrra PyPowSyBI puhul. Aktiivvõimsuskadude puhul mõjutasid keskmist protsentuaalset erinevust väikesed väärtused. Liini voolu ning aktiivvõimsusvoo suhtes olid erinevused kõige väiksemad jäädes vahemikku -0,04% kuni 0,00%. PyPowSyBI tulemused olid ligilähedased ning aktsepteeritavad.

KOKKUVÕTE

Elektrivõrkude kontekstis on väga olulisel kohal modelleerimine ning võrguarvutuste teostamine. Võrguarvutuste jaoks on olemas erinevad võrguarvutustarkvarad nii vabavaralised kui ka tasulised. Käesoleva töö eesmärgiks oli uurida kas vabavaralist tarkvara saab usaldusväärselt kasutada elektrisüsteemi modelleerimisel. Antud töö käsitleti täpsemalt vabavaralist tarkvara PyPowSyBl, mis on Pythoni programmeerimiskeelel põhinev teek, mida võrreldi klassikalise PSS/E võrguarvutustarkvaraga.

Esmalt anti lühike ülevaade elektrivõrkude modelleerimisest ning toodi välja erinevad võrguarvutustarkvarad. Seejärel kirjeldati täpsemalt käesolevas töös kasutatud kahte tarkvara: PyPowSyBl ning PSS/E. Käesoleva bakalaureusetöö käigus koostati Eesti 2030. aasta 330/110 kV elektrisüsteemi püsitalituse ekvivalente mudel nii PSS/E professionaalses võrguarvutustarkvaras kui ka vabavaralises tarkvaras PyPowSyBl. Algandmed valiti mõlema mudeli puhul samasugused. Lähteandmed saadi eelkõige Eleringi arengukavast, liitumisvõimsuste kaardilt e-Gridmap ning Riigihangete registrist. Tehti eeldusi ja lihtsustusi olukordades, kus polnud piisavalt infot saadaval. Sooviti teostada tarkvarade võrdlus just reaalsetel parameetritel põhineva võrgumudeli alusel.

Suurte elektrisüsteemide modelleerimine on ajamahukas protsess, arvestades et seda tuli teha kahes tarkvaras. Koostatud püsitalituse mudelid koosnesid 208 sõlmest ning 266 liinist. Kahe tarkvara võrdlemiseks koostati neli erinevat püsitalituse stsenaariumit. Valiti talvised ja suvised ekstreemsed juhused ehk mõlemal puhul minimaalne ning maksimaalne koormus. Tootmise ning tarbimise jaoks tehti prognoose, et lähteandmed peegeldaksid 2030. aasta olukorda. Iga stsenaariumi korral teostati võimsusvoogude analüüs mõlemas tarkvaras ning talvise maksimaalse stsenaariumi korral ka N-1 analüüs.

Tulemuste poolest analüüsiti lühidalt Eesti elektrisüsteemi püsitalitust 2030. aasta raamistikus ning vaadeldi tekkinud erinevusi kahe tarkvara võimsusvoo arvutuste tulemustes. Eesti võrgumudelis olid pinged iga stsenaariumi ning samuti ka N-1 analüüsi korral lubatud piirides. Siiski olid pinged nimipingest palju kõrgemad, viidates alakoormatud liinidele, eriti väikese koormuse korral süsteemis, kus valdav osa reaktoreid ning generaatoreid tarbisid reaktiivvõimsust.

Tekkinud erinevuste poolest uuriti põhjalikumalt talvist maksimaalset ning suvist minimaalset stsenaariumit. Võrdlemisel võeti aluseks PSS/E poolt leitud võimsusvoo

analüüsi tulemused ning leiti PyPowSyBI tulemuste protsentuaalne erinevus erinevate näitajate korral. Kõikide stsenaariumite korral leiti näitajate puhul keskmised erinevused, jättes välja äärmuslikud piirjuhud, mis esinesid kohati absoluutväärtuselt väga väikeste võimsusvoo tulemuste tõttu. Vastavalt stsenaariumile võis olla sama näitaja erinevuse protsent muutuda. Erinevused olid suuremad stsenaariumite korral, kus süsteemis oli väiksem koormus ning reaktiivvõimsuse kompenseerimise vajadus suurem.

Suurimad erinevused tekkisid reaktiivvõimsuste ning liini aktiivvõimsuskadude osas. Reaktiivvõimsuste puhul tekkinud erinevused jäid liinide puhul vahemikku $-0,03\%$ kuni $0,00\%$ ning generaatorite osas vahemikku $-2,75\%$ kuni $-0,04\%$. Aktiivvõimsuskadude suuremad erinevused on tingitud väikestest absoluutväärtustest. Aktiivvõimsuse suhtes ei olnud tekkinud erinevused eriti suured, kuna generaatorite puhul on etteantud kindel säteväärtsus, mitte vahemikud nagu reaktiivvõimsuse puhul. Liini näitajatest olid aktiivvõimsusvood kõige väiksema erinevusega. Pinged sõlmedes erinesid keskmiselt vähem kui $0,01\%$.

