



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**ENERGIASALVESTIL PÕHINEVATE
PAINDLIKKUSTEENUSTE TASUVUS PAKRI
TEADUS- JA TÖÖSTUSPARGI SULETUD
JAOTSUVÕRGUS**

**FEASIBILITY OF ENERGY STORAGE BASED FLEXIBILITY
SERVICES IN THE CLOSED DISTRIBUTION GRID OF
PAKRI SCIENCE AND INDUSTRIAL PARK**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Janar Areng

Üliõpilaskood 203965AAVM

Juhendaja: teadur Imre Drovtar
prof Argo Rosin

Tallinn 2022

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.

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

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Janar Areng

Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose "Energiasalvestil põhinevate paindlikkusteenuste tasuvus Pakri Teadus- ja Tööstuspargi suletud jaotusvõrgus", mille juhendajad on teadur Imre Drovtar ja professor Argo Rosin

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.

1. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

2. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

_____ (kuupäev)

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 loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Janar Areng

Lõputöö liik: Magistritöö

Töö pealkiri: Energiasalvestil põhinevate paindlikkusteenuste tasuvus Pakri Teadus- ja Tööstuspargi suletud jaotusvõrgus

Kuupäev:
18.05.2022

88 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendajad: teadur Imre Drovtar, professor Argo Rosin

Sisu kirjeldus: Magistritöö on koostatud Targa linna tippkeskuse poolt läbi viidava pilootprojekti „Energiavajaduse vähendamine mikro võrkude ning energiasalvestite abil“ algandmete baasil. Lõputööeesmärgiks on uurida Pakri Teadus- ja Tööstuspargi suletud jaotusvõrgu mudeli baasil, kuidas parandada rajatava energiasalvesti majanduslikku tasuvust läbi pakutavate paindlikkusteenuste.

Töös antakse ülevaade elektrienergia tarbimisest, tootmisest, paindlikkusest, paindlikkusteenustest, energiasalvestitest ning milliseid paindlikkusteenuseid saavad akusalvestid pakkuda elektrivõrgule. Antud lõputöö käsitleb kolme teenust - energia arbitraaži, sageduse reguleerimist ning taastuenergia lokaalse tarbimise suurendamist.

Töö käigus modelleeritakse DIgSILENT PowerFactory tarkvaras pilootala võrgumudel ning akusalvesti mudel. Stsenaariumid koostatakse kasutades DIgSILENT, DER-VET tarkvara, neljandas peatükis võrreldakse saadud tulemusi referents stsenaariumiga ning teostatakse tulemuste analüüs kasutades tabelarvutusprogrammi. Lõputöö viimases peatükis teostatakse stsenaariumite tulemuste põhjal tasuvusanalüüs ning antakse hinnang paindlikkusteenuste tasuvusele. Tulemustest selgus, et paindlikkusteenused eraldi seisvalt teenivad küll tulu, kuid ei muuda akusalvestit tasuvaks. Kombineerimine võimaldab tõsta akusalvesti tasuvust, kuid seda akusalvesti eluea arvelt. Kõike kolme teenust pakkuv stsenaarium osutus ainsana tasuvaks

Märksõnad: akusalvestid, taastuenergia, elektrivõrgu paindlikkus, paindlikkusteenused, tasuvus, suletud jaotusvõrk, DIgSILENT, DER-VET.

ABSTRACT

Author: Janar Areng

Type of the work: Master Thesis

Title: Feasibility of energy storage based flexibility services in the closed distribution grid of Pakri Science and Industrial Park

Date: 18.05.2022

88 pages

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisors of the thesis: Research Scientist Imre Drovтар, Professor Argo Rosin

Abstract: This master's thesis has been written on the basis of the initial data of the pilot project "Reducing Energy Supply Requirements Using Microgrids and Energy Storage" carried out by the Smart City Center of Excellence. The aim of the thesis is to determine, how to improve the economic profitability of energy storage by offering flexibility services to the grid and final consumer. The thesis provides an overview of electricity consumption, generation, flexibility, flexibility services, energy storage and which flexibility services can be provided by battery energy storage to the electrical grid. This thesis deals with three flexibility services - energy arbitrage, frequency regulation and increasing the local consumption of renewable energy.

The model of the pilot site and battery will be modeled using DIgSILENT PowerFactory software. The scenarios are developed based on the results of DIgSILENT and DER-VET software. In the fourth chapter the results of the scenarios are given and analysed. In the last chapter of the thesis, a cost-benefit analysis is performed based on the results of the scenarios after which the profitability of the flexibility services will be assessed.

The results show that even though all of the flexibility services generate revenue separately they don't make the battery energy storage profitable. Stacking the flexibility services greatly increases the revenue but at the expense of the battery lifespan. The scenario offering all three services proved to be the only one to turn profit at the end of its cycle life.

Keywords: battery energy storage, renewable generation, flexibility, flexibility services, feasibility, DIgSILENT, DER-VET, closed distribution system

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Energiasalvestil põhinevate paindlikkusteenuste tasuvus Pakri Teadus- ja Tööstuspargi suletud jaotusvõrgus**

Lõputöö teema inglise keeles: **Feasibility of Energy Storage Based Flexibility Services in the Closed Distribution Grid of Pakri Science and Industrial Park**

Üliõpilane: **Janar Areng, 203965AAVM**

Eriala: **Elektroenergeetika**

Lõputöö liik: **magistritöö**

Lõputöö juhendaja: **Imre Drovtar**

Lõputöö kaasjuhendaja: **Argo Rosin**

Lõputöö ülesande
kehtivusaeg: **1 aasta**
Lõputöö esitamise tähtaeg: **18.05.2022**

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Hajaenergeetika tootmiseseadmete osakaalu järkjärguline suurenemine Eesti elektrisüsteemis viimastel aastatel ning Euroopa Liidu üldine energiapoliitika viib paratamatult mikrovõrkude osakaalu suurenemiseni, kus toodetakse osa või kogu vajaminev energia kohapeal. Targa linna tippkeskuse poolt läbi viidava pilootprojekti „Energiavajaduse vähendamine mikrovõrkude ning energiasalvestite abil“ (01.01.2021-31.05.2023) raames lisatakse Pakri tööstuspargi suletud jaotusvõrku energiasalvesti. Käesolev töö ja selle raames arendatav mudel võimaldab hinnata energiasalvestite majanduslikku tasuvust ning võimalust vähendada mikrovõrkude sõltuvust välisvõrgust.

2. Töö eesmärk

Magistritöö eesmärgiks on uurida Pakri tööstuspargi suletud jaotusvõrgu mudeli baasil, kuidas parandada energiasalvesti majanduslikku tasuvust läbi lõpptarbijale ja elektrivõrgu operaatorile pakutavate paindlikkusteenuste.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

1. Analüüs millised nõuded on suletud jaotusvõrkudele, elektrisalvestitele ja nende poolt pakutavatele paindlikkusteenustele?
2. Milliseid paindlikkusteenuseid saab energiasalvesti poolt pakkuda süsteemioperaatoritele (nii jaotusvõrgu- kui põhivõrguoperaatorile) ja lõpptarbijale, et parandada salvesti majandusliku tasuvust?
3. Anda ülevaade olemasolevast suletud jaotusvõrgust ning olemasolevatest ning lisanduvatest seadmetest.
4. Looa Pakri tööstuspargi suletud jaotusvõrgu mudel ning simuleerida energiasalvesti toimimist, kasutades DigSilent PowerFactory tarkvara.
5. Analüüsida millised paindlikkusteenused on tehnilis-majanduslikult kõige tasuvamad, milline teenuste kooslus annab parima tasuvuse?

4. Lähteandmed

1. Olemasoleva võrgu parameetrid mudeli loomiseks
2. DigSilent PowerFactory kasutusjuhendid mudeli loomiseks
3. Suletud jaotusvõrgus olevate seadmete andmed
4. Suletud jaotusvõrgu tarbimise ja tootmise andmed
5. Standardid ja seadusandlus, mis käsitleb suletud jaotusvõrke
6. Salvesteid ja nende poolt pakutavaid teenuseid käsitlev Euroopa seadusandlus ning publitseeritud teadusartiklid

5. Uurimismeetodid

Uurimismeetoditeks on andmete kogumine eriala- ja teaduskirjandusest ning nende analüüs, mille tulemusena saab anda ülevaate energiasalvestitest, olemasolevast võrgust ning võimalustest suletud jaotusvõrgu energiasõltumatuse tõstmiseks. Vaadeldava võrgu mudel ja simulatsioonid koostatakse DigSILENT PowerFactory keskkonnas. Saadud tulemuste analüüsiks kasutatakse MS Excel tarkvara.

6. Graafiline osa

Töö graafiline osa paikneb nii lõputöö põhiosas kui ka lisadena.

1. Olemasoleva mikrovõrgu skeem
2. Võrgu tootmise- ja koormusgraafikud

3. Modelleeritud võrgu mudel
4. Tulemuste esitlemiseks tabelid/graafikud

7. Töö struktuur

1. Sissejuhatus
2. Teoreetiline alus
 - 2.1. Ülevaade suletud jaotusvõrkudest
 - 2.2. Energiasalvestid
 - 2.3. Paindlikkusteenused süsteemioperaatori ja lõpptarbija jaoks
 - 2.4. Seadusandlus
3. Pakri teaduspargi suletud jaotusvõrk
 - 3.1. Objekti kirjeldus
 - 3.2. Olemasoleva võrgu skeem
 - 3.3. Suletud jaotusvõrgu seadmete nimekiri ja andmed
4. Suletud jaotusvõrgu mudel
 - 4.1. DigSILENT modelleerimistarkvara kirjeldus
 - 4.2. Koostatud suletud jaotusvõrgu mudel
 - 4.3. Suletud jaotusvõrgu mudel koormuste lisandumisel
5. Stsenaariumid
 - 5.1. Baasstsenaarium – taastuvenergia lokaalne tarbimine
 - 5.2. Paindlikkusteenused süsteemioperaatorile
 - 5.3. Paindlikkusteenused lõpptarbijale
6. Tulemuste analüüs
 - 6.1. Lahenduste tehniline analüüs
 - 6.2. Majanduslik analüüs
7. Kokkuvõte
8. Lisad

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Teaduspublikatsioonid, erialane kirjandus, standardid, seadusandlikud aktid, tarkvara kasutusjuhend.

1. Official Journal of the European Union, Directive 2009/72/EC
2. Elektriturseadus
3. „Energy Storage for Sustainable Microgrid“ – D. W. Gao. 2015
4. „Powerfactory 2020: User Manual“ – DIgSILENT GmbH. 2020
5. „Jaotusvõrgud“ - J. Kilter, M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt. 2007

9. Lõputöö konsultandid

Victor Astapov – DIgSILENTIGA modelleerimisel tekkivad küsimused

10. Töö etapid ja ajakava

Töö ajakava ja struktuur võivad töö käigus muutuda.

Loetelu töö etappidest:

- Allikate ja lähteandmete kogumine (31.12.2021)
- Tarkvara kasutusjuhendi läbitöötamine mudeli koostamiseks (15.01.2022)
- Materjalide läbitöötamine (01.02.2022)
- Esialgse mudeli valmimine (1.03.2022)
- Teoreetilise osa kirjutamine (15.03.2022)
- Vajadusel mudeli täiustamine (1.04.2022)
- Tulemuste analüüs/järeldused (30.04.2022)
- Töö esimese versiooni valmimine ja juhendajale läbilugemiseks saatmine (30.04.2022)
- Parandused ja töö teise versiooni valmimine ja juhendajale läbilugemiseks saatmine (06.05.2022)
- Parandused ja töö lõpliku versiooni valmimine (16.05.2022)
- Töö esitamine (18.05.2022)

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel.

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	13
SISSEJUHATUS	14
1. TEOREETILINE ALUS	16
1.1 Ülevaade elektrienergia tarbimisest ja tootmisest	16
1.1.1 Globaalne elektrienergia tarbimine	16
1.1.2 Elektrienergia tarbimine ja tootmine Eestis	17
1.1.3 Kliimaeesmärgid	19
1.2 Paindlikkus	20
1.2.1 Paindlikkuse ajaline mõõde.....	21
1.2.2 Paindlikkust pakkuvad ressursid - teenused	21
1.3 Energiasalvestid	24
1.3.1 Salvestustehnoloogiate kasutus maailmas	25
1.3.2 Nõuded ja piirangud akusalvestitele.....	27
1.4 Akusalvestussüsteemide poolt pakutavad teenused	29
1.4.1 Teenused elektrisüsteemile ja -turule	30
1.4.2 Teenused lõpptarbijatele	33
2. PAKRI TEADUS- JA TÖÖSTUSPARGI AKUSALVESTI PILOOTALA	35
2.1 Nõuded suletud jaotusvõrkudele	35
2.2 Objekti kirjeldus	36
2.3 Pilotprojekti ala elektrivõrgu üldskeem.....	37
2.3.1 Päikesepark	38
2.4 Pakri Teadus- ja Tööstuspargi tarbijate tarbimisandmed	38
3. SULETUD JAOTUSVÕRGU MUDEL	41
3.1 Kasutatud tarkvarade tutvustus.....	41
3.1.1 DIgSILENT modelleerimistarkvara tutvustus	41
3.1.2 DER-VET tarkvara tutvustus	42
3.2 Koostatud suletud jaotusvõrgu mudel.....	42
3.2.1 Päikesejaamade tootmisprofiil.....	45
3.2.2 Tarbijate koormusprofiilid.....	45
3.2.3 Akusalvesti toimimine mudelis ja seadeväärtused	46
3.3 LFA simulatsioonid, akusalvesti mõju	48
3.4 Stsenaariumid	50
3.5 Stsenaariumite hinnastamise komponendid.....	50
3.5.1 Elektrienergia hind ja võrgutasud	50

3.5.2	Sageduse reguleerimisetasu	51
3.5.3	Hoolduskulud	51
3.5.4	Investeeringukulud	51
3.5.5	Akusalvesti amortisatsioon	52
3.6	Arvutamise meetodika	53
3.6.1	Elektrienergia mahtude arvutus	53
3.6.2	Elektrienergia mahtude rahalised väärtused	54
3.6.3	Võrgutasude kuupõhiste komponentide arvutus	55
3.6.4	Sagedusereguleerimise tasu arvutus	55
4.	TULEMUSTE ANALÜÜS	56
4.1	Referents stsenaarium	56
4.1.1	Elektrienergia tarbimine	57
4.1.2	Päikesejaamade elektrienergia tootmine	57
4.1.3	Tulemused	58
4.2	Taastuvenergia lokaalse tarbimise suurendamine	58
4.2.1	Tulemused	60
4.3	Energia arbitraaž	60
4.3.1	Tulemused	61
4.4	Sageduse reguleerimine	62
4.4.1	Tulemused	63
4.4.2	Stsenaariumite tulemuste kokkuvõte	64
5.	TASUVUSANALÜÜS	66
5.1	Projekti tasuvusarvutuste sisendandmed	66
5.2	Tasuvuse hindamise meetodid	66
5.3	Tasuvuse hindamise tulemused	67
5.4	Järeldused	68
	KOKKUVÕTE	69
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	71
	LISAD	77
Lisa 1	ABB eStorage Flex 20 andmeleht	77
Lisa 2	ABB eStorage Flex 20 ühejooneskeem	78
Lisa 3	ABB eStorage Flex konteiner	79
Lisa 4	DIgSILENT akusalvesti QDSL mudeli kood	80
Lisa 5	LFA PV võimsus null, koormus max	82
Lisa 6	LFA PV võimsus maksimaalne, tarbimine minimaalne	83
Lisa 7	Võrgutasude arvutustabelid	84
Lisa 8	Rahavoogude koondtabel	85
Lisa 9	Tasuvusanalüüs S1	86

Lisa 10	Tasuvusanalüüs S2.3	87
Lisa 11	Tasuvusanalüüs S3.3	88

EESSÕNA

Käesolev magistritöö „Energiasalvestil põhinevate paindlikkusteenuste tasuvus Pakri Teadus- ja Tööstuspargi suletud jaotusvõrgus“ tulemusi rakendatakse Tallinna Tehnikaülikooli Targa Linna Tippkeskuse poolt ellu viidavas pilootprojektis „Energiavajaduse vähendamine mikrovõrkude ning energiasalvestite abil“ mida rahastavad Euroopa Regionaalarengu Fond ja Eesti Haridus- ja Teadusministeerium. Lõputöö eesmärk on uurida Pakri Teadus- ja Tööstuspargi suletud jaotusvõrgu mudeli baasil, kuidas parandada energiasalvesti majanduslikku tasuvust läbi pakutavate paindlikkusteenuste. Teema aitasid valida ja sõnastada juhendajad Tallinna Tehnikaülikooli teadur Imre Drovтар ning professor Argo Rosin.

Autor tahab tänada juhendajat ja kaasjuhendajat sujuva koostöö ja abivalmiduse eest ning loodab, et lõputöö tulemused aitavad ellu viia eelpool nimetatud pilootprojekti.

Lisaks soovib autor tänada DIGSILENT GmbH'd kes tagas lõputöö teostamiseks vajaliku tarkvarapaketi ning litsentsi.

SISSEJUHATUS

Euroopa Liit on endale seadnud ambitsioonikad kliimaeesmärgid – „A European Green Deal“, mille saavutamisel on oluline roll uutel taastuvenergia tootmiseseadmetel. Taastuvenergia tootmise järjepideva kasvu tulemusel on elektrivõrk viimaste kümnendite jooksul teinud läbi olulise põhimõttelise muutuse – traditsiooniline fossiilsetelkütustel põhinev tsentraalne tootmine on hakanud asenduma hajutatud taastuvenergia tootmisega. Tuule- ja päikesejaamad on oma toodetud energia olemuselt juhuslikud ja juhtimatud ning ei korreleeru tarbimisega. Elektrivõrgu vaatest tähendab juhuslik ja juhtimatu elektrienergia tootmine, et nõuetekohase pingekvaliteedi ja varustuskindluse tagamiseks peab olema võrgul piisavalt paindlikkust. Paindlikkuse tõstmisel saavad kaasa aidata kõik võrguga seotud osapooled – tarbijad, tootjad, elektriturg, elektrivõrk ise ning energiasalvestus, käesolev töö keskendub akusalvestite poolt elektrivõrgule pakutavatele võimalikele paindlikkusteenustele.

Magistritöö põhineb Targa linna tippkeskuse poolt läbiviidava pilootprojekti „Energiavajaduste vähendamine mikrovõrkude ning energiasalvestite abil“ alusandmetel, mille raames paigaldatakse Pakri Teadus- ja Tööstuspargi suletud jaotusvõrku 200 kW/ 400 kWh võimsusega akusalvesti. Lõputöö eesmärgiks on hinnata autori poolt loodava pilootala mudeli baasil, kuidas parandada salvesti tasuvust läbi pakutavate paindlikkusteenuste ning millist mõju avaldab teenuste omavaheline kombineerimine.

Käesolev magistritöö on jaotatud viieks peatükiks. Esimeses peatükis antakse ülevaade elektrienergia tarbimisest ja tootmisest, Eesti ja Euroopa Liidu kliimaeesmärkidest, paindlikkusest ning selle seosest kliimaeesmärkide ja energiasalvestitega. Peatüki teine pool keskendub energiasalvestitele ning milliseid paindlikkusteenuseid saavad energiasalvestid elektrivõrgule pakkuda samal ajal seadme omanikule majanduslikku kasu tuues. Peatükis väljatoodud teenuste põhjal formuleeritakse kolmandas peatükis stsenaariumid.

Teine peatükk annab ülevaate Pakri Teadus- ja Tööstuspargi suletud jaotusvõrgust, nende visioonist ning plaanitud pilootprojekti sisust. Samuti tuuakse välja andmed võrgus olemasolevatest tootmiseseadmetest ning „Energiavajaduse vähendamine mikrovõrkude ning energiasalvestite abil“ projekti raames läbiviidud tarbijate koormuste mõõtetulemustest.