Leitud tulemuste põhjal võib väita, et tekkinud erinevused ei mõjuta lõpptulemust suurel määral arvestades modelleerimisel tehtavaid lihtsustusi ning erinevate väärtuste suurusi. Vabavaralist PyPowSyBI võrguarvutusteeki on võimalik kasutada suurte elektrisüsteemide modelleerimiseks ning seda võib pidada usaldusväärseks võrguarvutustarkvaraks püsitalituse arvutamisel. Tulevikus võiks uurida PyPowSyBI teisi funktsioone ning nende usaldusväärsust, näiteks dünaamiline analüüs.

SUMMARY

In the context of power systems, modeling and network analyses play a crucial role. A variety of software tools exist for such purposes, ranging from open-source solutions to professional software programs. The objective of this thesis was to evaluate whether an open-source software can reliably be used for power system modeling. The thesis focused on an open-source library PyPowSyBl, which is based on the Python programming language, and compared its performance to a professional software PSS/E.

First a brief overview of power system modeling and various network analysis software tools was given. This was followed by a more detailed overview of the software programs used in this thesis: PyPowSyBl and PSS/E. As part of this bachelor's thesis, a steady-state equivalent model of Estonia's 330/110 kV power system for the year 2030 was created using PSS/E and PyPowSyBl. Identical input parameters were used for both models. The source data were primarily obtained from Elering's development plan, an online network map e-Gridmap and also Riigihangete register. Assumptions and simplifications were made in cases where sufficient information was not available. The aim was to conduct a software comparison based on a network model with realistic parameters.

Modeling a large-scale power system is a time-consuming process, especially given that it had to be performed in two different software programs. The steady-state models consisted of 208 buses and 266 transmission lines. To compare the two software programs, four different steady-state scenarios were created. These included extreme winter and summer loads- both minimum and maximum cases for both. Forecasts for production and consumption were made to ensure that the data reflected the expected conditions in the year 2030. For each scenario, power flow analysis was carried out using both software programs, and for the winter maximum load scenario, an additional N-1 contingency analysis was conducted.

In terms of results, a brief analysis of the steady-state operation of the Estonian power system within the 2030 framework was conducted, with particular attention given to differences observed in the power flow calculation outcomes between the two software programs. In the Estonian network model, voltage levels in all scenarios, including the N-1 contingency analysis, remained within required limits. However, voltages were significantly higher than the nominal values, indicating underloaded transmission lines,

especially under low-load conditions, where most of the shunt reactors and generators in the system were absorbing reactive power.

In the case differences, winter maximum and summer minimum scenarios were analysed more thoroughly. For comparison PSS/E power flow results were taken as the base value and the difference percentage for PyPowSyBI results was calculated for different parameters. Average differences were calculated for all scenarios, excluding extreme edge cases that arose due to occasionally occurring very small values from power flow results. Depending on the scenario, the difference for the same parameter could differ. Differences were more significant in scenarios with lower system load and increased demand for reactive power compensation.

Most significant differences emerged in the terms of reactive power and active power losses. For reactive power flows in the transmission lines, differences were between -0,03% and 0,00% and in the case of generators the differences ranged from -2,75% to -0,04%. The larger differences of active power losses are caused by lower numeric values of the losses themselves. In the terms of active power flow, the differences were not that significant, because for the generators, an active power setpoint is given, but in case of reactive power a range is given instead. Of the transmission line parameters, active power flow had the least differences. Bus voltages differed by less than 0,01% on average.

Based on the results of the thesis, it can be stated that the observed differences do not significantly affect the outcome of load flow calculations, considering the simplifications made during the modelling process and the magnitude of respective values. Open-source software PyPowSyBI can be used for modeling large-scale power systems and be considered as a reliable software for steady-state power system analysis. In the future, other functionalities of PyPowSyBI, such as dynamic analysis, could be studied to assess its liability.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] „PSS®E – Power System Simulation for Engineering,” Siemens Energy, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.siemens.com/global/en/products/energy/grid-software/planning/pss-software/pss-e.html>. [Kasutatud 5. aprill 2025].
- [2] RTE, „PyPowSyBl’s user documentation,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://powsybl.readthedocs.io/projects/pypowsybl/en/stable/>. [Kasutatud 1. detsember 2024].
- [3] M. Meldorf ja J. Kilter, Elektrisüsteemi stabiilsus, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2011.
- [4] Elering AS, „Elektriülekandevõrgu arengukava 2025-2034,” 2025. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://elering.ee/node/2229>. [Kasutatud 2. veebruar 2025].
- [5] AS Elering, „Liitumisvõimsuste rakendus e-Gridmap,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://vla.elering.ee/>. [Kasutatud 20. detsember 2024].
- [6] „Riigihangete register,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web//#/>.
- [7] N. H. Ishak, I. S. Isa, S. Abdullah, S. Masri ja F. M. T. Tawi, „Performance comparison of electric power flow solutions using PSCAD,” *2010 International Conference on Science and Social Research (CSSR 2010)*, Kuala Lumpur, 2010.
- [8] Manitoba HVDC Research Centre, „PSCAD,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.pscad.com/>. [Kasutatud 5. aprill 2025].
- [9] The MathWorks, Inc., „MATLAB,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://se.mathworks.com/products/matlab.html>. [Kasutatud 5. aprill 2025].
- [10] E. Grishin, G. Gerasimov ja E. Gryazina, „Overview of Python Power Flow Solvers,” *2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*, Moskva, 2024.

- [11] L. Thurner, A. Scheidler, F. Schäfer, J.-H. Menke, J. Meier, S. Meinecke ja M. Braun, „pandapower — An open-source Python tool for convenient modeling, analysis, and optimization of electric power systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, kd. 33, nr 6, p. 6510–6519, 2018.
- [12] H. Manninen, „AEK0280 Elektrivõrgud (Kevad 2024),” Loengukonspekt, 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://moodle.taltech.ee/course/view.php?id=33299>. [Kasutatud 1. veebruar 2025].
- [13] Power World Corporation, „PowerWorld,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.powerworld.com/>. [Kasutatud 14. aprill 2025].
- [14] DIgSILENT, „PowerFactory Applications,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html>. [Kasutatud 14. aprill 2025].
- [15] MATPOWER, „About MATPOWER,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://matpower.org/about/>. [Kasutatud 14. aprill 2025].
- [16] Siemens PTI, PSS®E 34.9.6 Program Operation Manual, Schenectady: Siemens Industry, Inc., Power Technologies International, 2023.
- [17] Siemens PTI, PSS®E 34.9.6 Application Program Interface (API), Schenectady: Siemens Industry, Inc., Power Technologies International, 2023.
- [18] Linux Foundation Energy, „Power System Blocks,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.powsybl.org/index.html>. [Kasutatud 15. detsember 2024].
- [19] Baltic RCC, „Baltic RCC,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://baltic-rcc.eu/>. [Kasutatud 8. aprill 2025].
- [20] K. David A. ja D. E. Keyes, „Jacobian-free Newton–Krylov methods: a survey of approaches and applications,” *Journal of Computational Physics*, kd. 193, nr 2, p. 357–397, 2004.
- [21] Project Jupyter, „Jupyter Notebook,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://jupyter.org>. [Kasutatud 15. detsember 2024].

- [22] Riigihangete register, „330 kV õhuliini L300 rekonstrueerimine, M119 – Tartu 330/110kV alajaam,“ Elering AS, 15 juuni 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/1972092/documents?group=B>. [Kasutatud 20. detsember 2024].
- [23] Riigihangete register, „330 kV õhuliini L301 rekonstrueerimine, Tartu 330/110kV alajaam – EE-LV piir,“ Elering AS, 20. aprill 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/1651543/documents/source-document?group=B&documentOldId=13615247>. [Kasutatud 5. jaanuar 2025].
- [24] Google, „Google Maps,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.google.com/maps>. [Kasutatud 17. detsember 2024].
- [25] Maa- ja Ruumiamet, „Geoportaal,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://geoportaal.maaamet.ee/est/ruumiandmed/kaldaerofotod-p633.html>. [Kasutatud 17. detsember 2024].
- [26] NKT, „AHXCHBMK-W 64/110(123)kV 1x1600/35,“ 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://nkt.widen.net/content/hsypy8bob/pdf/AHXCHBMK-W-64_110123kV-1x1600_35-130118003.pdf?u=gj0n1y. [Kasutatud 1. veebruar 2025].
- [27] Riigihangete register, „Sünkrolülitusseadmed Harku, Kiisa ja Püssi AJ trafode 330kV võimsuslülititele,“ 26. märts 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/2997572/documents?group=B>. [Kasutatud 1. märts 2025].
- [28] Riigihangete register, „Paide 330 kV AJ releekaitse ja automaatika renoveerimine,“ Elering AS, 14. veebruar 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/8340824/documents?group=B>. [Kasutatud 1. märts 2025].

- [29] Elering AS, „Eesti elektriülekandevõrgu arengukava 2024-2033,“ 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval:
<https://www.elering.ee/sites/default/files/public/elekter/elektris%C3%BCsteem/Eesti%20elektri%C3%BClekandev%C3%B5rgu%20arengukava%202024-2033.pdf>. [Kasutatud 1. märts 2025].
- [30] Riigihangete register, „Harku AJ reaktorite keskpinge lülitusseadmete vahetus,“ Elering AS, 12 juuni 2023. [Võrgumaterjal]. Saadaval:
<https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/5997380/documents/source-document?group=B&documentOldId=16485880>. [Kasutatud 1. märts 2025].
- [31] Riigihangete register, „Aruküla AJ ja Kiisa AJ reaktorite keskpinge lülitusseadmete vahetus ning Kiisa AJ voolupiiravate reaktorite paigaldus,“ Elering AS, 29. september 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval:
<https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/3447036/documents?group=B>. [Kasutatud 1. märts 2025].
- [32] Riigihangete register, „Õhuliinide L300 ja L301 sekundaarosa ümberehitus Tartu, Püssi ja Balti 330 kV alajaamades,“ Elering AS, 7. september 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/3329897/documents?group=B>. [Kasutatud 1. märts 2025].
- [33] Riigihangete register, „Tsirguliina 330kV alajaama renoveerimine,“ Elering AS, 17. detsember 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval:
<https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/720877/documents?group=B>. [Kasutatud 1. märts 2025].
- [34] Riigihangete register, „Tartu 330kV trafode reserveerimine ja voolu piiravate reaktorite paigaldamine II,“ Elering AS, 29. oktoober 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/7929485/documents?group=B>. [Kasutatud 1. märts 2025].