Kolmanda peatüki esimeses pooles kirjeldatakse DIGSILENT PowerFactory tarkvaras loodud mudeliga seonduvat – mille põhjal ja millised seadmed valiti mudeli loomiseks,

kuidas moodustati nädalaste mõõtmiste põhjal tarbijate tarbimisprofiilid ning antakse põhjalik kirjeldus DIgSILENTis loodud akusalvesti ja selle toimimise loogika kohta. Peatüki teine pool annab põgusa ülevaate formuleeritud stsenaariumitest ning stsenaariumite hindamisega seotud arvutustest, arvutuste komponentidest ja meetodikast.

Töö neljas peatükk annab detailse ülevaate stsenaariumite sisust ning kõigi töös käsitletud stsenaariumite tulemustest ja nende võrdlusest referents stsenaariumiga. Magistritöö viimases peatükis teostatakse stsenaariumite tulemuste põhjal tasuvusanalüüs.

Lõputöö lisades on välja toodud arvutustabelid (võrgutasude kuupõhiste komponentide arvutustabel, rahavoogude koondtabel ja tasuvusanalüüsi arvutustabelid), samuti leiab lisadest akusalvesti DIgSILENT mudeli koodi ning ühe võimaliku kasutatava akusalvesti andmelehe.

1. TEOREETILINE ALUS

Suured muutused globaalses elektrienergia tarbimises on enamasti mõjutatud arenevate riikide tegevusest, samas arenenud riikides on viimase aastakümne jooksul võetud kasutusele erinevaid meetmeid, et vähendada (optimeerida) energia tarbimist ja seeläbi mõju kliimale. 2015 a. sõlmiti Pariisi kokkulepe [1], mille pikaajaliseks eesmärgiks on tagada, et globaalne keskmine temperatuur ei kasvaks üle 2°C võrreldes tööstusrevolutsiooni eelse ajaga, vähendada kasvuhoonegaaside paiskamist atmosfääri.

Euroopa Liidu pikaajaliseks eesmärgiks on muutuda kliima neutraalseks 2050. aastaks, eesmärgi saavutamiseks on koostatud kavad, mis hõlmavad ka energeetika sektorit – *A European Green Deal* [2], kliima- ja energiaraamistik 2030 [3], Pikaajaline 2050. aasta strateegia [4]. Euroopa Liidu arengukavadest lähtudes on Eestis koostatud Riiklik energia- ja kliimakava (REKK 2030) [5], Energiamaajanduse arengukava aastani 2030 (ENMAK 2030) [6], ning koostamisel on uus arengukava 2035 aastani (ENMAK 2035). Eesti arengukavade energeetikasektorit puudutavateks põhilisteks eesmärkideks on kasvuhoonegaaside heite vähendamine, taastuvenergeetika osakaalu suurendamine lõpptarbimises, primaarenergia tarbimise vähendamine – samas tuuakse välja ka energiajulgeoleku tagamine.

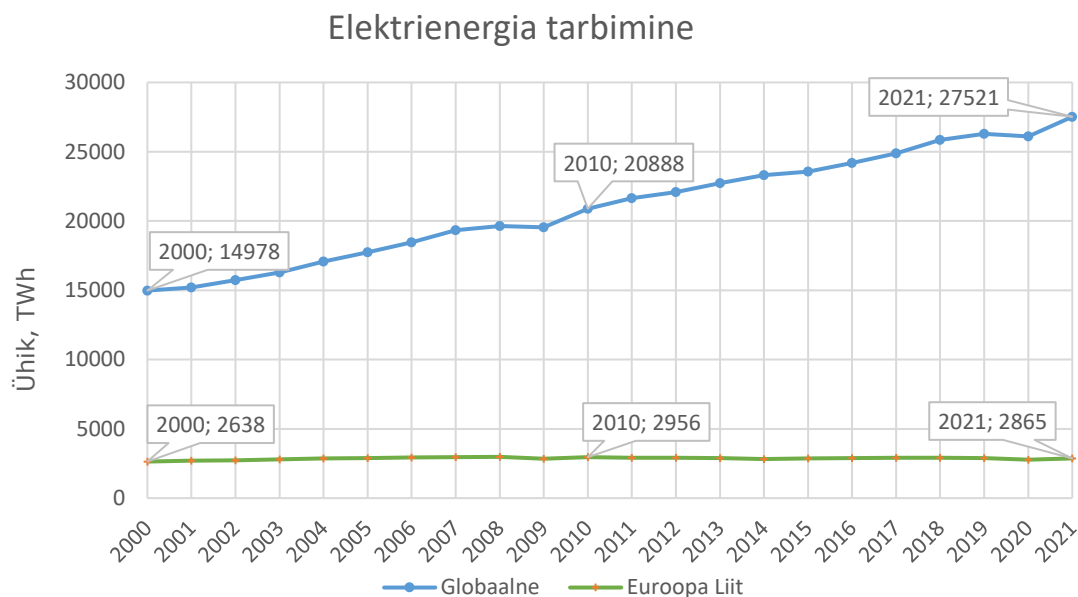
Eelnevast tingitult kasvab aastalt aastasse uute tootmiseadmete arv ning nende poolt toodetava elektrienergia osakaal kogu elektrienergia tootmisest. Taastuvenergia tootmiseadmete poolt toodetud juhuslik ja juhtimatu elektrienergia avaldab survet elektrisüsteemi töökindlusele - töökindluse tagamiseks vajab elektrivõrk piisavalt paindlikkust [7]. Investeeringud paindlikkusse peaksid olema proportsionaalsed võrgu vajadustega, et vältida taastuvenergia tootmiseadmete poolt toodetud elektrienergia piiramist ning seeläbi jõuda lähemale kliima eesmärkide täitmisele. Üks võimalikest lahendustest paindlikkuse tõstmiseks elektrivõrgus on kasutada salvestusseadmeid.

1.1 Ülevaade elektrienergia tarbimisest ja tootmisest

1.1.1 Globaalne elektrienergia tarbimine

Globaalne elektrienergia tarbimine on viimase 21 aasta jooksul kasvanud 83,7%, viimase 10 aasta jooksul 24,5% - alates aastast 2000 on keskmiselt tarbimine kasvanud 2,83% aastas võrreldes eelneva aastaga. Suurimaks globaalse elektrienergia kasvu faktoriks on olnud Hiina kasvav majandus, millest tulenevalt on elektrienergia tarbimine Hiinas, võrreldes kahe kümnendi tagusega üle kuue kordistunud (2000 – 1345 TWh, 2021 – 8443 TWh) ning moodustab 56% kogu globaalse elektrienergia tarbimise kasvust, keskmine aastane kasv 9,2% võrreldes eelneva aastaga. Erandina langes

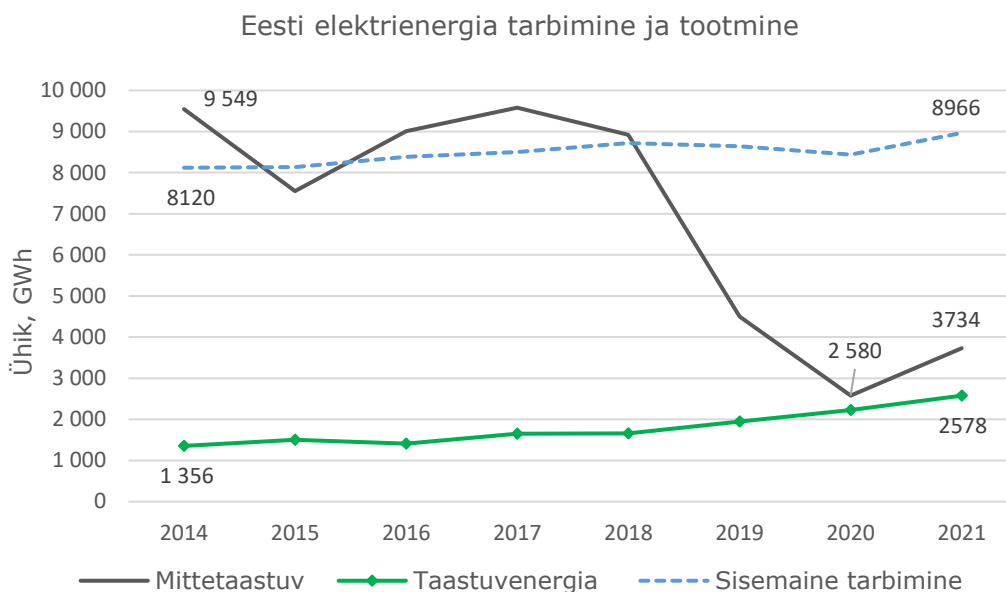
elektrienergia globaalne tarbimine vähesel määral tulenevalt erinevatest kriisidest aastatel 2009 (majanduskriis) ja 2020 (koroona pandeemia) võrreldes eelneva aastaga vastavalt 0,31% ja 0,1%, samas toimus kasvas elektrienergia tarbimine märgatavalt kriisile järgneval aastal 2010 ja 2021 vastavalt 6,9% ja 5,4%. Samal perioodil pole Euroopa Liidu elektrienergia tarbimine oluliselt kasvanud, 2017-2021 jäid elektrienergia tarbimismahud 2767-2922 TWh vahele – ehk elektrienergia tarbimine võrreldes 2000. aasta mahtudega on kasvanud ligi 8,6% [8].



Joonis 1.1. Elektrienergia tarbimine Euroopa Liidus ja globaalselt, TWh

1.1.2 Elektrienergia tarbimine ja tootmine Eestis

Seoses erinevate kliimat ja energeetikat puudutavate arengukavadega on elektrienergia tootmine Eestis teinud läbi märkimisväärse muutuse – Eestist varasemalt (enne 2019. a) kui elektrit eksportivast riigist on saanud elektrienergiat importiv riik. Alljärgnev joonis (Joonis 1.2.) annab ülevaate Eesti elektrienergia tarbimisest ja tootmisest [9].



Joonis 1.2. Eesti aastane elektrienergia tarbimine ja tootmine, GWh

Elektrienergia tarbimine Eestis aastatel 2014 – 2021 jäi vahemikku 8120 – 8966 GWh, ehk tarbimine vaadeldaval perioodil on kasvanud 10,4%. Elektrienergia tootmise kogumaht Eestis on viimastel aastatel drastiliselt langenud, kui perioodil 2014 - 2018 jäi toodetud elektrienergia maht vahemikku 9062 – 11234 GWh, siis, 2019 ja 2020 toodeti vastavalt 6447 GWh (-41%) ja 4810 GWh (-56%). Seoses madalate börsihindadega, kallinevate CO₂ kvootide ja vanade tootmisüksuste sulgemisega on fossiilsetest kütustest toodetud elektrienergia maht vähenenud 2019. aastast alates, erandina saab välja tuua aasta 2021, kus kõrged elektri börsihinnad võimaldasid põlevkivi ja teistel fossiilsetel kütustel töötavatel elektrijaamadel elektriturule aktiivsemalt sekkuda, toodetud energia hulk 3745 GWh (44% rohkem võrreldes eelneva aastaga). Järgnevas tabelis (Tabel 1.1) on antud ülevaade Eesti taastuvenergia tootmisest aastatel 2016-2021.

Tabel 1.1. Taastuvenergia võrku antud kütuseliigiti, GWh [10]

Kütuseliik	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Biogaas	46,2	41,9	36,6	40,1	29,1	17,6
Biomass (sh jäätmed)	738,7	908,0	950,7	1138,8	1230,6	1518,8
Tuul	590,0	669,5	590,6	691,7	823,7	730,7
Vesi	34,6	29,1	19,3	21,6	27,4	24,8
Päike	2,8	5,0	13,0	54,1	119,0	305,5
Kokku:	1 412	1 653	1 610	1 946	2 230	2 597

Taastuvenergia allikatest toodetud elektrienergia maht on kasvanud vaadeldava perioodi jooksul ligi 2 korda (2014 – 1356 GWh, 2021 – 2597 GWh). Toodetud taastuvenergia 2021. a kütuse liigiti jaotus järgnevalt: biomass 58%, tuul 28%, päike 11% ja muud 3%. Võrreldes varasemate aastatega on suurima suhtelise kasvu läbi

teinud päikesejaamade poolt toodetud elektrienergia hulk – 2019 – 54,1 GWh, 2020 – 118,9 GWh, 2021 – 305,5 GWh [11]. Arvestades ajakirjandusest läbi käinud numbreid, Elektrilevi ja Eleringi poolt avaldatud andmeid on huvi päikesejaamade vastu jätkuvalt kõrge, ning uusi liitumistaotlusi esitatakse pidevalt mille tulemusena kasvab ka vajadus võrgu paindlikkuse järele [12].

1.1.3 Kliimaeesmärgid

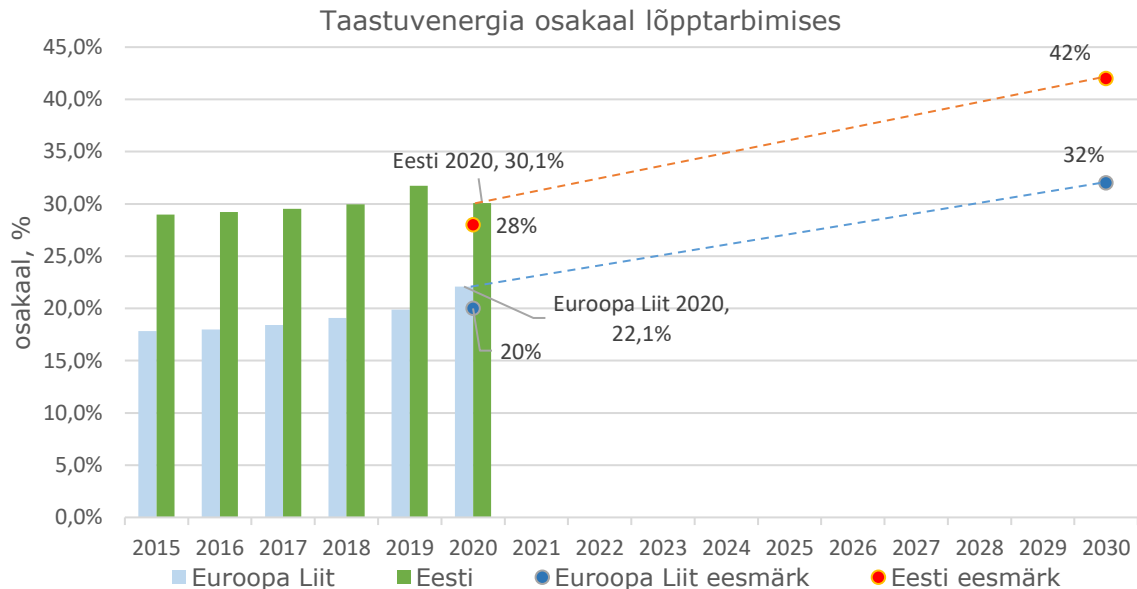
REKK 2030 ja Euroopa Liidu 2030 kliima ja energeetika raamistikus on välja toodud konkreetsed numbrilised eesmärgid CO₂ heidete vähendamise, taastuvenergia osakaalu lõpptarbimises ja energiatõhususe kasvu kohta. Järgnevas tabelis (Tabel 1.2) on ülevaade kliimaeesmärkidest ja nende arvulistest väärtustest. REKK 2030 on varustuskindluse eesmärkide all eraldi välja toodud paindlikkus elektrisüsteemis – ressursi piisavuse tagamise ja energiasüsteemi paindlikkuse arendamisel lähtutakse ENMAK 2030 välja toodud meetmetest. Lisaks on Euroopa Liidul plaan jõuda 2050. aastaks süsinikuneutraalsuseni.

Tabel 1.2. Kliimaeesmärgid 2030 aastani [3], [5]

Eesmärk	Eesti	Euroopa Liit
CO ₂ heidete vähendamine võrreldes 1990	70%	55%
Taastuvenergia osakaal lõpptarbimises	42%	32%
Energiatõhususe kasv	Primaarenergia tarbimine 10% väiksem kui 2012 aastal	Primaarenergia tarbimine 32,5% väiksem kui 2030 prognoositud

Taastuvenergia osakaalu suurendamine lõpptarbimises koos CO₂ heidete vähendamisega on tõenäoliselt ühed enim mõju avaldavad aspektid energeetika sektorile. Järgnev joonis (Joonis 1.3) annab ülevaate taastuvenergia osakaalu lõpptarbimises statistikast ning tuleviku eesmärkidest [13]. Eesti taastuvenergia osakaal lõpptarbimiseks oli 2020 aasta eesmärgiks 28%, mis ületati 2,1% võrra. 2030 Aasta eesmärgiks on seatud 42% [5] - ehk iga aasta peaks taastuvenergia osakaal kasvama ~3,4% võrreldes eelneva aastaga. Samuti on REKK 2030 välja toodud, et 2030 aastal võiks Eestis toodetud taastuvenergia kogus olla 4,3 TWh – ehk pea kaks korda rohkem kui toodeti aastal 2021 (2,6 TWh).

Euroopa Liidu puhul ületati 2020 aastaks seatud eesmärk samuti 2,1% võrra ning uus püstitatud eesmärk on 32% (3,8% kasv võrreldes eelneva aastaga) taastuvenergia osakaal lõpptarbimises, mida saab võimalusel tõsta [14].



Joonis 1.3. Taastuv energia osakaal lõpptarbimises ja eesmärgid 2030 aastaks [13]

Arvestades CO₂ heidete vähendamise eesmäärke ja taastuenergia osakaalu eesmäärke võib oletada, et eesmärkide saavutamiseks optimeeritakse tarbimist, fossiilsetelkütustel töötavate elektrijaamade poolt toodetud elektrienergia väheneb ning taastuenergiast toodetud elektrienergia tootmine kasvab – ehk juhitud elektrienergia tootmine asendub juhtimatu ja juhusliku elektrienergia tootmisega.

1.2 Paindlikkus

Paindlikkusega seotud uurimustööd jagunevad kaheks – pikaajaline süsteemi paindlikkus (*long-term planning flexibility*), mis on seotud võrgu pikaajaliste arengukavadega ning lühiajaline operatiivne paindlikkus (*short-term operational flexibility*), mis tegeleb süsteemi tasakaalus hoidmisega tunni, minuti täpsusega või reaajas [15]. Tehnilisest aspektist peab süsteem olema tasakaalus, majanduslikust aspektist peab tasakaal olema saavutatud optimeeritult. Paindlikkus elektrisüsteemis on suhteliselt lai mõiste, kuid üldiselt mõeldakse paindlikkuse all elektrisüsteemi võimekust kohaneda muutustega. Mõned definitsioonid erinevatest publikatsioonidest:

- Paindlikkus kirjeldab elektrisüsteemi võimekust kohaneda nii tarbimise kui ka tootmise muutustega ja volatiilsusega, nii teadaolevate (ette ennustatavate) sündmuste kui ootamatute sündmuste puhul [16].
- Elektrisüsteemi paindlikkus on elektrisüsteemi võime usaldusväärselt ja kuluefektiivselt toime tulla tarbimise-tootmise volatiilsuse ja juhitudamusega, ning seda igal ajahetkel [17].

- Paindlikkus on elektrisüsteemi võime vastata tootmise ja tarbimise kõikumistele samal ajal tagades süsteemi stabiilsuse [18].
- Paindlikkus on elektrisüsteemi võime toime tulla volatiilsuse ja määramatusega, mida taastuenergia tootmisseadmed elektrivõrku tekitavad - nii lühiajaliselt kui pikas perspektiivis ning vältida taastuenergia tootmise piiramist samas tagada tarbijatele kvaliteetne energia kogus mahus [19].

Käesolevas töös lähtutakse paindlikkuse puhul loetus teise definitsiooni järgi – paindlikkus on elektrisüsteemi võime usaldusväärselt ja kuluefektiivselt toime tulla tarbimise ja taastuenergia tootmise volatiilsuse ning juhitamatusega igal ajahetkel.

1.2.1 Paindlikkuse ajaline mõõde

Süsteemi paindlikkust saab jaotada perioodiliselt, kui lühiajaline paindlikkus on seotud süsteemi stabiilsuse hoidmisega (pinge ja sageduse hoidmine), siis pikaajalise paindlikkuse juures võetakse arvesse ilmastiku, aastaegade ja tarbimise/tootmise pikaajaliste muutustega – eesmärgiga tagada vajalike ressursside ja elektrienergia mahtude saadavus. Tabelis (Tabel 1.3.) on antud ülevaade paindlikkuse ajalisest jaotusest ning millist funktsiooni iga periood täidab, akusalvestite paindlikkus sobib katma lühiajalist ja keskajalist perioodi.