- [35] Riigihangete register, „Rakvere 330/110kV trafo,“ Elering AS, 17. veebruar 2023. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/5268940/documents?group=B>. [Kasutatud 1. märts 2025].
- [36] Riigihangete register, „Sindi 330kV alajaamas liitumispunkti ehitamine,“ Elering AS, 9. märts 2023. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/5604960/documents/source-document?group=B&documentOldId=16624610> . [Kasutatud 1. märts 2025].
- [37] Riigihangete register, „Lihula 330 kV AJ rajamine III,“ Elering AS, 10. märts 2023. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/5647720/documents?group=B>. [Kasutatud 1. märts 2025].
- [38] Elering AS, „Artikkel sünkroonkompensaatoritest,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://elering.ee/sites/default/files/public/Artikkel%20s%C3%BCnkroonkompensaatoritest.pdf>. [Kasutatud 1. märts 2025].
- [39] Riigihangete register, „Elektrilevi OÜ liitumine Veskimetsa 110kV alajaamas,“ Elering AS, 21. juuni 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/7416144/documents?group=B>. [Kasutatud 1. märts 2025].
- [40] Riigihangete register, „Viljandi 110/35/15/6 kV alajaama SEK paneelid ja KV] siseinstall (IK1242, LP8941).,“ Elektrilevi OÜ, 15. oktoober 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/7922944/documents?group=B>. [Kasutatud 1. märts 2025].
- [41] Riigihangete register, „Mustvee 330kV liituja lahter,“ Elering AS, 7. august 2023. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/6232864/documents?group=B>. [Kasutatud 1. märts 2025].
- [42] E. Tiigimägi, Elektrivõrgud, Tallinn, 1997.

- [43] Elering AS, „Elering Live,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://dashboard.elering.ee/et>. [Kasutatud 20. veebruar 2025].
- [44] Konkurentsiamet, „Võrgueeskirjad,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.konkurentsiamet.ee/elekter-gaas-soojus-ja-vesi/elekter/vorgueeskirjad>. [Kasutatud 22. veebruar 2025].
- [45] Elering AS, „Eesti elektrivarustuskindluse analüüs,“ 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://elering.ee/sites/default/files/public/varustuskindluse%20konverentsid/Elering_VKA_2024_0.pdf. [Kasutatud 2. märts 2025].
- [46] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, „EVS-EN 60038:2012. CENELEC-i standardpinged,“ 2012. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.evs.ee/et/evs-en-60038-2012>.
- [47] Riigihangete register, „Roela 110 kV alajaama renoveerimine,“ Elering AS, 10. veebruar 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/2847332/documents/source-document?group=B&documentOldId=14174572>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [48] Riigihangete register, „Võrumaa Haanja vald Ruusmäe AJ 10 kV maaühendusvoolude kompenseerimiseadme paigaldamine IK0763,“ Enefit AS, 27. veebruar 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/711058/documents/source-document?group=B&documentOldId=5748693>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [49] Riigihangete register, „Koigi 110 kV alajaama renoveerimine kompaktaalajaamaks,“ Elering AS, 8. aprill 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/2947793/documents/source-document?group=B&documentOldId=14362364>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [50] Riigihangete register, „Haapsalu 110kV alajaam,“ Elering AS, 21. märts 2025. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/7027572/documents?group=B>. [Kasutatud 1. aprill 2025].

- [51] Riigihangete register, „Ruusa 110kV alajaama renoveerimine,“ Elering AS, 29. november 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/3872168/documents/source-document?group=B&documentOldId=15843571>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [52] Riigihangete register, „Põlvamaa Valgjärve vald Maaritsa AJ 10 kV maaühendusvoolude kompenseerimiseadme paigaldamine IK0759,“ Elering AS, 9. märts 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/711566/documents/source-document?group=B&documentOldId=8172506>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [53] Riigihangete register, „Loo 110 kV AJ releekaitse ja automaatika renoveerimine,“ Elering AS, 3. august 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/3419256/documents/source-document?group=B&documentOldId=15679101>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [54] Riigihangete register, „Elva 110kV alajaama renoveerimine,“ Elering AS, 23. november 2023. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/6551828/documents/source-document?group=B&documentOldId=16965112>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [55] Riigihangete register, „Vändra 110 kV alajaama liitumine,“ Elering AS, 11. november 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/4792120/documents/source-document?group=B&documentOldId=16038110>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [56] Riigihangete register, „Kolga 110/10 kV alajaama osaline rekonstrueerimine (IK0956),“ Enefit AS, 2. veebruar 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/722080/documents/source-document?group=B&documentOldId=12700997>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [57] Riigihangete register, „Risti 110kV alajaama rekonstrueerimine,“ Elering AS, 14. november 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/727364/documents/source-document?group=B&documentOldId=11879897>. [Kasutatud 3. märts 2025].

- [58] Riigihangete register, „Voldi 110/15 kV 110kV AJ vannvundamendi rekonstrueerimine, jõutrafo sidumine ja töösse viimine LP9025,“ Enefit AS, 22. november 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/5205440/documents?group=B>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [59] Riigihangete register, „Järvakandi 110 kV alajaama renoveerimine,“ Elering AS, 31. detsember 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/2755292/documents/source-document?group=B&documentOldId=14930766>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [60] Riigihangete register, „Papiniidu 110kV alajaama releekaitse ja automaatika renoveerimine,“ Elering AS, 3. oktoober 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/4724040/documents/source-document?group=B&documentOldId=15721937>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [61] Riigihangete register, „Virtsu 110/35/10 10 kV alajaama jaotusseadme ost (LR9429),“ Elektrilevi OÜ, 24. oktoober 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/7931204/documents/source-document?group=B&documentOldId=17719699>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [62] Riigihangete register, „Tusti 110kV alajaama renoveerimine II,“ Elering AS, 13. september 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/7607885/documents/source-document?group=B&documentOldId=17834403>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [63] Riigihangete register, „Liitumine Paljassaare 110 kV alajaamas,“ Elering AS, 19. aprill 2023. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/5777760/documents/source-document?group=B&documentOldId=17847935>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [64] Riigihangete register, „Saarde 110kV alajaama ehitus,“ Elering AS, 1. juuni 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/4423788/documents/source-document?group=B&documentOldId=15427999>. [Kasutatud 3. märts 2025].

- [65] Riigihangete register, „Elektrilevi OÜ Aravete 110/35/10 kV alajaama 10 kV maaühendusvoolu kompenseerimisseadme ja maaühenduskaitsete paigaldamine (Aravete alevik, IK0510),“ Enefit AS, 20. veebruar 2015. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/688075/documents/source-document?group=B&documentOldId=4206999>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [66] Riigihangete register, „Elektrilevi OÜ Ekskavaatori 35/6 kV AJ 6 kV ja 35 kV JS (Marja tn 6, Tallinn) ning Viitna 110/10 kV AJ 10 kV JS (Rõmeda küla, Kadrina vald, Lääne-Viru maakond) rekonstrueerimine. IK0547, IK0555.,“ Enefit AS, 24. august 2015. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/692392/documents/source-document?group=B&documentOldId=3237664>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [67] Riigihangete register, „Jäneda 110/20/10 kV alajaama 20 kV jaotusseadme sidumine ja töösse viimine TR0876,“ Elektrilevi OÜ, 25. juuli 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/7639444/documents?group=B>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [68] Riigihangete register, „Kehra 110kV alajaama releekaitse ja automaatika renoveerimine,“ Elering AS, 2. veebruar 2025. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/8179165/documents?group=B>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [69] Riigihangete register, „Alatskivi 110kV alajaama renoveerimine,“ Elering AS, 9. august 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/7613944/documents/source-document?group=B&documentOldId=17583032>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [70] Riigihangete register, „Järveküla 110/20 kV alajaama elektriehitustööd. Põdra tee 1, Uuesalu küla, Rae vald, Harju mk (LR4469).,“ Elektrilevi OÜ, 4. september 2023. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/6305419/documents/source-document?group=B&documentOldId=16750475>. [Kasutatud 3. märts 2025].

- [71] Riigihangete register, „Kuusalu 110/10 kV alajaama 10 kV jaotusseadme laiendamine (LP5847),“ Enefit AS, 13. mai 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/1573081/documents/source-document?group=B&documentOldId=13306393>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [72] Riigihangete register, „Abja 110 kV alajaama renoveerimine,“ Elering AS, 23. märts 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/1718952/documents/source-document?group=B&documentOldId=14492508>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [73] Riigihangete register, „Elektrilevi OÜ Ida 110/10 kV alajaama 10 kV trafofiidrite releekaitse uuendamine ja RTU vahetus (IK0705),“ Enefit AS, 20. jaanuar 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/709726/documents/source-document?group=B&documentOldId=5780594>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [74] Riigihangete register, „Jägala 110/20/10 kV alajaama 10 kV maaühendusvoolu kompenseerimisseadme paigaldamine,“ Elering AS, 8. mai 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/714074/documents/source-document?group=B&documentOldId=5790162>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [75] Riigihangete register, „Audru 110kV alajaama renoveerimine ja liitumine,“ Elering AS, 24. august 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/4861400/documents/source-document?group=B&documentOldId=17485207>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [76] Riigihangete register, „Kabli 110kV alajaama renoveerimine ja liitumine,“ Elering AS, 30. oktoober 2023. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/6485548/documents/source-document?group=B&documentOldId=16889153>. [Kasutatud 3. märts 2025].