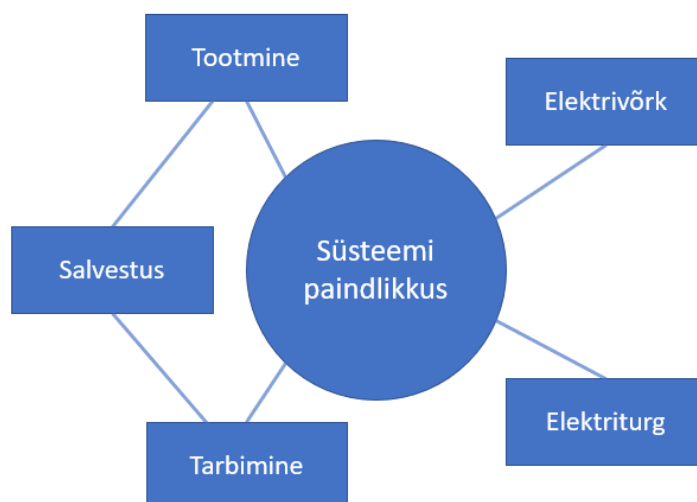
Tabel 1.3. Paindlikkuse ajaline mõõde ja funktsionaalsus [17].

	Periood	Funktsionaalsus
Lühiajaline paindlikkus	> sekundid	Süsteemi stabiilsuse tagamine (pinge ja sageduse stabiilsus), rikkete sündmuste korral.
	sekundid kuni minutid	Süsteemi tasakaalustamine tootmise ja tarbimise juhuslikul muutumisel.
	minutid kuni tunnid	Süsteemi tasakaalustamine tootmise ja tarbimise muutumisel - hommikused/õhtused tarbimise- ja tootmisprofiilid, üles/alla reservid.
Keskajaline paindlikkus	tunnid kuni päevad	Juhitavate elektrijaamade osalemise vajadus tarbimise katmiseks päeva sisesel ja päev-ette turul.
Pikaajaline paindlikkus	päevad kuni kuud	Juhitavate elektrijaamade hoolduste planeerimine, konkreetsetest ilmastikusündmustest tingitud süsteemi tarbimise ja tootmise tasakaalustamine (nt pikk vihmaperiood, hüdrojaamade reservuaarid vett täis).
	kuud kuni aastad	Süsteemi tootmise ja tarbimise tasakaalustamise planeerimine tulenevalt aastaegadest, tulevikus muutuvast tarbimisest/tootmisest.

1.2.2 Paindlikkust pakkuvad ressursid - teenused

Paindlikkust elektrisüsteemis saavad sisuliselt pakkuda kõik süsteemiga ühenduses olevad osapooled – tootmine, tarbimine, salvestuslahendused ja elektrisüsteemi pool.

Elektrisüsteemi poolt pakutava paindlikkuse alla kuuluvad täpsemalt füüsiline elektrivõrk ja selle seadmed ning elektriturg ja selle regulatiivsed funktsioonid [7].



Joonis 1.4. Elektrisüsteemi paindlikkust pakkuvad osapooled

(Paindlik) tootmine: ajalooliselt on pakkunud võrgule paindlikkust traditsioonilised elektrijaamad, mis on võimelised vajadusel kiiresti sisse või välja lülituma (nt gaasiturbiinjaamad) või elektrijaamad mis töötavad osa koormusel ning on võimelised lühikese ajajooksul muutama oma väljundvõimsust [16], [20], [21]. Samas tuleb arvesse võtta, et traditsiooniliste elektrijaamade kasutamine nende jaoks ebaoptimaalsetes tingimustes võib oluliselt mõjutada jaama opereerimiskulusid. Tihe sisse/välja lülitamine avaldab mõju elektrijaama tehnilisele korrasolekule – hooldusvälp väheneb, amortisatsioon tõstab parandus ja hoolduskulusid ning muudab perioodid, kus elektrijaam ei ole töös, pikemaks [15]. Olemasoleva tootmisjaama paindlikkumaks muutmine nõuab omakorda täiendavaid investeeringuid (kui see on üldse võimalik), mis tekitab olukorra kus elektrijaama käitamine sellistel tingimustel ei ole enam majanduslikult otstarbekas.

Tarbimise juhtimine: tarbimise juhtimise potentsiaal on nii Eestis kui mujal maailmas suur ning praegusel hetkel veel suures mastaabis kasutamata. Tarbimise juhtimine võimaldab elektrisüsteemis koormusi tõsta või vähendada – kas seadmete välja või sisse lülitamisega, reguleerimisega või töösükli ajastamisega tarbimise tipust varasemaks või hilisemaks [22]. Tarbimise juhtimiseks sobivad nii suured tööstused kui ka väiksemad tarbimisüksused eraldi (kütte-, jahutus- ja ventilatsiooniseadmed, valgustus, kompressorid jms). Väiksemate tarbimisüksuste tarbimise juhtimiseks pakuvad agregeerimisteenuseid Eestis, näiteks Eesti Energia ja Fusebox. Kodumajapidamiste sekkumise võimaldamiseks turule pääsemisele oleks vaja teha täiendavaid investeeringuid nii IT vallas kui ka üldise infrastruktuuri koha pealt. 2014.

aastal valmis Eleringil koostöös Tallinna Tehnikaülikooliga analüüs elektritarbimise juhtimise võimalustest, mille kohaselt oleks teoreetiliselt Eestis juhitavat tarbimist 200-400 MW ulatuses, sõltuvalt aastaajast [23].

9.12.2021 avaldati Konkurentsiameti poolt artikkel, mille kohaselt erines Eesti sisene tarbimine 7.12.2021 8:00-9:00 prognoositult koguni 130,7 MWh. Kuna sellel tunnil ületas börsihind 1000 €/MWh, võib spekuloida, et tarbijad teostasid tarbimise vähendamist omal initsiatiivil. Sellest oma korda võib oletada, et tarbijate hinnatundlikkus võimaldaks rakendada paindlikkusele suunatud teenuseid ka laiemalt [24].

Salvestus: salvestusseadmeid saab elektrivõrgus vaadelda nii tootmis kui tarbimis-seadmetena. Salvestusseadmed pakuvad elektrivõrgule ja seadme omanikule erinevaid paindlikkuse lahendusi:

- võimaldavad tasakaalustada tootmist ja tarbimist,
- võimaldavad pakkuva elektrivõrgu erinevaid traditsioonilisi süsteemiteenuseid – sageduse ja pinge reguleerimine, võimsuse reservid, energia hindade optimeerimine, tarbimise ajalinenihe,
- võimaldavad elektrivõrku lisada uusi taastuenergia tootjaid,
- vähendavad vajadust taastuenergia tootmisüksuste piiramiseks.

Võrreldes teiste paindlikkus ressursidega tuleb salvestustehnoloogiate rajamisel ja kasutusele võtmisel arvesse võtta ka potentsiaalselt suuremate investeeringutega [16], [17]. Samuti saab elektrisõidukeid vaadelda kui potentsiaalse võimalusena pakkuva võrgule paindlikkust, kuid eeldab efektiivsete juhtimis protsesside olemasolu. Vastasel juhul on kasvav elektrisõidukite hulk ja nende ajastamata laadimine, võrgu toimimise aspektist negatiivne [25].

Elektrivõrk: „Traditsiooniline“ tsentraalse tootmisega elektrivõrk ei pruugi vajada täiendavaid paindlikkuse ressursse, kuid rohepöörde tuules on tsentraalsete tootmisjaamade kõrvale tekkinud ka suur hulk taastuenergeetika tootmis-seadmeid, mille tootmine ei ole stabiilne ega täpselt ette ennustatav. Elektrivõrgu paindlikkust mõjutavad oluliselt võrgu ühenduste olemasolu ja läbilaskevõime, nii siseühenduste puhul kui ka välisühenduste puhul – mõlemad hajutavad toodetud energia suurema geograafilise ala peale. Võrgu paindlikkuses mängib rolli ka võrguplaneerimine, paindlikkuse vajaduse tõustes on vaja investeeringuid paindlikkuse ressursidesse, samuti tuleb arvestada tuleviku tootmise ja tarbimisega ning sellest tulenevate

investeeringute vajadusega. Tugev, omavahel seotud, elektrivõrk vähendab võrgus ebakorrapärase võimsuskõikumiste silumise vajadust [15]. Elektrivõrgu võimalikud ressursid paindlikkuse tõstmiseks jagunevad diskreetseteks ja pidevateks ressursideks. Diskreetsete ressurside alla kuuluvad võrgu planeerimine (sh võrgu tugevdamine), võrgu topoloogia muutmine läbi lülitamiste. Pidevate ressurside alla kuuluvad ülekandevõrgu välisühendused (vahelduvvoolu ühendused HVAC ja alalisvooluühendused HVDC) ja juhtimisseadmed (nt sünkroonkompensaatorid ja muud FACTS seadmed), mis võimaldavad süsteemioperaatoril opereerida elektrivõrku efektiivsemalt [26].

Elektriturg: Elektriturg on üks süsteemi regulatiivsetest organitest, mis läbi oma reeglite ja teenuste nõudlusega võimaldab teenusepakkujatel saada tulu. Elekriturud on disainitud viisil, et süsteemi jaoks teenuseid pakuvad ressursid pakuksid elektrivõrgule energia tootmise kõrvalt ka võimalikult palju paindlikkust ja süsteemiteenuseid. Paindlikkuse vajadus on pigem ajas kasvav väärtus – mida rohkem muutlikku taastuenergiat võrku tuleb seda suuremaks muutub vajadus täiendavate paindlikkusressursside järele [15]. Elektriturg saab kaasa aidata:

- Uute „teenuste“ loomisega, mis oleksid teenusepakkujatele atraktiivsed – USAs California süsteemi ja elektrituru operaator (CAISO), on lisanud oma teenuste nimistusse võimsuse reguleerimise üles/alla (*Regulation Milage – up/down*), kus teenuse pakkujaid premeeritakse reageerimise kiiruse eest reguleerimis käsure [27].
- Täiendavate tariifidega tarbijatele, mis „premeerivad“ tarbimise nihutamist tipu perioodidelt varasemaks või hilisemaks (*time-of-use* tariifid) – ehk toimub tarbimise juhtimine läbi energia hinnastamise [28], [29].

1.3 Energiasalvestid

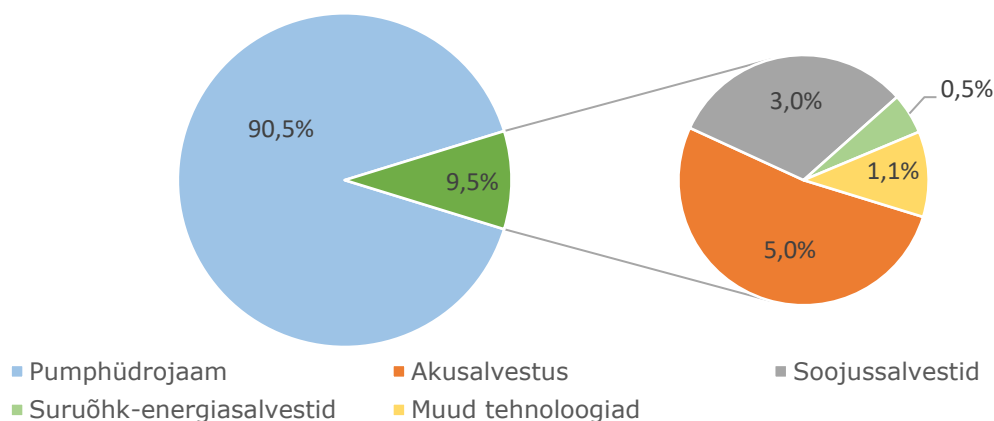
Taastuenergia osakaal võrgus on järjepidevalt aastatega kasvanud ning kui arvestades ajas järjest kasvavat energia vajadust ning ühiskonna suunda (rohepööre), siis kasvab ka taastuenergia osakaal tulevikus edasi – Euroopa Liidu üks kliimaeesmärkidest on saavutada 2030. aastaks taastuenergeetika osakaal 32% kogutarbimisest [30]. Suure osakaaluga taastuenergia stohhastiline loomuga energiatootmine tekitab võrgus probleeme – tootmise ja tarbimise tasakaalus hoidmine, probleemid pingekvaliteediga ja lülitusseadmete (nt trafo astmelülitid) täiendavad lülitamised, mis kiirendavad seadmete amortisatsiooni. Eelnevate probleemide üheks potentsiaalseks leevenduseks on salvestusseadmete lisamine võrku [31]. Artiklites [32], [33] on antud ülevaade energiasalvestite eritüüpidest, nende kasutus aladest ja investeeringu maksumustest.

Enim kasutust leidvad salvestustehnoloogiad on mehaaniliseenergiasalvestid (pumphüdrojaamad, suruõhusalvestid, hooratas jne.) ja elektrokeemilised salvestid (Li-ion akud jne.), lisaks veel soojussalvestid, erinevat tüüpi akud, kondensaatorid ja vesiniku lahendused.

1.3.1 Salvestustehnoloogiate kasutus maailmas

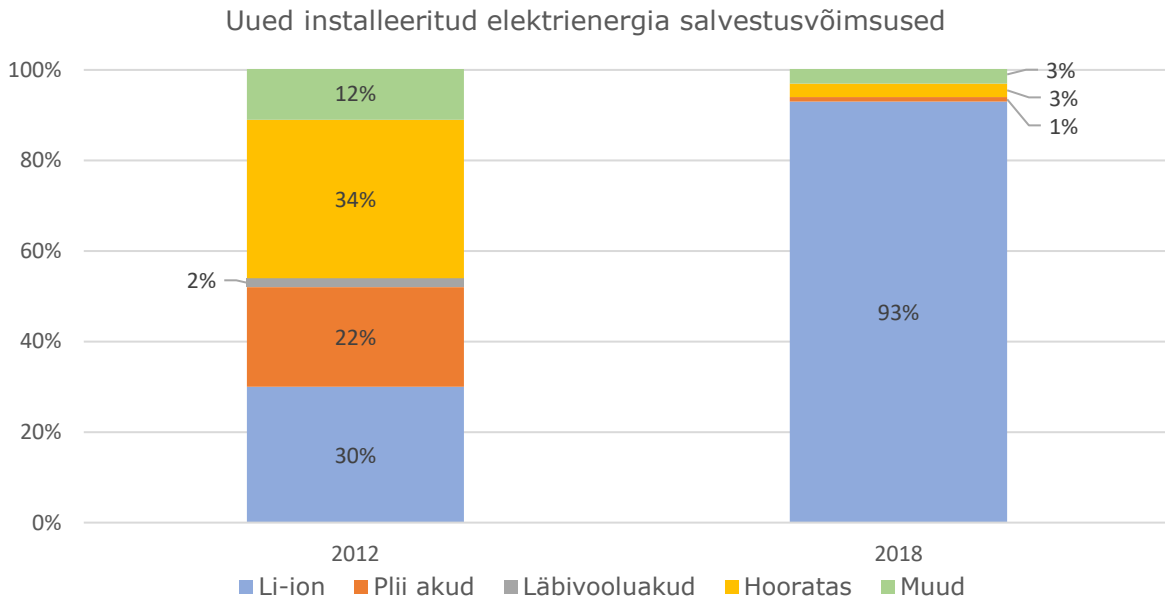
Globaalselt oli energiasalvestite talletatava energia kogus 2019 aasta seisuga ligi 200 GWh, mis kataks kogu maailma energiavajaduse umbes 6 sekundiks [34]. Energia salvestamiseks kasutusel mitmeid erinevaid tehnoloogiaid, neist suurima osa üle 90% võtab enda alla pumphüdrojaamad, ülejäänud 9% jaotuvad järgnevalt: 5% akutehnoloogiatel põhinevad salvestuslahendused, 3% soojussalvestid, 1,1% muud tehnoloogiad, 0,5% suruõhu salvestustehnoloogiad. Järgnev joonis (Joonis 1.5) annab ülevaate salvestustehnoloogiate jaotusest salvestustehnoloogia tüüpide järgi.

Installeeritud mahud salvestustehnoloogia tüüpide järgi



Joonis 1.5. Salvestustehnoloogiate protsentuaalne jaotus tüüpide kaupa

Praegusel hetkel on globaalselt projekteerimise/ehituse järgus ligi 10 GWh pump-hüdrojaamade projekte ning mitmed mehaanilise ja soojusenergia projektid. Sellised suuremahulised projektid vajavad suuri kapitali kulutusi, sobilikke geoloogilisi ja geograafilisi tingimusi ning jaamade pikka ehitusprotsessi. Viimase 10 aastaga on oluliselt kasvanud statsionaarsete elektrokeemiliste akusüsteemide kasutuselevõtt – seda nii tehnoloogia odavamaks muutumise kui ka akutehnoloogia pakutava võimekuse arvelt. Kui suuri pump-hüdrojaamade projekte mitte arvesse võtta uute salvestusvõimsuste juures, moodustasid 2018 a. Li-ion tehnoloogial põhinevad salvestuslahendused 93% uutest salvestusvõimsustest. Ülejäänud 6% olid muud tüüpi akutehnoloogiad, superkondensaatorite ja hooratta süsteemide osakaal olid ligi 2% kogumahust.



Joonis 1.6. Uute installeeritud energiasalvestite jaotus tüübi järgi, va pumphüdrojaamad 2012 vs 2018.

Kogu installeeritud akusalvestite võimsus oli 2020 aasta lõpu seisuga ligi 17 GW. Järgnevas tabelis (Tabel 1.4.) on välja toodud ülevaade uute võimsuste mahust – suuremate tegijate puhul riigiti ja väiksemate puhul kokkuvõtlikult. 2020 aasta jooksul lisandus globaalselt elektrivõrku suurusjärgus 5 GW uut salvestusvõimsust, rohkem kui pool uutest võimsustest installeeriti USA ja Hiina poolt. Tabelis toodud tulemuste põhjal võib öelda, et akusalvestus seadmete installeerimine on viimaste aastate jooksul tugevas kasvutrendis.

Tabel 1.4. Uued akusalvestus võimsused, GW [35]

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Hiina	0,05	0,1	0,2	0,6	0,6	1,6
USA	0,24	0,23	0,25	0,45	0,5	1,4
EU	0,15	0,35	0,55	0,88	0,91	0,78
Lõuna Korea	0,05	0,3	0,4	1,0	0,6	0,65
Jaapan	0,275	0,25	0,175	0,16	0,175	0,4
Muu maailm	0,05	0,1	0,3	0,2	0,45	0,175

Kogu installeeritud võimsusest oli ligi kaks kolmandikku tegu suurte akuparkidega. Investeeringumahud akusalvestusse kasvasid 2020 aastal 40% ning kogu investeeringu summa akutehnoloogiatesse oli ligi 5,5 miljardit USD [35].

Artikkel [36] toob välja statistika Li-ion tehnoloogia hinna languse elektriautode akude näitel - akuelementide kaalutud keskmine hind oli 2013 aastal 469 \$/kWh, 2021 a langes hind 101 \$/kWh kohta. Prognooside kohaselt langevad liitium tehnoloogia akuparkide investeeringu hinnad aastaks 2030 ligi poole võrra võrreldes 2020. aasta hindadega. Järgnevas tabelis on antud ülevaade artiklis[37] välja toodud prognoositud hinna väärtustest järgmise 30 aasta jooksul.

Tabel 1.5. Li-ion akude tehnoloogia hinna prognoos

	Ühik	2015	2020	2030	2040	2050
MWh komponent	M€/MWh	0,308	0,132	0,062	0,44	0,035
MW komponent	M€/MW	0,29	0,27	0,16	0,1	0,06

Arvestades langevaid investeeringukulusid, elektrivõrgu kasvavat vajadust paindlikkuse järele, potentsiaalseid tulu teenimise võimalusi elektriturul – siis võib oletada, et artiklites [35], [38] prognoositud akusalvestuse kasv ka realselt suure tõenäosusega toimub.