- [77] Riigihangete register, „Emajõe 110/10 kV alajaama trafode hange ja paigaldamine,“ Elering AS, 27. aprill 2016. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/701676/documents?group=B>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [78] Riigihangete register, „Rõngu 110/35/10 kV alajaama 10 MVA ja 6,3 MVA trafode hange,“ Elering AS, 12. detsember 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/720523/documents/source-document?group=B&documentOldId=12451451>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [79] Riigihangete register, „Elektrilevi OÜ teine 110kV liitumine (LP4) Metsakombinaadi alajaamas,“ Elering AS, 5. oktoober 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/2363212/documents/source-document?group=B&documentOldId=14826354>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [80] Riigihangete register, „Jõgeva 110/35/15/10kV alajaama rekonstrueerimine (IP4516, IK1639),“ Elering AS, 19. juuni 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/7483424/documents/source-document?group=B&documentOldId=17536926>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [81] Riigihangete register, „Tööstuse 110/6(10) kV alajaama rekonstrueerimine (IK0356),“ Enefit AS, 23. jaanuar 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/709714/documents?group=B>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [82] Riigihangete register, „Kohila 110/10 kV alajaama maaühendusvoolu kompenseerimisseadmete paigaldus (IK0953),“ Elering AS, 13. veebruar 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/722324/documents/source-document?group=B&documentOldId=6866225>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [83] Riigihangete register, „Mustamäe 110/6 kV alajaama 110/10/6 kV 31,5MVA trafode ost ja paigaldamine,“ Enefit AS, 29. jaanuar 2016. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/698155/documents/source-document?group=B&documentOldId=2428924>. [Kasutatud 3. märts 2025].

- [84] Riigihangete register, „Rapla 110/35/10 kV AJ 10 kV maaühendusvoolu kompenseerimiseadmete paigaldamine, IP2939,“ Enefit AS, 3. juuni 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/1580199/documents/source-document?group=B&documentOldId=12744887>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [85] Riigihangete register, „Lasnamäe 110 kV alajaama releekaitse ja automaatika renoveerimine,“ Elering AS, 4. august 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/4371048/documents/source-document?group=B&documentOldId=15590052>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [86] Riigihangete register, „Niidu 110kV alajaama ehitus,“ Elering AS, 4. oktoober 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/4978140/documents/source-document?group=B&documentOldId=15808267>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [87] Riigihangete register, „Sikassaare 110/35/10 kV alajaama lisatööd (IK1013),“ Elektrilevi OÜ, 20. veebruar 2025. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/8460425/documents/source-document?group=B&documentOldId=17978710>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [88] Riigihangete register, „Viimsi 110/10 kV AJ kahe trafovundamendi ehitamine ja 110kV jõutrafode sidumine LP9474,“ Elektrilevi OÜ, 23. november 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/5230740/documents/source-document?group=B&documentOldId=17151310>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [89] Riigihangete register, „Iru 110kV alajaama releekaitse ja automaatika renoveerimine,“ Elering AS, 2. juuni 2023. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/5169340/documents/source-document?group=B&documentOldId=16450789>. [Kasutatud 3. märts 2025].

- [90] Riigihangete register, „Liitumine Paikuse 110kV alajaamas,“ Elering AS, 24. august 2023. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/6242204/documents/source-document?group=B&documentOldId=16802758>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [91] Riigihangete register, „Topi 110/10 kV AJ C1T jõutrafo vannvundamendi ümberehitamine ja uue C1T jõutrafo võrguga sidumine (LR0384),“ Elektrilevi OÜ, 7. juuli 2023. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/6147860/documents/source-document?group=B&documentOldId=17189976>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [92] Riigihangete register, „LVT 110/35/6 kV alajaama 35 kV osa võrgust lahti ühendamine ja demontaaž,“ Elektrilevi OÜ, 11. detsember 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/8185745/documents/source-document?group=B&documentOldId=17941053>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [93] Riigihangete register, „Põdra 110 kV alajaama rekonstrueerimine ja liitumine,“ Elering AS, 23. september 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/3620356/documents/source-document?group=B&documentOldId=14932699>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [94] Riigihangete register, „Saare 110/15/10kV alajaama vahetrafo ost ja paigaldamine (IP6247),“ Elektrilevi OÜ, 19. juuni 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/7507384/documents/source-document?group=B&documentOldId=17493933>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [95] Riigihangete register, „Tapa 110/35/10kV alajaama 35kV jaotusseadme rekonstrueerimine (TC0243, IK1550),“ Elektrilevi OÜ, 20. mai 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/7376764/documents/source-document?group=B&documentOldId=17252386>. [Kasutatud 3. märts 2025].