1.3.2 Nõuded ja piirangud akusalvestitele

Elektrituruseaduses [39] on välja toodud piirangud võrguettevõtja energiasalvestite omamise, arendamise, käitamise ja haldamise kohta. Võrguettevõtja ei tohi omada, arendada, käitada ega hallata energiasalvestusüksust va kui tegu ei ole täielikult integreeritud võrgu komponendiga. Akuga energiasalvestit võib kasutada ainult võrgu töökindluse parendamiseks – elektrienergia arbitraaž sh bilanssi tasakaalustamine on keelatud. Samas pole suletud jaotusvõrgu omanik defineeritud kui võrguettevõtja seega piirangud võrguettevõtjatele suletud jaotusvõrkudele ei kehtestata.

Tehniliste nõuete koha pealt Eestis ei ole Võrgueeskirjas [40] energia- ega akusalvestite teemat käsitletud, kuna tegu inverteriga seadmega siis võiks oletada, et tulevikus hakkavad akusalvestitele kehtima samalaadsed tehnilised nõuded nagu on praegu päikeseelektrijaamadele.

Taanis on kehtestatud konkreetselt akusalvestitele tehnilised nõuded [41], mis hõlmavad sageduse ja pinge kõikumise tolerantse, energia kvaliteeti, juhtimist, kaitseseadmeid, sideühendust, dokumentatsiooni ja simulatsiooni mudeleid. Akusalvestid on jaotatud võimsuse põhjal viite kategooriasse, millest annab ülevaate järgnev tabel (Tabel 1.6.).

Tabel 1.6 Akusalvestite kategooriad Taani elektrivõrgu tehniliste nõuete näitel, [41]

Kategooria	Võimsuse vahemik
A1	Akusalvestid kuni 11 kW
A2	Akusalvestid 11 – 50 kW
B	Akusalvestid 50 – 1,5 MW
C	Akusalvestid 1,5 – 25 MW
D	Akusalvestid üle 25 MW või kui need ühendatud üle 100 kV võrku

Käesolevas töös kasutatav akusalvesti läheb kategooria B alla, seega pööratakse tähelepanu kategooria B akusalvesti tehnilistele nõuetele.

Pinge kvaliteet: pinge kõikumiste korral peavad akusalvestid taluma piiridest välja ulatuvaid pingeväärtusi, ning pingehälbe püsimisel võrgust välja lülituma määratud aja jooksul. Akusalvestid peavad välja lülituma 200 ms jooksul kui sagedus langeb 47 Hz

või tõuseb 52 Hz, samuti ei tohi akusalvestid ennast uuesti sisse võrguga ühendada enne kolme minuti möödumist peale sageduse stabiliseerumist. Akusalvestid peavad taluma transientliigpingetest tekitatud sageduse kõikumisi ette nähtud aja, peale lohku peab akusalvesti taastama normaaltöö mitte hiljem kui 5 sekundit peale olukorra normaliseerumist. Akusalvesti ühendamiseks võrguga peavad olema dokumenteeritud ,asümmeetria, väreluse ja harmooniliste moonutuste väärtused.

Funktsionaalsus: B kategooria akusalvestid peavad omama sageduse kontrollimise funktsiooni üle sageduse puhul – sageduse tõusmisel peab akusalvesti reageerima 2 sekundi jooksul. Sageduse mõõtmisel peab olema mõõte täpsus 10 mHz. Akusalvesti võimsust peab olema võimalik piirata – nii laadimisvõimsust kui väljundvõimsust. Akusalvesti võimsuse muutumise kiirust peab olema võimalik piirata, et vähendada aktiivvõimsuse kõikumist ja see läbi suurendada võrgu stabiilsust. Akusalvesti peab olema võimeline juhtima reaktiivenergiat eraldi sõltumata võrgu pingest, ning proportsionaalselt aktiivvõimsusega (*Q control* ja *Power Factor control*).

Kaitsete seadeväärtused: pinge ja sageduse väärtused tuleb mõõta kõigis kolmes faasis eelistatult salvestisüsteemi trafo madalpinge poolelt. Sagedust tuleb mõõta kõigis kolmes faasis üheaegselt. Järgnevas tabelis (Tabel 1.7) on välja toodud B kategooria akusalvestile vajalikest kaitsetest ning nende väärtustest.

Tabel 1.7. B kategooria akusalvesti kaitsete seadeväärtused

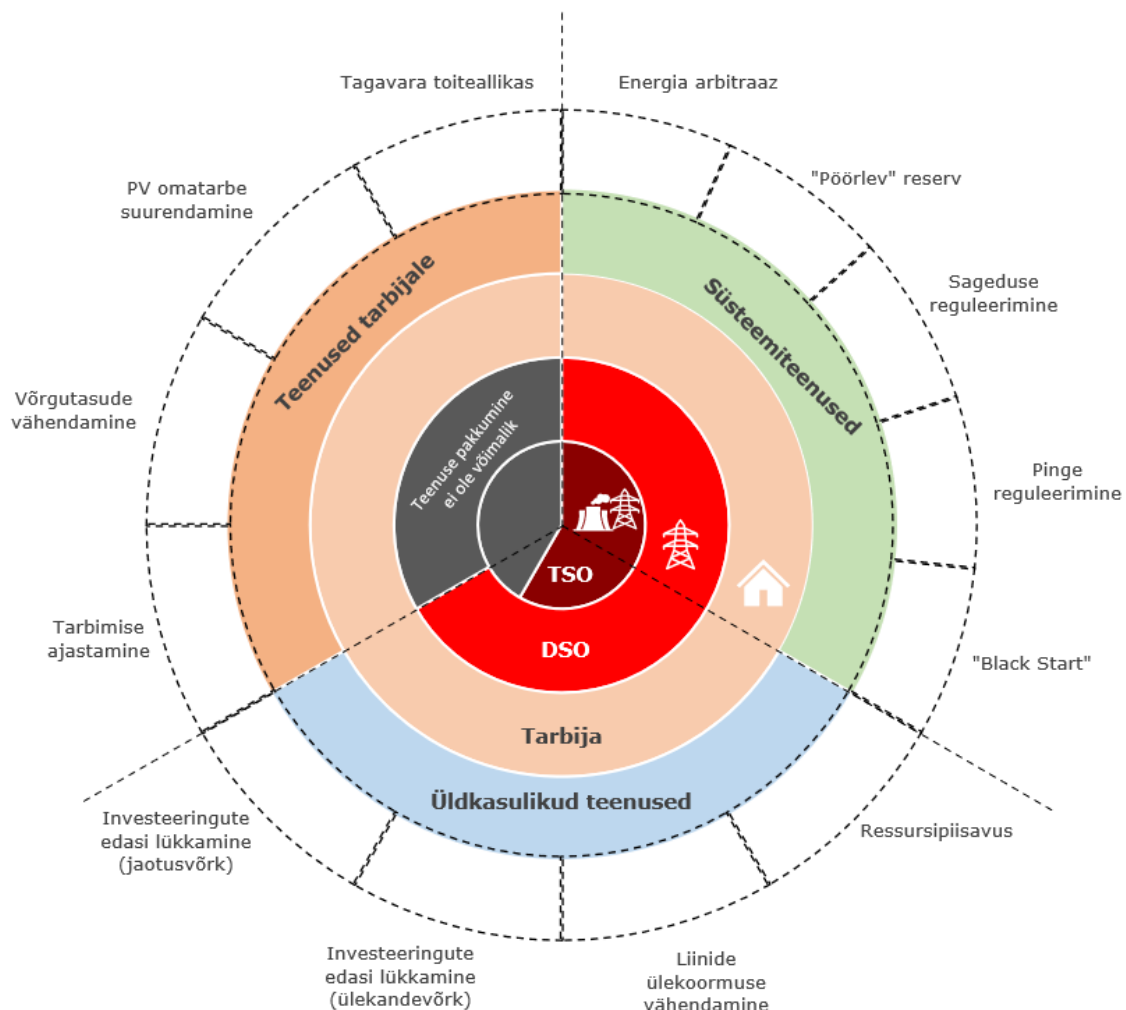
Kaitse funktsioon	Tähis	Väärtus		Rakendumise aeg	
Ülepinge (aste 3)	U>>>	$1.20 \cdot U_n$	V	0...100	ms
Ülepinge (aste 2)	U>>	$1.15 U_n$	V	100...200	ms
Ülepinge (aste 1)	U>	$1.10 \cdot U_n$	V	60	s
Alapinge (aste 1)	U<	$0.90 \cdot U_n$	V	10...60	s
Alapinge (aste 2)	U<<	$0.80 \cdot U_n$	V	1500	ms
Ülesagedus	f>	52	Hz	200	ms
Alasagedus	f<	47	Hz	200	ms
Sageduse muutuse kiirus	df/dt	± 2.5	Hz/s	200	ms

Side: B kategooria akusalvestid ei pea olema reaajas sidestatud, kuid peavad olema võimelised saada signaale tegevuse peatamiseks ja tegevuse peatamise signaali tühistamiseks.

Dokumentatsioon: akusalvesti dokumentatsioon peab sisaldama seadme andmelehte koos tootja garantiiga (seade vastab kõigile nõuetele), ülevaadet kaitsetest, akusalvesti ühejoone skeemi ning pinge kvaliteedi dokumentatsiooni. Samuti on akusalvesti omanik kohustatud esitama dokumentatsiooni akusalvesti simuleeritud mudeli kohta.

1.4 Akusalvestussüsteemide poolt pakutavad teenused

Akusalvestussüsteemid pakuvad elektrisüsteemile erinevaid teenuseid alustades elektrivõrgule ja kommunaalteenuste ettevõtetele pakutavatest teenustest (sh tootmine) kuni kodutarbijateni välja. Sihtgruppidele suunatud teenuseid saab jaotada ka eesmärgi pörselt – kulude optimeerimine või energia kvaliteedi parendamine [42]. Akusalvestussüsteeme võrgu vaatest saab kasutada reservidena, sageduse ja pingereguleerimiseks, taastuenergia lokaalne tarbimine, võrgu investeeringute edasilükkamine, avariijärgne taaskäivitamine (*black start*), energia arbitraaz ning samuti alternatiivse lahendusena tipuvõimsuste katmiseks fossiilsetelkütustel töötavate tipujaamade asemel. Lõpptarbijate jaoks võimaldavad akusalvestussüsteemid suurendada taastuenergia omatarbe osakaalu kogu tarbimises (eeldab PV või muu taastuenergia tootmiseseadme olemasolu), optimeerida energia hinda, parandada pingekvaliteeti ning vajadusel kasutada akusalvestit avariitoite allikana [43], [44]. *Rocky Mountain* instituudi poolt koostatud uuring tõi välja 13 potentsiaalset teenust mida võiksid akusalvestussüsteemid erinevatele osapooltele pakkuda (Joonis 1.7.) [45].

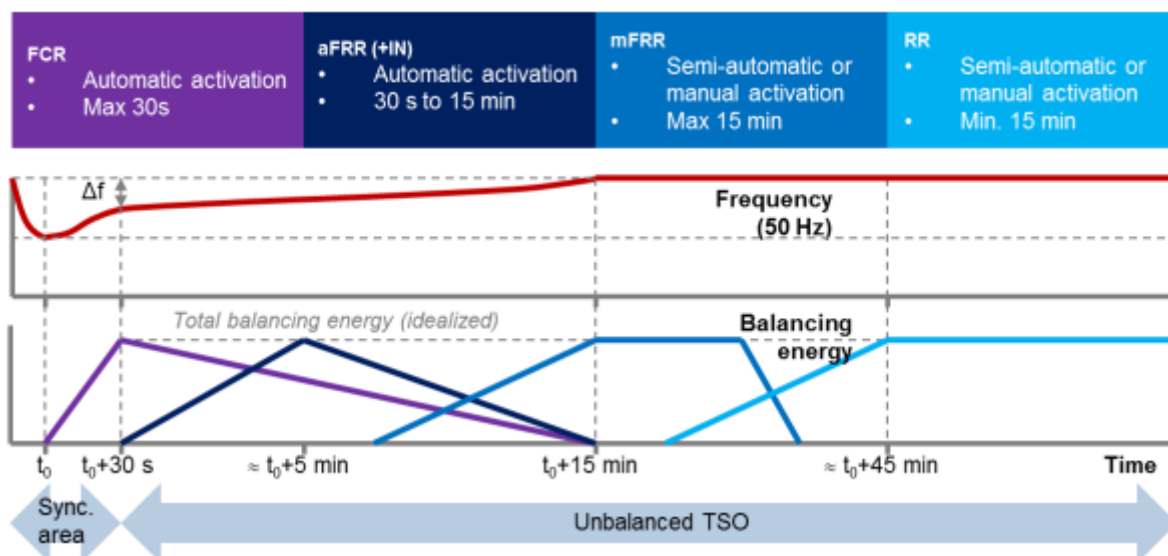


Joonis 1.7. Akusalvestussüsteemide poolt võimalikud pakutavad teenused

1.4.1 Teenused elektrisüsteemile ja -turule

Sageduse reguleerimine ja taastamine: dünaamilisereguleerimise eesmärgiks on tagada võrgus tootmise/tarbimise tasakaal ja säilitada süsteemi sagedus väikeste sagedus muutuste puhul. Tootmiseseadmed mis pakuvad võrgule reguleerimisteenust peavad olema võimelised reguleerima oma väljundvõimsust lühikese aja jooksul (sekundid) kui süsteemioperaatori poolt tuleb selle kohane signaal [27]. Rikkelses olukorras (suure tootmis seadme või toiteliini rikkeline väljalülitumine) käivitatakse sageduse taastamiseks sageduse taastamise reservid. Akusalvestuse kiire reageerimisaeg (sekundite jooksul) sobib hästi sageduse dünaamiliseks reguleerimiseks üles/alla, sageduse taastamise reservide vajadusel saab akusalvesteid kasutada vältimaks sagedus hälvetest põhjustatud rikete kaskaadi – traditsiooniliste tootmiseseadmete reageerimis ja käivitus ajad võivad ulatuda minutiteni [46]. Järgnev joonis (Joonis 1.8.) annab ülevaate sageduse reguleerimise ja taastamise loogikast ja reguleerimisturul olevatest teenustest Eestis. Teenused on jaotatud nii ajaliselt kui funktsionaalsuse põhjal järgnevalt:

- **FCR** (*frequency containment reserve* - sageduse hoidmise reserv) – FCRI eesmärgiks on hoida süsteemi sagedust aktiivvõimsuse kõikumise korral süsteemis. FCR teenuse pakkumiseks peab seade ≥ 200 mHz sagedushälbe puhul olema võimeline saavutama oma täisvõimsuse 30 sekundi jooksul.
- **(a/m)FRR** (*automatic/manual frequency restoration reserve* - automaatne/manuaalne sageduse taastamise reserv) – FRRi eesmärgiks on taastada süsteemi sagedus peale sagedushälvet tekitanud intsidenti, ning asendada FCRI teenust pakuvad seadmed. aFRRi puhul peavad seadmed saavutama täisvõimsuse 5 minuti jooksul, mFRRi teenust pakuvad seadmed maksimaalselt 12,5 minuti jooksul peale käivitus käsu saamist.
- **RR** (*replacement reserve* - asendusreservid) – Reservelektrijaamade eesmärgiks on katta sündmusest tulenev võimsuse defitsiit süsteemis, ning välja vahetada sisse lülitunud FRR teenust pakuvad jaamad.



Joonis 1.8. Sageduse hoidmise ja taastamise protsess reguleerimisturul, [47]

Pinge reguleerimine: Pinge reguleerimise eesmärgiks on tagada kogu võrgus nõuetekohane pinge kvaliteet, optimeerida energia ülekandest tekkivaid kadusid ja tõsta võrgu talitluse stabiilsust. Pinge reguleerimise põhilisteks vahenditeks on generaatorid, sünkroon- ja staatilised kompensatorid, kondensaatorpatareid, reaktorid ja trafode astmelülitid [48]. Pinge tase võrgus on otseselt seotud võrgus liikuva aktiiv- ja reaktiivvõimsusega, akusalvestusseadmed sobivad oma funktsionaalsusega pinge reguleerimiseks madalpingevõrkudes kui ka kõrgepingevõrkudes – ülepinge korral toimub akude laadimine, alapinge korral tühjenemine [44]. Samuti avaldab alternatiivsete pinge reguleerimise meetodite kasutamine kaasa võrgu seadmete elueale – akusalvestusseadmetega reguleerimine vähendab trafoastme lülite kasutamist [49], [50].

Reservid: Avariireservid jaotatakse pöörlevateks (võrguga koguaeg ühenduses, võimsus koheselt kätte saadav) ja mitte pöörlevateks (käivitus aeg minutites, <15 minutit). Reserve eesmärgiks on hoida võimsusbilansi tasakaalus, ning tagada võrgu talitus ettenägematute sündmuste korral – planeerimata tootmisseedmete väljalülitumine, välisühenduse väljalülitumine, võrguhäingute või ootamatult kasvanud tarbimise võimsuse tõttu [45], [51]–[53]. Akusalvestid sobivad hästi pöörlevate reservide asenduseks, mõlemad kriteeriumid on täidetud ning reageerimisajad on millisekundites. Mitte pöörlevate reservide puhul muutub probleemseks reservi vajaduse ajaline kestvus, mis on piiratud akusalvestisse salvestatud energia kogusega.

Avariijärgne taaskäivitamine (black start): Ülevõrgulise katkestuse korral on võrgul vaja tootmisseedmeid, mis oleksid võimelised toetama suurte elektrijaamade käivitust, et taastada võrgu normaal olek [54], [55]. Taastuvenergeetika tootmisseedmeid (tuulegeneraatorid, päikesejaamad) üldiselt avariijärgseks

taaskäivitamiseks ei kasutata – ennustamatu, volatiilne tootmisvõimsus. Artiklites [56], [57] on arutletud kuidas akusalvestust ja taastuenergia ressursse kasutada kombineeritult, pakkudes alternatiivset lahendust traditsioonilistele tootmiseseadmetele avariijärgse taaskäivitamise tagamiseks.

Energia arbitraaž: põhimõte seisneb elektrituru ajaliste hinnaerinevuste ära kasutamisel. Energia ostetakse ja salvestamisel perioodidel, kui energia hinnad on madalad, ning energia müüakse võrku tagasi tipuperioodidel [58]–[60]. Samas tuuakse välja artiklis [61], et energia arbitraaži strateegia üksi ei ole piisav akusalvestuse kasumlikuks muutmisel. Teisalt avaldab energia arbitraaž mõju nii võrgu ülekoormuse leevendamisele kui ka tipujaamade tööle – elektri turuhind on üldiselt madalam kui tarbimine on väike ja/või päikese- ja tuulejaamade tootmine on tänu ilmastiku tingimustele kõrge. Energia turuhind on üldiselt kõrge, kui tarbimine on suur ja taastuenergia allikate tootmine pigem väiksem.

Võrgu ülekoormuse leevendamine: võrgus (liinidel ja trafodel) võib esineda ülekoormus tarbimise tippude ajal või taastuenergia tootmiseseadmete tootmise tippudel, mis oma korda avaldab mõju võrgu stabiilsusele [45], [53]. Akusalvestuseadmed ülekoormatud liinidest „alla voolu“ võimaldavad tasandada tarbimise ja tootmise tippe (*peak-shaving*), mis vähendab ülekoormatud liinile avalduvat koormust [62]. Tarbimise tipu perioodidel on ka energia hinnad kõrgemad, seega avaldab energia arbitraaži strateegia ka kaudselt positiivset mõju liinide ülekoormusele. Artikli [63] autorid pakuvad välja ülekoormuse leevendamiseks mobiilsete salvestusseadmete kasutamise - näitena kasutatud Tesla Semi elektrilist veoautot, mis veab 2,7 MW akupakki koos inverteritega.