- [96] Riigihangete register, „Alutaguse 110/35/6 kV alajaama 35 kV ja 6 kV jaotusseadmete osaline rekonstrueerimine (LR5508, LR5509, LR5510).“, Enefit AS, 28. oktoober 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/5017100/documents/source-document?group=B&documentOldId=15981202>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [97] Riigihangete register, „Kanepi 110kV alajaama laiendus ja liitumine“, Elering AS, 24. aprill 2023. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/5794700/documents/source-document?group=B&documentOldId=16491272>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [98] Riigihangete register, „Ülejõe 110 kV alajaama liitumine“, Elering AS, 20. detsember 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/5324260/documents/source-document?group=B&documentOldId=16180431>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [99] Riigihangete register, „Anne 110/35/15/10 kV alajaama 35 kV jaotusseadme rekonstrueerimine (IK1241)“, Enefit AS, 27. aprill 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/3173512/documents/source-document?group=B&documentOldId=14781540>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [100] Riigihangete register, „Kuuste 110kV alajaama renoveerimine“, Elering AS, 8. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/7057052/documents/source-document?group=B&documentOldId=17263604>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [101] Riigihangete register, „Võru 110kV releekaitse ja automaatika renoveerimine“, Elering AS, 22. november 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/4371028/documents/source-document?group=B&documentOldId=15992966>. [Kasutatud 3. märts 2025].

- [102] Riigihangete register, „Raasiku 110/10 kV alajaama maaühendusvoolude kompenseerimisseadme paigaldamine,“ Elektrilevi OÜ, 9. juuli 2014. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/617147/documents/source-document?group=B&documentOldId=4539457>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [103] „Ranna 110/10/6 kV alajaama 10 kV ja 6 kV jaotusseadmete rekonstrueerimine IK1045,“ Enefit AS, 28. veebruar 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/1553319/documents/source-document?group=B&documentOldId=14341428>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [104] Riigihangete register, „Reola 110/10 kV alajaama 10 kV jaotusseadme ehitamine ja 110/10 kV trafode töösse viimine (IK0767),“ Elektrilevi OÜ, 31. oktoober 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/8003464/documents?group=B>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [105] Riigihangete register, „Elektrilevi OÜ liitumine Kivimäe 110/6 kV alajaamas,“ Elering AS, 11. juuni 2014. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/609328/documents/source-document?group=B&documentOldId=8378930>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [106] Riigihangete register, „Liitumine Lihula 110kV alajaamas,“ Elering AS, 6. detsember 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/3643357/documents/source-document?group=B&documentOldId=15168967>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [107] Riigihangete register, „Põlva 110kV alajaama mõõtetrafode vahetus,“ Elering AS, 8. august 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/7416064/documents/source-document?group=B&documentOldId=17546993>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [108] Riigihangete register, „Nuia 110/35 kV alajaama kaheahelalise õhuliini eelprojekti koostamine (IK0348),“ Enefit AS, 18. november 2015. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/696647/documents/source-document?group=B&documentOldId=2937924>. [Kasutatud 3. märts 2025].

- [109] Riigihangete register, „AS Saarte Liinid liitumine Võiküla 110 kV alajaamas,“ Elering AS, 5. aprill 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/4354608/documents/source-document?group=B&documentOldId=15496231>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [110] Riigihangete register, „Taebla 110kV alajaama renoveerimine läbijooksvaks alajaamaks,“ Elering AS, 9. jaanuar 2025. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/7997564/documents?group=B>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [111] Riigihangete register, „Vigala 110kV alajaama liitumine,“ Elering AS, 29. august 2023. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/6313896/documents/source-document?group=B&documentOldId=17030617>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [112] Riigihangete register, „Enefit Kaevandused AS liitumine Illuka 110 kV alajaamas,“ Elering AS, 26. aprill 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/713682/documents/source-document?group=B&documentOldId=6337874>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [113] Riigihangete register, „Muhu 110kV AJ renoveerimine kompaktaalajaamaks,“ Elering AS, 6. november 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/2495172/documents/source-document?group=B&documentOldId=14833502>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [114] Riigihangete register, „Elektrilevi OÜ liitumine Elektriijaama 110 kV alajaamas,“ Elering AS, 28. märts 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/4313468/documents/source-document?group=B&documentOldId=15424941>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [115] Riigihangete register, „Kopli 110kV alajaama renoveerimine,“ Elering AS, 17. märts 2016. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/700227/documents/source-document?group=B&documentOldId=7727681>. [Kasutatud 3. märts 2025].

- [116] Riigihangete register, „Haljala 110kV alajaama rekonstrueerimine,“ Elering AS, 7. mai 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/6972392/documents/source-document?group=B&documentOldId=17503358>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [117] Riigihangete register, „Pärnu-Jaagupi AJ 110kV lahter,“ Elering AS, 22. veebruar 2023. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/5597060/documents/source-document?group=B&documentOldId=16269580>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [118] Riigihangete register, „Keila 110/35/10 kV alajaama 35 kV maaühendusvoolu kompenseerimisseadmete paigaldamine,“ Enefit AS, 5. mai 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/714019/documents/source-document?group=B&documentOldId=5827977>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [119] Riigihangete register, „Leisi 110/35/10 kV alajaama 16 MVA jõutrafode töösse viimine (IK1031),“ Elektrilevi OÜ, 13. veebruar 2023. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/5551740/documents/source-document?group=B&documentOldId=17969810>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [120] Riigihangete register, „L036 Rõuste – Virtsu 110kV kaabelliini ehitus,“ Elering AS, 18. september 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/7744684/documents/source-document?group=B&documentOldId=17834944>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [121] Riigihangete register, „Tõnismäe 110/10 kV alajaama 10 kV jaotla laiendamine,“ Enefit AS, 8. märts 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/709678/documents/source-document?group=B&documentOldId=5971637>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [122] Riigihangete register, „Kiikla 110/6kV alajaama kambrite 604 ja 609 rekonstrueerimine (TR0896),“ Enefit AS, 28. märts 2023. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/5732680/documents/source-document?group=B&documentOldId=16696875>. [Kasutatud 3. märts 2025].