Võrgu tugevdamise investeeringute edasi lükkamine: energia tarbimine on üldiselt kasvav, elektrivõrke (jaotusvõrgud, ülekandevõrgud) projekteeritakse ja ehitatakse arvestades prognoositud koormusega tulevikus, kui koormus hakkab lähenema maksimaalsele projekteeritud võimsusele on vaja teha täiendavaid investeeringuid. Akusalvestusseadmed võrku lisandumine on üks lahendus, kuid eeldab samuti investeeringuid. Samas salvestusseadmete olemasolu muudel eesmärkidel (tipuvõimsuste tasandamine, energia arbitraaž, taastuenergia osakaalu suurendamine tarbimises) avaldab ka mõju võrgu investeeringute planeerimisele [45], [64], [65].

Ressursipiisavus: tarbimise katmiseks tipuvõimsuste ajal kasutatakse üldiselt fossiilsetelkütustel töötavaid tipuelektrijaamu. Energia tarbimise kasvamisega on vaja teha täiendavaid investeeringuid, akusalvestussüsteemide rajamine võimaldab vähehaaval edasi lükata või koguni vähendada investeeringuid uutesse vajalikesse tootmismahtudesse tipukoormuste puhul (nt gaasiturbiinjaamad) [45].

Järgnevas tabelis (Tabel 1.8.) on antud ülevaade alapeatükis käsitletud teenustest ning nende eesmärkidest.

Tabel 1.8. Ülevaade akusalvestuse poolt pakutavatest süsteemi- ja üldkasulikest teenustest

Teenus	Eesmärk
Sageduse reguleerimine ja taastamine	Mehhanism tarbimise ja tootmise tasakaalu säilitamiseks või taastamiseks, et tagada võrgu stabiilsus
Pinge reguleerimine	Mehhanism võrgu pingetaseme hoidmiseks, mis tagab võrgu optimaalse talitluse
Reservid	Tootmisvõimsus, mis on reservina saadaval kohe (koguaeg võrguga ühenduses) või mõne minuti jooksul, ettenägematu sündmuse korral
Avariijärgne taaskäivitamine (<i>black start</i>)	Ülevõrgulise katkestuse puhul suurte elektrijaamade taaskäivitamine võrgu toimimise taastamiseks
Energia arbitraaž	Elektrienergia ostmise ja salvestamine perioodil kui see on odav, ning energia tagasimüümine tipuhindade ajal
Võrgu ülekoormuse leevendamine	Tipukoormuste ajal salvestatud energia kasutamine ülekoormatud liinist „allavoolu“
Võrgu investeeringute edasi lükkamine	Investeeringute vajaduse edasilükkamine, vähendamine või vältimine tarbimise kasvamisel
Ressursipiisavus	Uute tipujaamade rajamise vajaduse vähendamine või edasilükkamine

1.4.2 Teenused lõpptarbijatele

Energia hinna optimeerimine: lõpptarbijatele turundatakse akusalvestusseadmeid põhiliselt energia hindade optimeerimiseks (kulude-tulude optimeerimine). Lõpptarbija saab oma energia hinda optimeerida tootmiseseadme olemasolul lokaalselt tarbitud taastuenergia osakaalu suurendamise läbi, ning perioodil kui tootmistingimused ei ole soodsad, energia arbitraaži abil [58], [59]. Samuti mängib rolli tarbimise/tootmise ajaline nihe, elektrivõrkudes, kus on täiendavate meetmetena kasutusel ajapõhised tariifid (*time-of-use tariff*) avaldavad salvestusseadmete kasutamine märkimisväärset mõju energia hinnale [66], [67]. Lõpptarbijate akusalvestusseadmed üksikult on võrgu vaates suhteliselt väikese võimsusega, kuid agregeeritult avaldavad mõju nii energia hinnale, võimaldavad lisada võrku täiendavaid taastuenergeetika tootmiseseadmeid ning pakkuda võrgule suuremas ulatuses süsteemiteenuseid – mis võimaldab teenida seadmete omanikele täiendavat tulu [68]–[70].

Tagavara toiteallikas: Akusalvestusseadmed on võimalised töötama tagavara toiteallikatena nii rikete puhul üksikule tarbijale kui ka mõningatel juhtudel saartalitlusena võrgu osale, samuti erinevad off-grid lahendused [71]–[73]. Akusalvestusseadmete tasuvust ainuüksi tagavara toiteallikatena kasutamisel on keeruline hinnata, sõltub konkreetsest situatsioonist (toiteta jäämise kulu) ja kliendi (omaniku) vajadustest/tahtmisest tagavara toiteallikat omada [74].

Pinge kvaliteet: salvestusseadmete paiknemine võrgus tõstab olulist võrgu võimekust, sh tagada lokaalne nõuetekohane toitepinge kvaliteet probleemsetes kohtades. Lühiajaliste sündmuste puhul mis mõjutavad tarbija toitepinge kvaliteeti lokaalselt

(lokaalne tootmise/tarbimise järsk muutus, pinge lohud/muhud või lühiajalised katkestused) saab kasutada salvestusseadmeid võrgu probleemsemates kohtades pingekvaliteedi parendamiseks [75], [76]. Samuti võimaldab salvestusseadmete olemasolu madalpingevõrkudes kus asuvad mikrotootjad (üldiselt päikesejaamad) hoida ühtlasemat pinget kogu madalpinge fiidri ulatuses, seda nii tootmise kui ka tarbimise tippude ajal [77].

Artiklite analüüsi põhjal otsustati edasises töös võtta stsenaariumite koostamise aluseks energiahinna optimeerimine (arbitraaž ja toodetud taastuenergia kohapeal tarbimine) ja sageduse reguleerimisteenus. Kuivõrd valitud teenuste majandusliku mõju hindamiseks on reaalsed turuhinnad avalikest andmebaasidest kättesaadavad, pole vaja teha täiendavaid eeldusi akusalvesti majandusliku tasuvuse hindamiseks.

2. PAKRI TEADUS- JA TÖÖSTUSPARGI AKUSALVESTI PILOOTALA

Pakri Teadus- ja Tööstuspargi on eraomandis tööstuspark, mille kontseptsiooni on arendatud 2007. aastast alates. Tänapäevaks hõlmab PAKRI Teadus- ja Tööstuspark ligi 70 hektarit maa-ala, ning kolme välja ehitatud hoonekompleksi kogupinnaga ligi 20 000 m². Tulevikus on plaanis välja ehitada etappide kaupa autonoomne tarkvõrk, kus olulist rolli mängib ka taastuvenergeetika – 18 MW tuulepark, 3-6 MW päikesepark ning biomassil töötav koostootmisjaam. Pakri Teadus- ja Tööstuspark on väljatoonud rajatava võrgu eesmärgid järgnevalt:

- Unikaalsed võimalused teadustöökaks ning innovaatiliste lahenduste edasi arendamiseks ja katsetamiseks – taastuvenergeetika ja selle võrku integreerimine, hoonete energiatõhusus, energia salvestamine, elektrisõidukid ja alternatiivsed rohelised kütused.
- Keskkonnasõbraliku taastuvenergeetika ja turu keskmisest soodsama elektrienergia hinnaga on võimalik tekitada tööstuspargis opereerivatele ning tulevastele ettevõtetele konkurentsieeliseid – madalamad kulud, brändi kuva („keskkonnasõbraliku“ toote sertifikaat).
- Ajavõit uute energiamahukate klientide liitumisel – vabad võimsused ja taristu väljaehitatud.

Pakri Teadus- ja Tööstuspark on üks vähestest objektidest, kes on end avalikult defineerinud suletud jaotusvõrguna – ehk Eesti kontekstis võiks Pakri Teadus- ja Tööstusparki vaadelda kui teerajajat.

2.1 Nõuded suletud jaotusvõrkudele

Suletud jaotusvõrkudega seonduvad regulatsioonid on välja toodud Euroopa liidu direktiivis 2019/944 [78], millest lähtuvalt on ka suletud jaotusvõrkude piirangud ja definitsioon toodud välja Elektriturseadus. Suletud jaotusvõrk defineeriti esmalt Euroopa Liidu direktiiviga 2009/72/EC [79], kui võrk mis jaotab elektrit geograafiliselt piiritletud tootmiskohas, elektrienergia tarbitakse võrgu haldaja poolt või temaga seotud äri ettevõtete poolt, samas ei tohi suletud jaotusvõrk pakkuda elektrivarustust kodutarbijatele. Elektriturseaduses on suletud jaotusvõrk definitsioon sarnane direktiivis välja toodule: „suletud jaotusvõrk on jaotusvõrk, mille kaudu edastatakse elektrienergiat geograafiliselt piiratud tootmiskoha, ärirajatise või ühisteenuste koha piires seal asuvatele äritarbijatele, kelle tegevus või tootmisprotsess on tehnilistel või

ohutusega seotud põhjustel omavahel ühendatud või mille kaudu edastatakse elektrienergiat peamiselt võrgu omanikule või võrguettevõtjale, kes seda võrku haldab, või nendega valitseva mõju kaudu seotud ettevõtjale" [39]. Erinevalt jaotusvõrgu ettevõtetest, ei ole suletud jaotusvõrgus elektrienergia edastamiseks vaja tegevusluba. Potentsiaalne mure koht võib ka tekkida suletud jaotusvõrgu tegevuse lõppemisel – tegu jaotusvõrgu ettevõtte silmis põhimõtteliselt kliendi elektripaigaldisega, mille nõuded ei pruugi olla kooskõlas jaotusvõrgu ettevõttele kehtestatud nõuetega.

2.2 Objekti kirjeldus

Targa linna tippkeskuse poolt läbi viidava „Energiavajaduste vähendamine mikrovõrkude ning energiasalvestite abil“ pilootprojekti raames on kavas rajada pilootlahendused Tartu linna ja Lääne-Harju valda, Paldiskisse. Käesolev töö keskendub Tallinna mnt 31, Paldiski 4,4 ha kinnistule (katastritunnus: 58001:006:0030) rajatava pilootprojekti lahendusele. Pilootprojekti käigus on plaanis paigaldada Tallinna mnt kinnistule 200 kW/400 kWh võimsusega akusalvesti. Rajatav akusalvesti pakub Pakri suletud jaotusvõrgule järgnevaid teenuseid:

- suurem paindlikkus,
- võimaldab juhtida võrgu siseselt tarbimist,
- lokaalne taastuenergia suurem osakaal kogutarbimises, mis omakorda suurendab saadavat tulu taastuenergialt,
- optimaalsem elektrienergia jagamine suletud jaotusvõrgu siseselt,
- elektrienergia hinna optimeerimine.

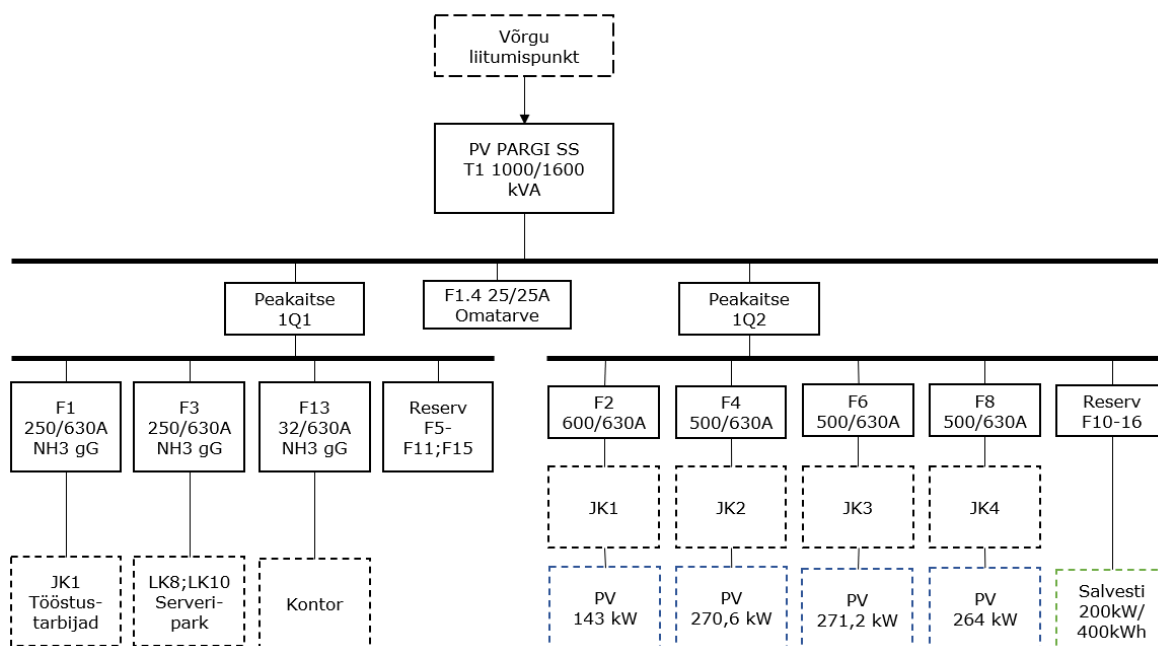
Järgnev aerofoto (Joonis 2.1.) annab ülevaate pilootprojekti kinnistust. Kinnistul paikneb tööstus- ja kontoriruumidega ligi 6000m² suurune hoonekompleks, alad välisladude tarbeks ja 950 kW võimsusega päikese park, mis ühendatakse Pakri suletud jaotusvõrguga peale võrgu uuenduste tegemist.



Joonis 2.1. Aerofoto Tallinna mnt 31, Paldiski kinnistust [80]

2.3 Pilootprojekti ala elektrivõrgu üldskeem

Joonis (Joonis 2.2.) annab ülevaate pilootprojekti ala elektrivõrgu üldskeemist. Võrgu liitumispunkt asub alajaama keskpinge poolel, ning alajaama on planeeritud 1,6 MVA trafo. Alajaama 0,4 kV jaotla on jagatud kaheks sektsiooniks, kus esimesel sektsioonil on tarbijad ning teisel sektsioonil tootmisseadmed ja rajatav 200kW/400kWh akusalvestussüsteem. Päikese elektrijaamad on jaotatud fiidrite kaupa 4 gruppi, nagu on näha visuaalselt ka kinnistu aerofotolt. Esimene sektsioonil on tarbimine kolme fiidri peal – F1 tööstustarbijad, F3 serveripargid ja F13 kontor.



Joonis 2.2. Vaadeldava võrgu üldskeem

2.3.1 Päikesepark

Päikesepark koosneb neljaks grupiks jaotatud üksusest ning koguvõimsus paneelide järgi on 948,75 kW. Päikesejaamade inverteriteks on kasutatud Huawei Sun2000-60KTL inverterid nimiaktiivvõimsusega 60 kW (max 66 kW), paneelidena on kasutatud Sharp ND-RK275 polükristall paneele nimivõimsusega 275 W. Iga inverteri taha on ühendatud 240-252 paneeli (66-69,3 kW) ja üks PV1 inverteritest mida toidab 40 paneeli. Järgnev tabel (Tabel 2.1) annab ülevaate päikesepargi gruppide üldandmetest.

Tabel 2.1. Päikesepargi andmed

Tähis	Inverterite arv, tk	Paneelide arv, tk	Võimsus, kW
PV1	3	520	143
PV2	4	984	270,6
PV3	4	986	271,15
PV4	4	960	264

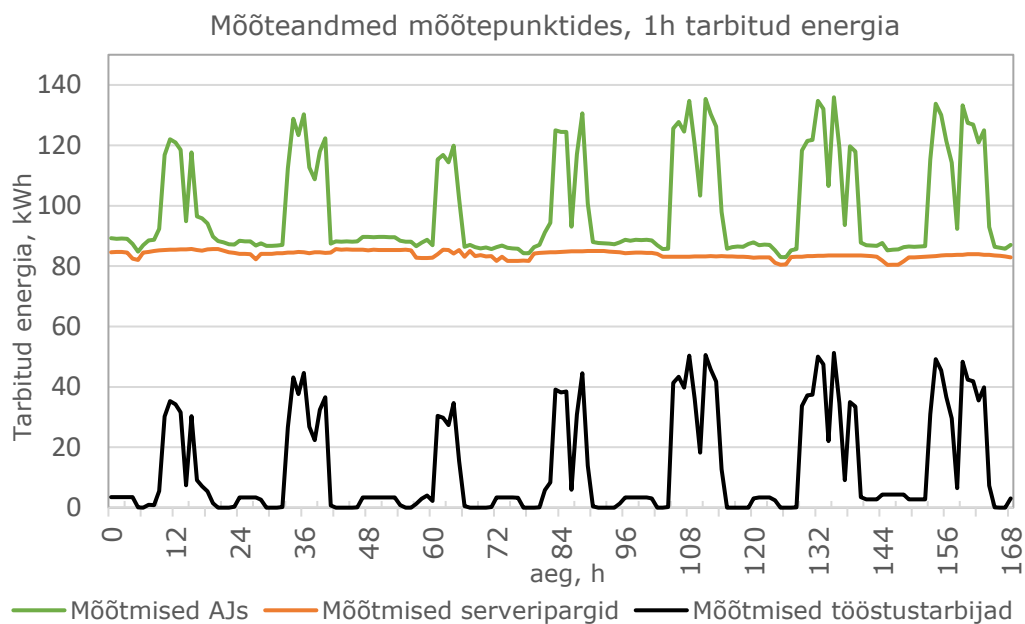
2.4 Pakri Teadus- ja Tööstuspargi tarbijate tarbimisandmed

Targa linna tippkeskuse poolt läbi viidava pilootprojekti „Energiavajaduse vähendamine mikrovõrkude ning energiasalvestite abil“ raames viidi läbi pilootprojekti ala tarbimisandmete täiendav analüüs, et saada parem ülevaade tarbijate energiatarbimisprofiilidest, mahtudest ja võimsustest. Põhjalike mõõteandmete puudumise tõttu teostati Pakri Teadus- ja Tööstuspargis täiendavad tarbijate koormuste mõõtmised perioodil 11.06 –18.06.2021. Mõõtmised viidi läbi kolmes mõõtepunktis:

- alajaama 0,4 kV jaotusseadmes (suletud jaotusvõrgu liitumispunkt),
- I sektsiooni F1 jaotuskilbis 1 (JK1),
- I sektsiooni F3 liitumiskilbis 8 (LK8).

Saadud tulemusi kasutatakse hiljem DiGSILENT PowerFactorys tarbijate koormusgraafikute moodustamisel. Mõõtmiste teostamise ajal ei olnud territooriumil asuv päikesepark veel võrguga ühendatud, ning päikesepargi poolt toodetud elektrienergia modelleerimiseks kasutatakse prognoosandmeid.

Järgnev joonis (Joonis 2.3.) annab ülevaate kolmes mõõtepunktis teostatud mõõtmiste tulemustest. LK8's mõõdetud serveriparkide poolt tarbitav energia on pilootprojekti elektrivõrgu baaskoormuseks – mõõteperioodi jooksul jäi serveriparkide poolt ühe tunni jooksul tarbitud energia vahemikku 79-86 kWh. Keskmine tarbimine ühe tunni jooksul kogu perioodi vältel oli 83,8 kWh ja olulisi kõikumisi päevade lõikes ei olnud. Mõõteperioodi vältel tarbitud energia kokku 14,2 MWh.



Joonis 2.3. Mõõtetulemused

JK1's mõõdetud koormused jälgivad tavalise tööstusettevõtte koormusprofiile – tarbimine toimub töötundidel ning öösel on tarbimine väike või sootuks puudub. Mõõteperioodi jooksul jäi ühe tunni tarbimine vahemikku 0-64 kWh. Keskmine tarbimine kogu perioodi vältel 12,9 kWh ning päevade lõikes langes tarbimine nädala lõpul. Graafikult on näha, et öisel ajal mõõdeti JK1's 3-4 kWh suurune tarbimine, mida saab seletada mingisuguse automatiseeritud protsessiga nt küte või ventilatsioon. Mõõteperioodi vältel oli JK1 kogutarbimine 2,2 MWh.

Graafikult on näha, et serveriparkide poolt tarbitud elektrienergiast moodustab vaadeldava elektrivõrgu baaskoormus. Järgnevas peatükis kasutatakse mõõdetud tarbimise andmeid modelleerimistarkvara tarbimisprofiilide loomiseks, mille alusel simuleeritakse võrgu toimimist ning rakendatakse stsenaariumid.

3. SULETUD JAOTUSVÕRGU MUDEL

3.1 Kasutatud tarkvarade tutvustus

Võrgumudeli loomiseks otsustati kasutada DIgSILENT PowerFactory tarkvara, tulenevalt autori varasemast kokkupuutest nimetatud tarkvaraga õppetöö raames. Energia arbitraaži simuleerimiseks kasutati DER-VET tarkvara.

3.1.1 DIgSILENT modelleerimistarkvara tutvustus

Suletud jaotusvõrgu mudeli loomiseks kasutatav tarkvara on loodud saksa tarkvara arendus ja konsulteerimis ettevõtte DIgSILENT GmbH poolt. Ettevõtte on asutatud 1985. aastal Martin Schmiegi poolt ning algelt kandis nime *Engineering Office for Cybernetics in Energy Supply*. DIgSILENTi portfooliosse kuuluvad tarkvaratooted

- **PowerFactory** – tarkvara elektrivõrgu modelleerimiseks ja selle toimimise analüüsimiseks.
- **Stationware** – tarkvara alajaamadest tulevate andmete, signaalide, seadete hoiustamiseks ja haldamiseks. Samuti võimaldab integreerida andmebaasi PowerFactoryisse, võrgu analüüsimiseks.
- **Monitoring Systems** – tarkvara elektrivõrgus toimuvate sündmuste hoiustamiseks, monitoorimiseks ja analüüsimiseks.

Käesolevas töös on kasutatud DIgSILENT PowerFactory võrgu modelleerimis tarkvara, mille põhiliseks eesmärgiks on analüüsida energia tootmise sh hajatootmise, ülekandevõrkude, jaotusvõrkude ja tööstuslikke süsteeme kasutades *Load Flow Analysis* (LFA) ja *Quasi-Dynamic Simulation* (QDSL) funktsioone. Tänu oma suurele võrguseadmete andmebaasile ning erinevatele sisseehitatud arvutusalgoritmidele, võimaldab modelleerida ja simuleerida olemasolevaid või rajatavaid võrguskeeme, viia läbi erinevaid võrguarvutusi ning analüüsida saadud tulemusi. PowerFactorys salvestatakse elektrivõrkude andmed eraldi kaustadesse – võrgumudel võib koosneda ühest suurest võrgust või mitmest väiksemast võrgust, mis võivad olla omavahel ühendatud [81].

LFA käigus viib programm läbi simulatsiooni koostatud võrgu mudelil ühel kindlal aja hetkel – valitud ajahetkel on energia tarbimine ja tootmine konstantsete väärtustega. Algoritm arvutab välja aktiiv-, reaktiivenergia vood võrgu harudes ning pinged sõlmedes. Peale simulatsiooni jooksutamist toob programm ka visuaalselt välja elemendid, mis on näiteks ülekoormatud või kui kuskil sõlmes on pinge lubatud piirist

väljas või selle lähedal. Võrgu planeerimise seisukohalt võimaldab selline visuaalne indikatsioon sisse viia muudatusi näiteks suurendada kaabli ristlõiget või lühendada kaabli pikkust.

QDSL simulatsioon teostab LFA analüüsid kasutaja poolt määratud perioodi ja sammu pikkuse (nt 15 minutit või 1 tund) kohta. Simulatsiooni toimimiseks on vaja luua süsteemis olevatele tootmis- ja tarbimisseadmete karakteristikud – simulatsiooni käigus võetakse arvesse iga seadme tarbitud ja/või toodetud energiat ning kadusid. Saadud tulemusi on võimalik kuvada nii tabelina kui programmi sisseehitatud graafilise väljundina.

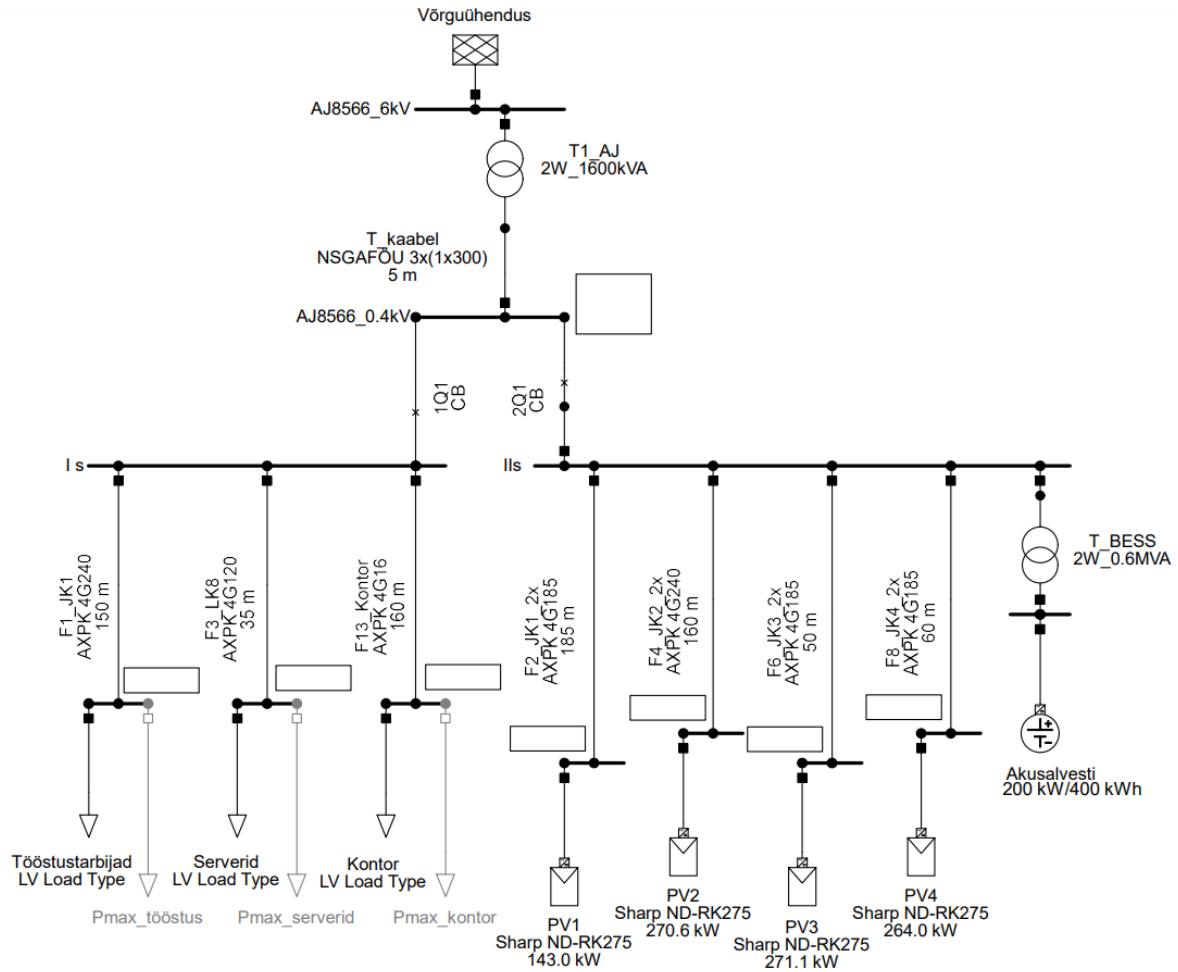
3.1.2 DER-VET tarkvara tutvustus

Distributed Energy Resources Value Estimation Tool (DER-VET) on Electric Power Research Institute (EPRI) poolt loodud vabavara tööriist, millega on võimalik optimeerida tootmis- ja tarbimisseadmete majanduslikku tulu. DER-VET töötab Pythoni baasil, läbi DER-VETi kasutajaliidese antakse optimeerimisprobleemi sisendid ning Pythoni CVXPY mooduliga formuleeritakse optimeerimisprobleem. Formuleeritud optimeerimisprobleemi lahendamiseks kasutatakse Pythoni GLPK_MI (GNU Linear Programming Kit Mixed Integer) moodulit. Saadud tulemused saab vaadata kas graafiliselt tarkvara kasutajaliidises või andmetena Exceli dokumendi formaadis.

DER-VETi tarkvaras teenuste simuleerimine eeldab, et on olemas elektrienergia tarbimise, tootmise ja hinnagraafikud (võib ka kasutada sisseehitatud elektrienergia hinna liidest, kuid Eesti kohta seal andmed puuduvad). Tarkvaras formuleeriti energia arbitraaži optimeerimisprobleem, ning saadud tulemused viidi üle tabelarvutusprogrammi ning arvutused teostati samadel alustel.

3.2 Koostatud suletud jaotusvõrgu mudel

All järgneval joonisel (Joonis 3.1.) on välja toodud DIgSILENT PowerFactorys modelleeritud võrgu graafiline mudel. Väline keskpinge võrk toimib DIgSILENTis dünaamilise seadmena, mis impordib või ekspordib vajalikus koguses aktiiv- ja reaktiivenergiat (joonisel „Võrguühendus“). Keskpinge võrgu pingemuutuste jaoks on lisatud Võrguühendus elemendile pingeväärtuste profiil. Profiil on koostatud alapeatükis (2.4.) kirjeldatud alajaamas 0,4 kV lattidelt mõõdetud tunni keskmiste pingeväärtuste alusel. Väärtused on teisendatud suhtühikutesse, ning sisestatud DIgSILENTisse suhtühikulistena – 24 tundi, iga nädalapäeva kohta eraldi.



Joonis 3.1. Koostatud võrgumudel DIgSILENT PowerFactory keskkonnas

Alajaama on kujutatud lahti joonistatuna, ning koosneb 6 kV jaotlast ja kahe sektsioonilisest 0,4 kV madalpinge jaotlast. Mõlemal madalpinge sektsioonil on 1600A peakaitsmed, joonisel tähistatud 1Q1 ja 2Q1. Algandmetest oli teada ainult trafo nimivõimsus 1600 kVA, mudeli koostamisel kasutati DIgSILENTi seadmekataloogist trafot, mille põhiparameetrid on väljatoodud järgnevas tabelis (Tabel 3.1).

Tabel 3.1. Alajaama trafo T1 põhiparameetrid

Nimivõimsus, kVA	1600
Primaarpinge, kV	6,3
Sekundaarpinge, kV	0,4
Lühistakistus, %	6
Lülitusgrupp	Dyn11
Vasekaod, kW	12,7

Liinid kuni tootmiseseadmete ja tarbijate jaotuskilpideni, modelleeriti reaalsete kaablitüüpide ja pikkustega – mis andis võimaluse hinnata liinide koormuseid ja vajadusel tekkivaid kadusid. Liinide andmed on välja toodud all järgnevas tabelis (Tabel 3.2.).

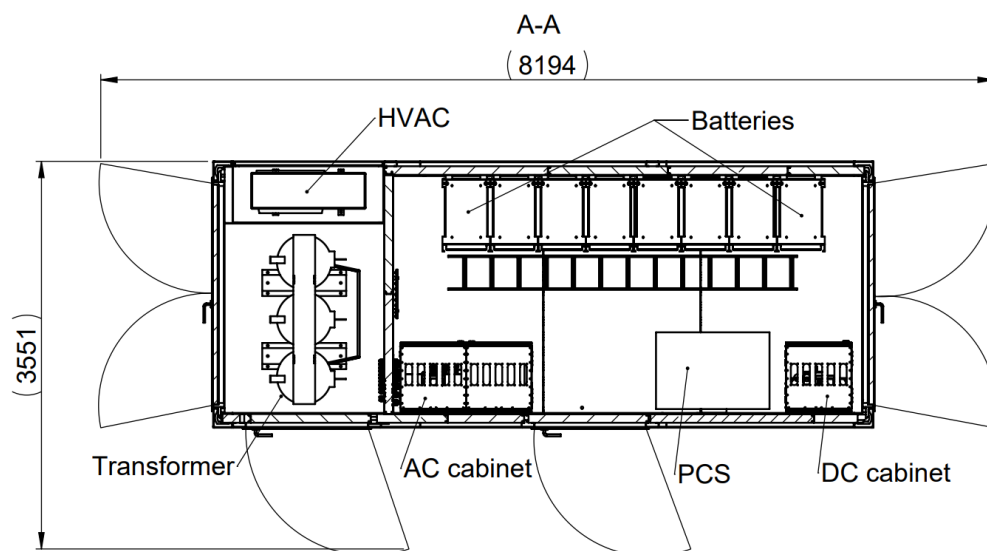
Tabel 3.2. Kaablite andmed [82], [83]

Liini tähis	Kaabli tüüp	Takistus 20° C, Ω/km	Pikkus, m	Lubatud koormusvool, A
F1_JK1	AXPK 4G240	0,125	150	375
F3_LK8	AXPK 4G120	0,253	35	255
F13_Kontor	AXPK 4G16	1,91	160	78
F2_JK1	AXPK 4G185	0,164	185	330
F4_JK2	AXPK 4G240	0,125	160	375
F6_JK3	AXPK 4G185	0,164	50	330
F8_JK4	AXPK 4G185	0,164	60	330
T_kaabel	NSGAFÖU 300mm ²	0,064	5	895

Graafiliselt mudeli on näha, et tarbijate jaotuskilpidesse on joonistatud „väljas“ olekus (helehallid) koormused tähistusega „Pmax_“ – fikseeritud koormused võimaldavad hinnata LFA pingeväärtusi tarbijate maksimaalsetel koormustel. Jaotuskilpide ja 0,4 kV jaotla kõrvale joonistatud valged riskülikud kuvavad peale LFA teostamist sõlmedes olevaid pingeväärtuseid.

Akusalvestussüsteem mudeli elemendi loomiseks võeti aluseks üks võimalikest turul pakutavatest lahendustest – ABB eStorage Flex 20 tooteleht väljatoodud lisades (Lisa 1). Tegu on võtmed kätte lahendusega konteineri formaadis, järgneval joonisel (Joonis 3.2.) on kujutatud eelnevalt mainitud akusalvestussüsteemi komponentide asetust.

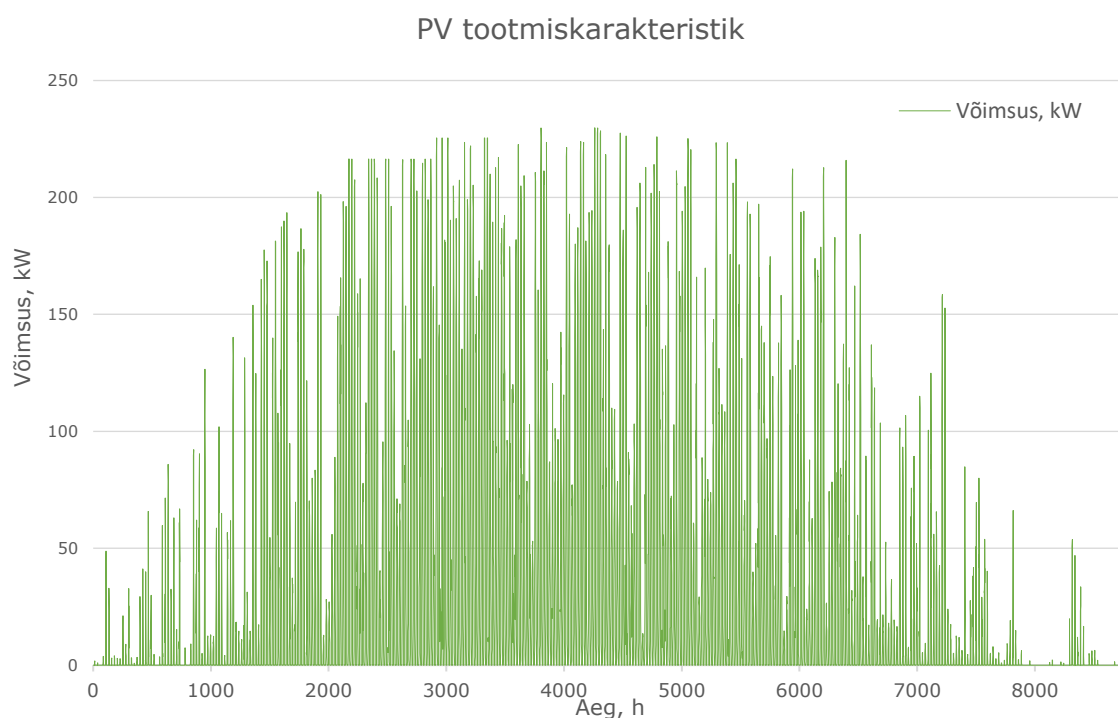
Komponentidest on Inverteritena kasutatud ABB PCS100 invertereid [84], mida maksimaalselt konkreetseesse süsteemi mahub 8. Kest mahutab kuni 800 kVA 0,4/0,48 kV trafo – mudeli koostamisel valiti tinglikult trafo suuruseks 600 kVA. Akusid mahutab selline süsteem kuni 680 kWh.



Joonis 3.2. ABB eStorage Flex 20 konteiner (Lisa 3)

3.2.1 Päikesejaamade tootmisprofiil

Päikesepargi tootmise simuleerimiseks kasutati profiili loomiseks võrgu omaniku poolt koostatud 2021. aasta prognoositud tootmisgraafikut Tallinna mnt 31 kinnistul asuvate päikesejaamade kohta. Andmete kontrollimiseks teostati täiendavad simulatsioonid päikesejaamade modelleerimistarkvaraga PvSyst. Saadud tulemused erinesid olemasolevast prognoosist +/- 5% olenevalt kui täpselt mudel esitada (kaldenurgad, orientatsioon jms) või millist päikese irradiatsiooni mudelit kasutada. Oma kujult jälgisid kõik päikesepargi tootmisüksused samalaadset graafikut nagu on näitena välja toodud järgneval joonisel (Joonis 3.3.). Tegemist on prognoos graafikuga, ning tegelikud väärtused sõltuvad hetkelistest ilmastikuoludest.



Joonis 3.3. PV elektrienergia tootmiskarakteristik

3.2.2 Tarbijate koormusprofiilid

Võrgus olevad tarbijad on koondatud jaotuskilpides mõõdetud tarbimispunktideks. Kõigi kolme tarbimiskoha simuleerimiseks on kasutatud DIGSILENTIS „LV Load Type” elementi, et modelleerimis tarkvaras oleks võimalik koormusi tundide kaupa profileerida. Tarbijate koormusprofiilide genereerimiseks kasutati 3 muutujat – kalkuleeritud aastane tarbitud energia hulk (mõõtmiste põhjal), DIGSILENTisse sisseehitatud tarbimisprofiilid ja skaleerimisfaktor. Tarbijate profiilide kujundamisel arvestati ka nädalapäevi, pühasid ja aastaaegu.

- Kalkuleeritud aastane tarbitud energia hulk – aastase tarbimise kalkuleerimise aluseks olid eelnevalt läbiviidud nädalased mõõtmised, millest on täpsem ülevaade alapeatükis (2.4).
- DIgSILENT tarbimisprofiilid – modelleerimistarkvara raamatukogus on tarbimisprofiilid jaotatud kaheks – aastase tarbimise järgi ja maksimaalse tarbimise järgi. Need omakorda jagunevad äri, tööstus, põllumajandus ja kodumajapidamiste tarbimisprofiilid. Samuti on ka sektoritel eraldi tüübid – tava töötunnid kaheksast viieni, 24/7 tööaja profiil jne. Töös käsitlevate tarbijate koormuste profiilideks valiti kontori puhul – „äri tööpäevad, 8-17“, ning tööstustarbijad ja serveripargi jaoks modelleeriti sobilikud profiilid mõõtmiste põhjal.
- Skaleerimisfaktor – skaleerimisfaktor korrutab läbi aastasest energia hulgast saadud tulemuse ning võimaldab tarbimisele anda standardhälbe – päevased tulemused erinevad. Skaleerimisfaktori jaoks modelleeriti Excelis igale tarbijale oma aastase standardhälbe graafik – tööstustarbijate puhul -15 - +20%, kontori puhul +/-12% ja serverite puhul +/- 9%.