- [123] Riigihangete register, „Suure-Jaani 110/15 kV alajaama 15 kV jaotusseadme laiendamine (LR5698),“ Elektrilevi OÜ, 7. veebruar 2025. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/8404368/documents/source-document?group=B&documentOldId=17951037>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [124] Riigihangete register, „Linda 110kV alajaama renoveerimine II,“ Elering AS, 27. september 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/7603664/documents/source-document?group=B&documentOldId=17706455>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [125] Riigihangete register, „Martna 110 kV alajaama renoveerimine kompakjalajaamaks,“ Elering AS, 10. märts 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/1713532/documents?group=B>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [126] Riigihangete register, „Kehtna 110kV alajaama renoveerimine,“ Elering AS, 17. veebruar 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/1570817/documents?group=B>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [127] Riigihangete register, „Kiini 110 kV alajaama rajamine,“ Elering AS, 6. aprill 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/724007/documents?group=B>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [128] Riigihangete register, „Uus-Riisipere 110/20 kV piirkonnaalajaama ehitamine IK0669,“ Enefit AS, 2. november 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/2540793/documents?group=B>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [129] Riigihangete register, „Kadaka 110kV alajaama renoveerimine III,“ Elering AS, 8. jaanuar 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/6756048/documents?group=B>. [Kasutatud 3. märts 2025].

- [130] Riigihangete register, „Liitumine Otepää 110 kV alajaamas,“ Elering AS, 16. juuni 2023. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/6046900/documents?group=B>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [131] Riigihangete register, „Elektrilevi OÜ liitumine Kullamaa 110kV alajaamas,“ Elering AS, 29. november 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/3912608/documents?group=B>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [132] Riigihangete register, „Kunda 110kV alajaama renoveerimine III,“ Elering AS, 14. oktoober 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/7763824/documents?group=B>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [133] Riigihangete register, „Rõuge 110/10 kV alajaama 10 kV maaühendusvoolu kompenseerimisseadmete paigaldamine (IK0764),“ Enefit AS, 21. märts 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/712079/documents?group=B>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [134] Riigihangete register, „Imavere 110/15 kV alajaama 15 kV jaotusseadme laiendamine (LR5094).,“ Elektrilevi OÜ, 22. veebruar 2023. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/5606962/documents?group=B>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [135] Riigihangete register, „Väike-Maarja 110 kV alajaama renoveerimine,“ Elering AS, 25. märts 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/1554437/documents?group=B>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [136] Riigihangete register, „Orissaare 110kV alajaama laiendus,“ Elering AS, 22. november 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/5082860/documents?group=B>. [Kasutatud 3. märts 2025].

- [137] Riigihangete register, „Liitumine Rummu 110 kV alajaamas,“ Elering AS, 14. detsember 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/3880148/documents?group=B>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [138] Riigihangete register, „Nõva 110 kV alajaama renoveerimine II,“ Elering AS, 25. oktoober 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/7898324/documents?group=B>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [139] Riigihangete register, „Soo 110 kV alajaama rekonstrueerimine,“ Elering AS, 15. september 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/3500696/documents?group=B>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [140] Riigihangete register, „Elektrilevi OÜ liitumine Paldiski 110kV alajaamas,“ Elering AS, 16. november 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/3876008/documents?group=B>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [141] Riigihangete register, „Oiu 110kV alajaama renoveerimine,“ Elering AS, 14. märts 2025. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/8522744/documents?group=B>. [Kasutatud 27. märts 2025].
- [142] Riigihangete register, „Jüri 110 kV AJ releekaitse ja automaatika renoveerimine,“ Elering AS, 26. veebruar 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/2943793/documents?group=B>. [Kasutatud 3. märts 2025].
- [143] Riigihangete register, „Valjala 110/10 kV alajaama 10 kV jaotusseadmete rekonstrueerimine (IK0633),“ Enefit AS, 24. august 2016. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/705174/documents?group=B>. [Kasutatud 3. märts 2025].

[144] Riigihangete register, „Viru 330kV, Balti 330kV ja Eesti EJ OT alajaama ümberehitustööd,“ Elering AS, 18. september 2020. [Võrgumaterjal].
Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/2364192/documents?group=B>. [Kasutatud 3. märts 2025].

[145] Riigihangete register, „Mustvee 110/35/15/10 kV alajaama 35 kV jaotusseadme rekonstrueerimine (TR0751, IK1390, LR5681),“ Elektrilevi OÜ, 28. aprill 2023. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/5850540/documents?group=B>. [Kasutatud 3. märts 2025].