3.2.3 Akusalvesti toimimine mudelis ja seadeväärtused

Akusalvesti mudeli loomisel kasutati DIgSILENTis olemas olevat aku QDSL mudelit, mida modifitseeriti, et akusalvesti väljundvõimus jälgiks võrgukoormust – akusalvesti mudeli kood lisades (Lisa 4). Salvestet laetakse ajal kui energia tootmine võrgus ületab tarbimist ning salvestatud energiat kasutatakse kui tarbimine ületab tootmist (salvestatud energia piires). Järgnevas tabelis (Tabel 3.3) on väljatoodud akusalvesti sisend parameetrid. Seadeväärtustena saab akusalvestile määrata suuruse, laetustase seotud väärtused, akusalvesti maksimaalsed võimsused laadimisel ning võrgu toitmisel, lisaks on määratavad reaktiivenergia väärtused.

Tabel 3.3. Akusalvesti mudeli seadeväärtused

Muutuja	Ühik	Selgitus	Seadeväärtus
E_{maht}	MWh	Akusalvesti energia mahtuvuse määramine.	0,4
SOC_{alg}	%	Akusalvesti algne laetusetase.	0
SOC_{min}	%	Akusalvesti minimaalne laetusetase.	5
SOC_{max}	%	Akusalvesti maksimaalne laetusetase.	95
P_{maxL}	MW	Akusalvesti maksimaalne laadimisvõimsus.	0,2
P_{maxT}	MW	Akusalvesti maksimaalne toitevõimsus.	0,2
P_{startL}	MW	Millal hakkab akusalvesti laadima	0,01
P_{startT}	MW	Millal hakkab akusalvesti võrku toitma	-0,01
O_{suund}	-	Tuvastamaks võimsuse liikumise suunda mudelis.	1

Koodi funktsioneerimiseks arvutatakse või määratakse parameetritele tingimuste täitmisel väärtused. Koodis olevatest parameetritest annab ülevaate järgnev tabel (Tabel 3.4.).

Tabel 3.4. Akusalvesti mudeli parameetrite arvutatud/määratud väärtused

Muutuja	Ühik	Selgitus
SOC	%	Akusalvesti laetustase.
$P_{m\ddot{o}t}$	MW	Mõõdetud energiavoog mõõtepunktis millest on maha arvatud salvesti nimivõimsus. negatiivne = energia müük, positiivne = energia ost välisvõrgust.
A_{soc}	-	Parameeter, akusalvesti SOC oleku määramiseks.
A_{olek}	-	Parameeter, otsustamiseks mida akusalvesti tegema peaks – laeb, toidab või ootel
P_{toi}	MW	Akusalvesti võimsus võrgu toitmisel.
P_{lae}	MW	Akusalvesti võimsus laadimisel.
P_{lsum}	MW	Valitud mõõtepunktis võimsuse väärtus.
P_{liin}	-	Mõõtmisteks valitud liin/objekt
redFac	-	Parameeter, võimsuse arvutamiseks
P_{gen}	MW	Salvesti poolt genereeritud võimsus

Salvesti SOC määratakse QDSL analüüsi alguses võrdeliseks salvesti algse „SOC_{alg}“ seadeväärtusega. Järgmiseks määratakse väärtused muutujatele A_{olek} , ja A_{soc} . A_{olek} määrab ära kas akusalvesti peaks arvutuse hetkel laadima, võrku toitma või olema ootel, samuti kontrollitakse üle kas seadeväärtuste tingimused kehtivad. A_{soc} abil kontrollitakse, kas SOC olek vastab seadeväärtuste tingimustele. $P_{m\ddot{o}t}$ arvutamiseks kasutatakse allpool olevat valemit (3.1). Arvutamiseks peab olema valitud mõõtepunkt - P_{liin} , mida läbivat võimsust P_{lsum} kasutatakse $P_{m\ddot{o}t}$ arvutamisel – koostatud mudelis valitud trafo kaabel „T_kaabel“. P_{set} väärtus tuleb elemendi (akusalvesti) mudeli baasandmetest. $P_{m\ddot{o}t}$ negatiivne väärtus tähendab energia importi välisvõrgust ning positiivne väärtus eksporti.

$$P_{m\ddot{o}t} = P_{lsum} \cdot O_{suund} - P_{set} \quad (3.1)$$

Salvesti poolt genereeritud võimsuse P_{gen} arvutamiseks kasutatakse lisaks P_{maxT} ja P_{maxL} väärtustele muutujat redFac, mis arvutatakse tingimuste täitmisel kasutades valemeid (3.2), (3.3), muudel juhtudel on redFac väärtuseks 1.

$$redFac = 1 - \frac{(P_{m\ddot{o}t})}{(-P_{startT} + P_{maxT})} \quad (3.2)$$

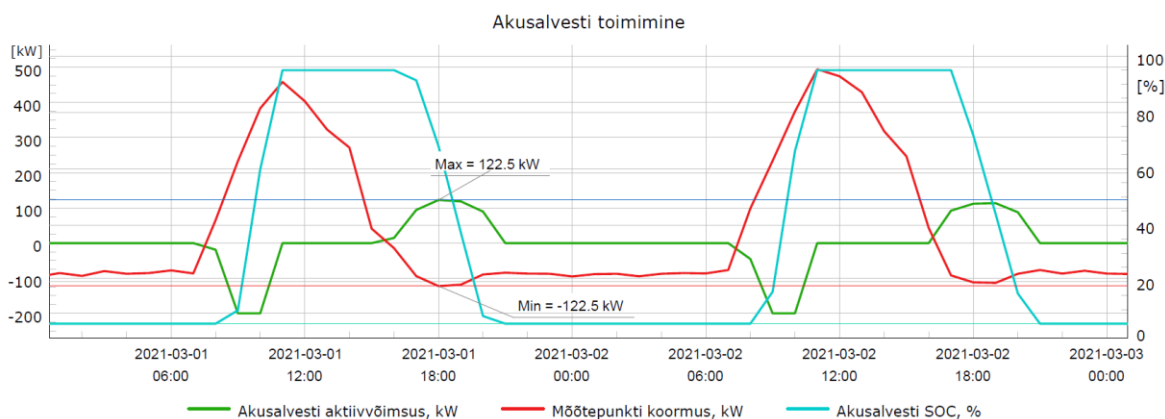
$$redFac = 1 - \frac{(P_{maxL} - P_{m\ddot{o}t})}{(P_{maxL} - P_{startL})} \quad (3.3)$$

P_{gen} väärtus arvutatakse valemitega (3.4),(3.5), kui arvutatud väärtus on negatiivne laetakse salvestit, kui väärtus positiivne toidab salvesti võrku.

$$P_{gen} = P_{toi} \cdot redFac \quad (3.4)$$

$$P_{gen} = -P_{lae} \cdot redFac \quad (3.5)$$

Järgneval joonisel (Joonis 3.4.) on näidatud, kuidas akusalvesti reguleerib oma koormust mõõtepunktis $P_{mõõt}$ oleva väärtusega. Jooniselt on näha, et kui mõõtepunkti koormuse väärtus hommikul ja õhtusel perioodil läheb läbi nullist muutub akusalvesti võimsus vastavalt algoritmile.



Joonis 3.4. Akusalvesti toimimine, koormuse jälgimine

3.3 LFA simulatsioonid, akusalvesti mõju

Akusalvesti mõju hindamiseks teostati DIgSILENT PowerFactory keskkonnas LFA simulatsioonid kahe hüpoteetilise situatsiooniga juhul:

- kui akusalvesti toidab võrku maksimaalse võimsusega ning hetkel kui akusalvesti on kas täis või seda ei eksisteeri (joonistel kuvatud lüliti väljas asendis),
- kui akusalvesti laeb maksimaalse võimsusega ning hetkel kui akusalvesti on kas tühi või seda ei eksisteeri (joonistel kuvatud lüliti väljas asendis).

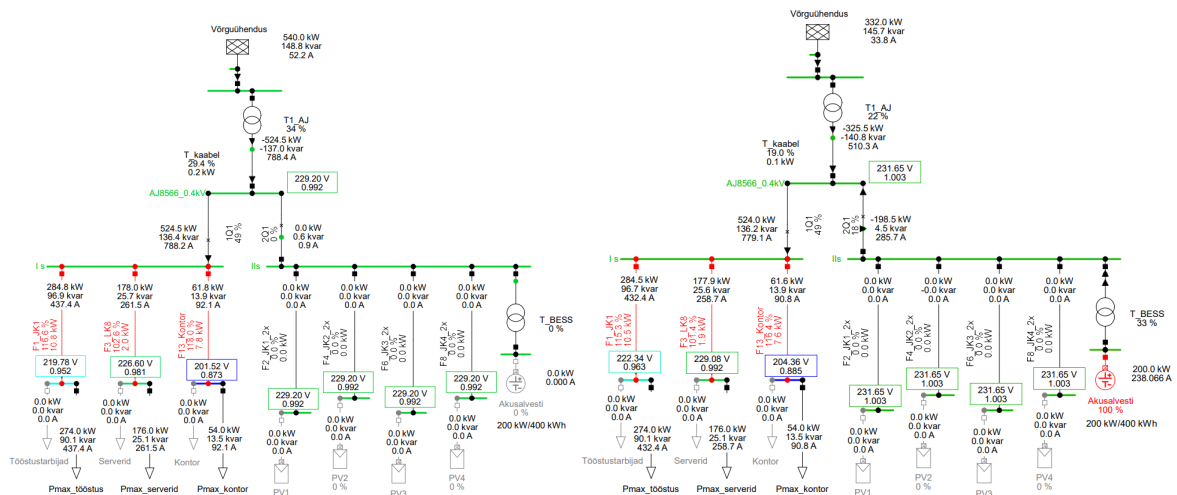
Joonistel on kuvatud tootmiseseadmete ja tarbimiseadmete voolud, aktiiv- ja reaktiivenergia väärtused, kaablite juures on kuvatud kaabli protsentuaalne koormus tema maksimaalselt lubatud koormusest ning kaod. Värvuse loogika toimib suhtühikute järgi ning läheb sujuvalt üle värvide vahel: 1,0 roheline, 1,05 oranž ja 1,1 punane.

Esimene situatsiooni kujutab olukorda, kus päikesejaamade võimsus on null ning koormustena on kasutatud maksimaalseid mõõdetud hetkväärtuseid. Järgneval joonisel (Joonis 3.5.)(Lisa 5)vasakul skeemi osas on kuvatud olukord kus salvesti ei ole töös või on tühi ning paremal skeemi osas situatsioon kui akusalvesti toidab võrku maksimaalsel võimsusel.

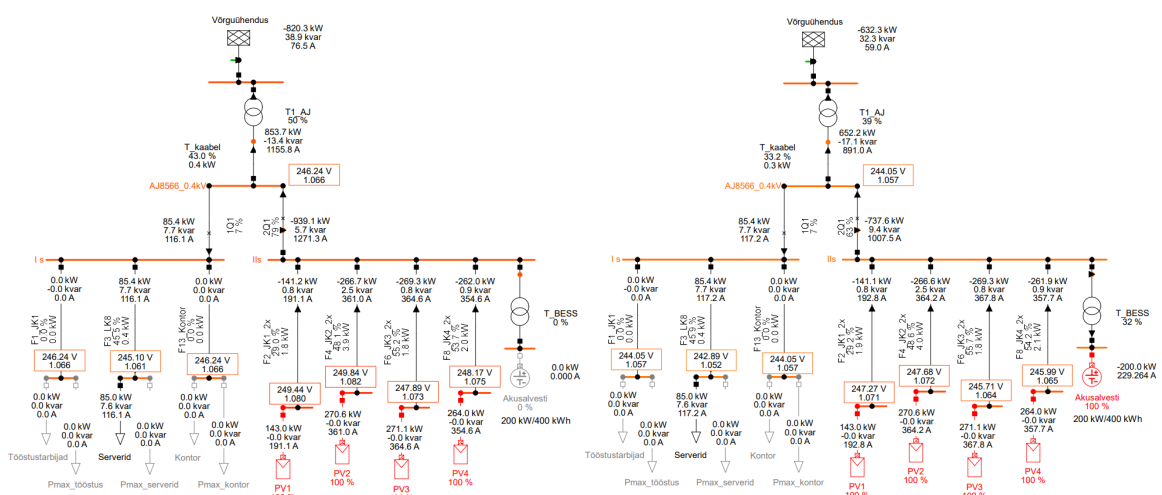
Teine situatsioon kujutab olukorda, kus päikesejaamade võimsus on maksimaalne, ning võrgu tarbimine on minimaalne. Allpool oleval joonisel (Joonis 3.6)(Lisa 6) ülemise

skemi osas on kuvatud olukord kus akusalvesti on täis või ei ole töös ning alumise skemi osas situatsiooni kus akusalvesti laeb maksimaalsel võimsusel.

Oletus, et akusalvesti töö avaldab mõju võrgu pingeväärtustele sai kinnitust. Mõlema kirjeldatud situatsiooni puhul on näha, et akusalvesti avaldab mõju võrgu pingeväärtustele, ~1% nimipingest. Esimese situatsiooni puhul kasvavad pingeväärtused sõlmedes ~2,4 V. Probleemseks kohaks jääb F13 lõpus olev tarbija „kontor“, kus mõõdetud hetkeline tarbimisvõimsus oli 54 kW, millest tulenevalt on liitumiskilbis simuleeritud pinged alla standardi järgse alumise piiri – põhjuseks pikk ja suhteliselt peenike kaabel sellise koormuse jaoks. Teise situatsiooni puhul on näha, et pingeväärtused sõlmedes langesid ~2,2V võrra. Mõlema situatsiooni puhul ületab netovõimsus akusalvesti nimivõimsust mitmekordset.



Joonis 3.5. LFA PV võimsus null, koormus max (vasakul akusalvesti väljalülitatud või tühi, paremal akusalvesti töös)



Joonis 3.6. LFA PV võimsus maksimaalne, tarbimine minimaalne, (vasakul akusalvesti väljalülitatud või täis, paremal akusalvesti laadimas)

3.4 Stsenaariumid

Alapeatükis (1.4) anti ülevaade akusalvestite poolt võimalikest pakutavatest teenustest, nendest valiti kolm teenust mis võiksid kasvatada akusalvesti poolt tekitatavat tulu – lokaalse taastuenergia tarbimise suurendamine, energia arbitraaž ja sagedus reguleerimisteenus. Hilisemaks võrdluseks loodi referents stsenaariumit, kus akusalvestit ei kasutatud. Järgnevas tabelis (Tabel 3.5.) on väljatoodud stsenaariumid ning nende lühikirjeldus, stsenaariumite alapeatükkides antakse põhjalikum ülevaade stsenaariumite sisust. Kombineeritud stsenaariumite puhul on strateegia ajalised perioodid valitud PVjaamade poolt toodetud elektrienergia järgi – ligi 92% toodetud elektrienergiast toodetakse perioodil 1.03-30.09. Selline valik võimaldab suurendada taastuenergia lokaalset tarbimist.

Tabel 3.5. Stsenaariumite ja alamstsenaariumite tabel

Tähis	Stsenaarium	Alamstsenaarium
S0	Referents stsenaarium	-
S1	Lokaalse taastuenergia tarbimise suurendamine	-
S2.1	Energia arbitraaž	Puhas energia arbitraaž
S2.2	Energia arbitraaž	Puhas energia arbitraaž (1.01-28.02 – 1.10-31.12) + lokaalse taastuenergia tarbimise suurendamine (1.03-30.09).
S2.3	Energia arbitraaž	Energia arbitraaž lokaalse tarbimise suurendamise fookusega (1.01-28.02 – 1.10-31.12) + lokaalse taastuenergia tarbimise suurendamine (1.03-30.09).
S3.1	Sageduse reguleerimine	S2.1 + sageduse reguleerimisteenuse pakkumine turule
S3.2	Sageduse reguleerimine	S1 + sageduse reguleerimisteenuse pakkumine turule
S3.3	Sageduse reguleerimine	S2.3 + sageduse reguleerimisteenuse pakkumine turule

3.5 Stsenaariumite hinnastamise komponendid

3.5.1 Elektrienergia hind ja võrgutasud

Elektrienergia hinnaks on kasutatud tunnipõhiseid NordPoolSpot päevette börsihindu perioodil 1.01.2021 – 31.12.2021, andmed võetud Eleringi andmelaost [85].

Stsenaariumites toodetud, kohapeal tarbitud ja võrku müüdnud elektrienergia väärtuse arvutamisel on arvesse võetud valitud hinnapaketti ja sellest tulenevaid võrgutasusid. Elektrienergia edastamisetasu on ostu, müügi ja kohapeal tarbitud väärtustesse sisse arvatud. All järgnev tabel (Tabel 3.6.) annab ülevaate hinnapakett VKL2 võrgutasu komponentidest. Elektrienergia edastamise puhul lisanduvad veel taastuenergia tasu 1,13 € senti/kWh (arvutustel kasutatud väärtus) ja elektriaktsiis 0,1 € senti/kWh (arvutustel kasutatud väärtus). Rahavoogude tabelites on võrgutasuna esitatud kuupõhiseid komponente.

Tabel 3.6. Elektrilevi hinnapakett VKL2 võrgutasud [86]

Võrgutasu liik	Maksumus	Ühik
Võrguühenduse kasutusvõimsuse tasu	2,76	€/kW kuus
Võrguühenduse läbilaskevõime tasu	0,18	€/kW kuus
Võrguühenduse kuutasu	125	€/kuus
Edastamistasu päevahind	1,08	€ senti/kWh
Edastamistasu ööhind	0,62	€ senti/kWh

3.5.2 Sageduse reguleerimisetasu

Sageduse reguleerimise hinnastamise aluseks on võetud tunnipõhiselt Soome Fingrid Oyj aFFR andmed perioodil 1.01.2021-31.12.2021 [87], väärtused on teisendatud €/kWh. Lisa tingimustena on arvestatud:

- töös käsitletud akusalvesti väljundvõimsus on 200 kW, millest tulenevalt 1 MW minimaalse võimsuse piirangut turule pääsemiseks ei rakendata,
- teenuse pakkumise eelduseks on, et vaadeldava tunni jooksul osteti teenust,
- eelnevate ning stsenaariumite täiendavate tingimuste täitmisel osaletakse alati turul turuhinnaga.

3.5.3 Hoolduskulud

Hoolduskulud koosnevad päikesepargi hoolduskuludest ja akusalvesti hoolduskuludest. Artiklis [88] on väljatoodud 1 MW võimsusega päikesepargi aastasteks hoolduskuludeks 5 570 € - ehk 5,57 €/kW. Pakri Teadus- ja Tööstuspargi päikesepargi aluspind on kaetud kunstmuruga, seega päikesepargi hoolduskulud võrreldes sama suure põllu peal paikneva päikesepargiga on oluliselt väiksemalt – puudub vajadus muru niitmiseks ning samuti täiendava valve jaoks. Eelneva põhjal on võetud päikesepargi hoolduskuludeks 3,5 €/kW aastas. Akusalvesti hoolduskulude aluseks on võetud artiklites [37], [89] väljatoodud 5,4 €/kW ja 9 €/kW (10\$, aasta alguse kurss \$/€= \sim 0,9)– arvutustes kasutatud keskmist 7,2 €/kW. Arvutatud hoolduskulude väärtused on välja toodud järgnevas tabelis (Tabel 3.7.).

Tabel 3.7. Päikesepargi ja akusalvesti hoolduskulud

Hoolduskulu	Arvutus	Väärtus, €
Päikesepark	$948,75 \cdot 3,5 =$	3 320,6
Akusalvesti	$200 \cdot 7,2 =$	1 440,0
	Kokku:	4 760,6

3.5.4 Investeeringukulud

Investeeringu maksumuse arvutamise aluseks on võetud artiklis [37], CAPEX (*Capital Expenditures*) investeeringu kulutuste arvutamise valem ning artiklis esitatud vastavad

väärtused, kulu komponentide maksumused on välja toodud järgnevas tabelis (Tabel 3.8).

Tabel 3.8. Investeeringu kulude maksumus, [37]

Kulu tüüp	Hind	Ühik
MWh komponent	0,132	M€/MWh
MW komponent	0,27	M€/MW
Muud kulud	0,1	M€/MWh

Investeeringu kulutuste näide on toodud suurema 2 MW/8 MWh akusalvesti kohta, suurendatakse saadud väärtust 20% võrra, kuigi tehnoloogia üldine hind on pigem langustrendis. Investeeringu kulud arvutatakse järgneva valemiga (3.6).

$$CAPEX = A_{MWh} \cdot (C_{MWh} + C_{muud}) + A_{MW} \cdot C_{MW} \quad (3.6)$$

kus CAPEX – investeeringu kapitalikulu

A_{MWh} – akusalvesti energia mahtuvus

C_{MWh} – akusalvesti kulu mahuühiku kohta

C_{muud} – akusalvesti muud kulud mahuühiku kohta

A_{MW} – akusalvesti nimivõimsus

C_{MW} – akusalvesti kulu võimsusühiku kohta

Investeeringukulude arvutus:

$$CAPEX = 0,4 \cdot (0,132 + 0,1) + 0,2 \cdot 0,27 = 0,1468 \text{ M€}$$

$$CAPEX = 0,1468 \cdot 1,2 = 0,17616 \text{ M€} = 176 \text{ 160 €}$$

Investeeringu kulutusteks on arvutuslikult 176 160€.

3.5.5 Akusalvesti amortisatsioon

Akusalvesti amortisatsioon määramise aluseks on artiklis [37] väljatoodud väärtused. Akusalvesti elueaks on arvestatud 5000 tsüklit, mis on NMC (liitium-nikkel-mangaan-koobalt oksiid) tüüpi akude puhul keskmine väärtus ning LFP (liitium-raud-fosfaat) tüüpi liitiumakude puhul madal väärtus. Samuti on arvestatud, et eluea tsüklite täitumisel vajavad akusalvesti elemendid välja vahetamist [90]. Aastase amortisatsioon rahalise väärtuse arvutamiseks kasutatakse järgnevat valemit (3.7).

$$A_{amrt} = \left(\frac{A_{tpy}}{A_e} \right) \cdot (CAPEX - C_{muud}) \quad (3.7)$$

kus, A_{amrt} – akusalvesti aastane amortisatsioon,

A_{tpy} – akusalvesti aastane laadimistsüklite arv,

A_e – akusalvesti eluiga tsüklites.

3.6 Arvutamise metoodika

Järgnevas alapeatükis antakse ülevaade stsenaariumite jooksul arvatud väärtuste arvutus käigust ja loogika funktsioonidest.

3.6.1 Elektrienergia mahtude arvutus

Stsenaariumite võrdluseks kasutati kolme simulatsioonide tulemustega seotud tunnipõhist muutujat ning nende põhjal arvatud rahaline väärtus, mille arvutamisel kasutati tabelarvutusprogrammi võimalusi – kohapeal tarbitud elektrienergia, võrgust ostetud elektrienergia ja võrku müüdud elektrienergia. Elektrienergia mahtude individuaalseks arvutamiseks kasutati täiendavat kolme parameetrit, järgnevas tabelis (Tabel 3.9) on väljatoodud kasutatavad parameetrid, nende selgitus ning kasutatav tähis. Loogikatehted on esitatud Pythoni süntaksi vormis.

Tabel 3.9. Elektrienergia mahtude arvutamise parameetrid

Parameeter	Selgitus	Tähis
Tarbitud elektrienergia	Tarbitud elektrienergia,	E_{tar}
Toodetud elektrienergia	Päikesepargi poolt toodetud elektrienergia + salvesti võrku antud elektrienergia	E_{gen}
Neto tarbitud elektrienergia	Tarbitud - toodetud elektrienergia	E_{net}
Kohapeal tarbitud elektrienergia	Kohapeal tarbitud elektrienergia kogus	E_{kpt}
Elektrienergia ost	Ostetud elektrienergia kogus	E_{ost}
Elektrienergia müük	Müüdud elektrienergia kogus	$E_{müük}$

Kohapeal tarbitud elektrienergia näitab elektrienergia kogust, mis on toodetud kohapeal (PV ja akusalvestisalvesti) ning kohapeal ka ära kasutatud. Kui tarbimine on suurem kui toodetud elektrienergia, siis kohapeal tarbitud energia on võrdeline toodetud elektrienergiaga. Muudel juhtudel on kohapeal tarbitud elektrienergia võrdeline tarbimisega (3.8).

```
if  $E_{tar} > E_{gen}$ :  
     $E_{kpt}(E_{gen})$   
else:  
     $E_{kpt}(E_{tar})$  (3.8)
```

Elektrienergia ost näitab elektrienergia kogust, mida on tarbimise katmiseks võrgust juurde vaja osta. Kui tarbitud elektrienergia on suurem kui toodetud elektrienergia, siis võrgust ostetud elektrienergia on võrdeline tarbitud elektrienergia miinus toodetud elektrienergia. Muudel juhtudel on võrgust ostetud elektrienergia võrdne nulliga (3.9).

```

if Etar > Egen:
    Eost(Etar - Egen)
else:
    Eost(0)

```

(3.9)

Elektrienergia müük näitab elektrienergia kogust, mis on tarbimisest ülejäänud ning müüakse võrku. Kui tarbitud elektrienergia on väiksem kui toodetud elektrienergia, siis võrku müüdüd elektrienergia on võrdeline toodetud elektrienergia miinus tarbitud elektrienergia. Muudel juhtudel on võrku müüdüd elektrienergia võrdne nulliga (3.10).

```

if Etar < Egen:
    Emüük(Egen - Etar)
else:
    Emüük(0)

```

(3.10)

3.6.2 Elektrienergia mahtude rahalised väärtused

Tunnipõhiste väärtuste arvutamiseks muutujatele võeti arvesse NordPoolSpoti tunnipõhiste päev-ette hindadega perioodil 00:00 01.01.2021 – 23:00 31.12.2021 [85] ja võrgutasude „elektrienergia edastus“ komponentidega olenevalt kas tegu oli päevase või öise tunniga [86]. Kohapeal tarbitud elektrienergia ja elektrienergia ostmise puhul koosnes võrgutasu komponent elektrienergia edastustasust, taastuvenergia tasust ja elektri aktsiisist.

Võrku müüdüd elektrienergia rahalise väärtuse arvutamisel arvestatakse tunni hinnast maha marginaal ning korrutatakse võrku müüdüd elektrienergia kogusega. Marginaal on lepingu põhine kokkuleppeline väärtus, arvutustes on kasutatud marginaali väärtust 0.1 € senti/kWh kohta. Arvutatud valemiga (3.11).

$$Emüük \cdot (tunni\ hind - marginaal) \quad (3.11)$$

Kohapeal tarbitud elektrienergia rahalise väärtuse arvutamisel liidetakse tunni hinnale võrgutasu – kohapeal tarbitakse kas lokaalselt päikesepargi poolt toodetud elektrienergiat või akusalvestisse salvestatud energiat ehk võrgutasu edastus komponendi arvelt säästetakse. Rahavoogude tabelis vaadeldakse väärtust kui säästu. Arvutatud valemiga (3.12).

$$Ekpt \cdot (tunni\ hind + võrgutasu) \quad (3.12)$$

Võrgust ostetud elektrienergia rahalise väärtuse arvutamisel liidetakse tunni hinnale võrgutasu edastus komponent ning korrutatakse võrgust ostetud elektrienergia kogusega, arvutatud kasutades valemit (3.13).

$$Eost \cdot (tunni\ hind + võrgutasu) \quad (3.13)$$

3.6.3 Võrgutasude kuupõhiste komponentide arvutus

Võrgutasude kuupõhiste komponentide arvutused teostati eraldi. Võrguühenduse kasutusvõimsuse tasu arvutamisel arvestati ühe kuu vältel tunni põhiselt maksimaalset võrgust sisseostetud kogust ning see korrutati vastava määraga, valem (3.14).

$$C_{kv} = P_{maxost} \cdot C_{kvc} \quad (3.14)$$

kus, C_{kv} – võrguühenduse kasutusvõimsuse tasu

P_{maxost} – maksimaalne võrgust ostetud elektrienergia kogus ühes tunnis

C_{kvc} – võrguühenduse kasutusvõimsuse tasu määr

Võrguühenduse läbilaskevõime tasu arvestati juhul kui tootmis suunaline võimsus ületas ühe tunni jooksul 630 kW. Arvutamisel korrutati võimsust ületanud kogus vastava määraga valem (3.15).

$$C_{lv} = (E_{net} - 630) \cdot C_{lvc} \quad (3.15)$$

kus, C_{lv} – võrguühenduse läbilaskevõime tasu,

E_{net} – neto tarbitud elektrienergia,

C_{lvc} – võrguühenduse läbilaskevõime tasu määr.

3.6.4 Sagedusereguleerimise tasu arvutus

Sagedusereguleerimise tasu arvutatakse kui stsenaariumi käigus tunnipõhiselt toimus reguleerimine, väärtuse saamiseks korrutatakse sageduse reguleerimisturule müüdüd võimsus vastava tunni sageduse reguleerimis väärtusega.

$$C_{sag} = P_{sag} \cdot C_{src} \quad (3.16)$$

kus, C_{sag} – sagedusereguleerimise tasu,

P_{sag} – sagedusturule müüdav võimsus,

C_{src} – sagedusereguleerimis tasu määr.

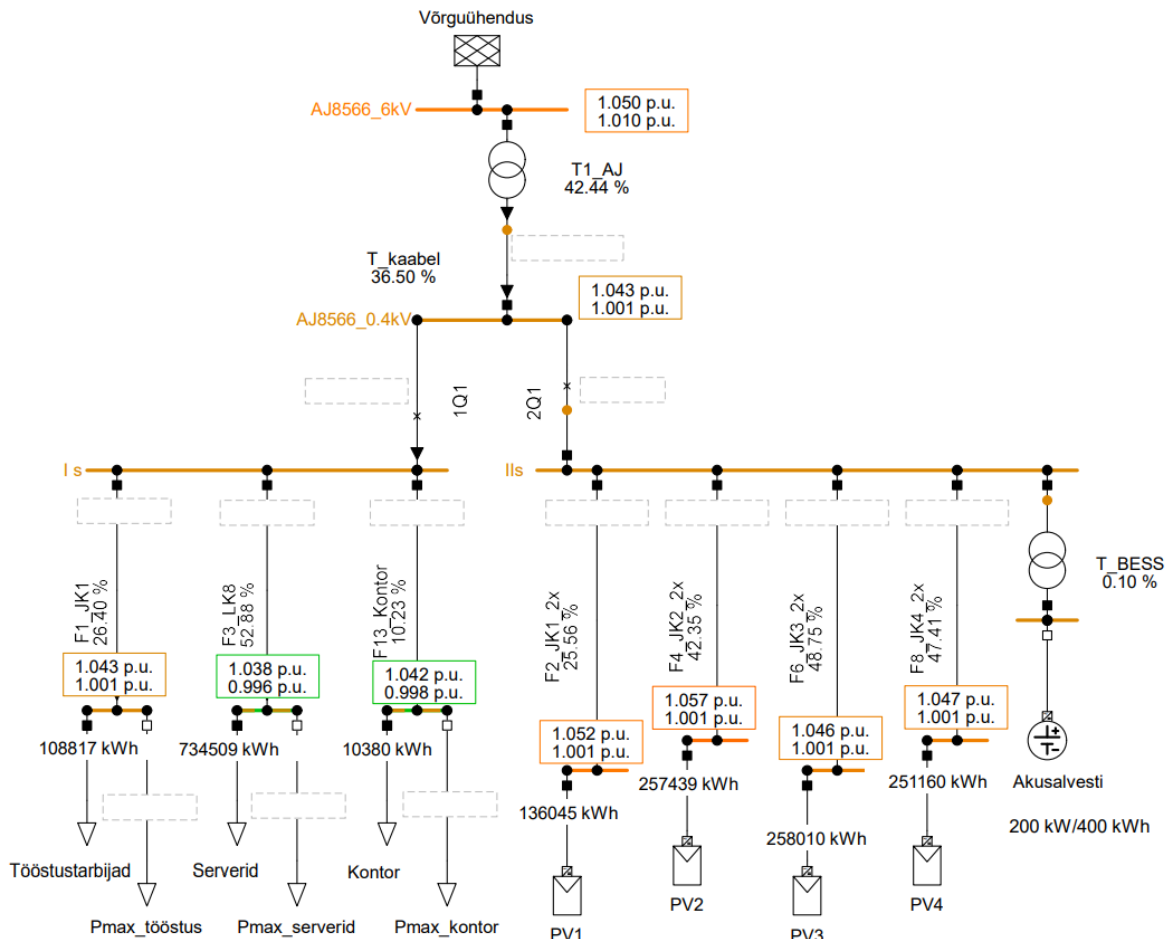
Saadud tulemus liidetakse üles reguleerimise puhul kohapeal tarbitud elektrienergia väärtusele ning alla reguleerimise puhul lahutatakse võrgust ostetud elektrienergia väärtusest.

4. TULEMUSTE ANALÜÜS

Järgnevas peatükis antakse ülevaade alapeatükis (3.4) välja toodud stsenaariumite täpsemast sisust ning simulatsioonide tulemustest.

4.1 Referents stsenaarium

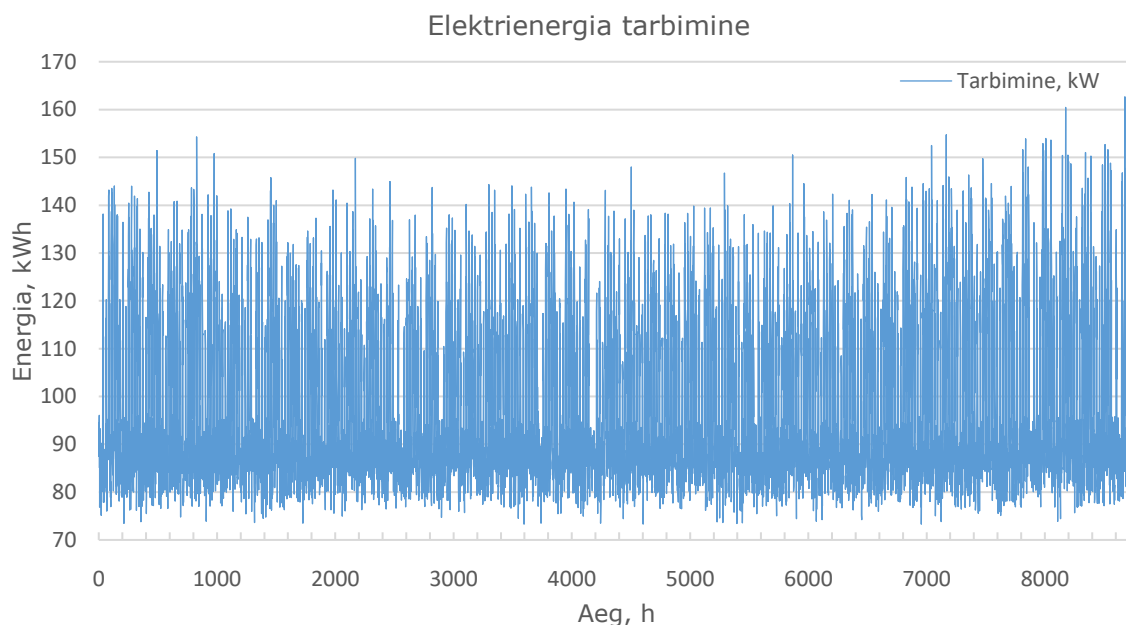
Stsenaariumi eesmärgiks on luua referents väärtused võrgumudelile, mida oleks võimalik järgnevate stsenaariumite tulemustega võrrelda. Stsenaariumi aluseks kasutati DiGSILENT PowerFactory's loodud võrgu mudelit, kuid akusalvestit antud stsenaariumi käigus QDSL analüüsis arvesse ei võetud (akusalvesti süsteemist väljalülitatud). Skeemil (Joonis 4.1.) on kuvatud 1 aastase perioodi vältel: minimaalsed ja maksimaalsed pinge väärtused suhtühikutes, kaablite ja trafode maksimaalsed koormused protsentuaalselt ning tootmisseadmete ja tarbijate elektrienergia mahud.



Joonis 4.1. QDSL analüüsi tulemused referents stsenaarium, 1 aasta

4.1.1 Elektrienergia tarbimine

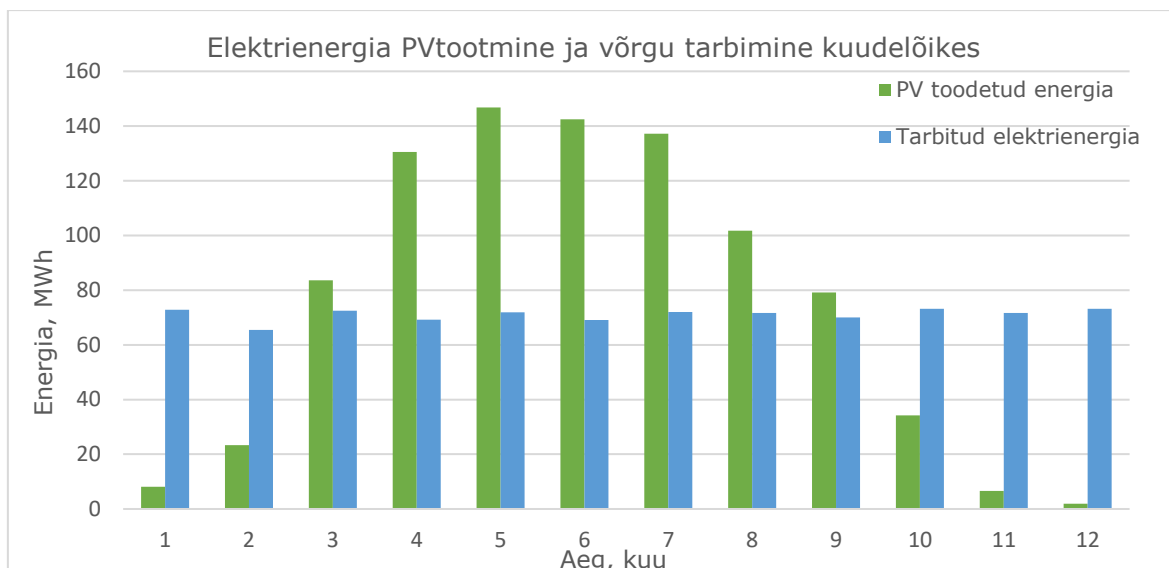
Vaadeldava 1 aastase perioodi vältel tarbiti võrgus elektrienergiat 853,7 MWh. Kogu tarbimisest 86% moodustas serveripargi poolt tarbitud võimsus (734,5 MWh), tööstustarbijad 12,7% (108,8 MWh) ning kontori poolt tarbitud võimsus moodustas kogu tarbimisest 1,2% (10,4 MWh). Järgneval joonisel (Joonis 4.2.) on välja toodud vaadeldava võrgu kogu elektrienergia tarbimine simulatsiooni perioodi vältel tundide kaupa.



Joonis 4.2. Elektrienergia tarbimine ühe tunni kaupa, QDSL 1 aasta

4.1.2 Päikesejaamade elektrienergia tootmine

Territooriumil asuv päikeseпарк koosneb neljast eraldi grupist, eelneval joonisel (Joonis 3.1.) PV1 - PV4. Järgnev joonis (Joonis 4.3.) kujutab aasta jooksul tarbimise ja toodetud elektrienergia koguseid kuude lõikes. Gruppide kaupa jagunes tootmine järgnevalt: PV1 – 136 MWh, PV2 – 257,4 MWh, PV3 – 258 MWh, PV4 – 251,2 MWh. Kokku toodeti päikeseparkide poolt QDSL analüüsi alusel 895,8 MWh elektrienergiat, kusjuures maksimaalne 1 tunni jooksul toodetud energiahulk oli 799,3 kWh, mis moodustab 88% inverterite summaarsest nimivõimsusest. Netokoguselt on vaadeldav võrk elektrienergiat eksportiv – päikesejaamade poolt toodetud elektrienergia kogus oli 42,09 MWh suurem kui tarbimine. Enamus toodetud elektrienergiat, ligi 92%, toodeti vahemikus 1. märts – 30. september, suurima koguse elektrienergiat toodeti mai kuus (146,7 MWh).



Joonis 4.3. Elektrienergia tootmine ja tarbimine kuude lõikes, QDSL 1 aasta

4.1.3 Tulemused

All järgnevas tabelis (Tabel 4.1.) on välja toodud referents stsenaariumi arvutatud väärtused energiamahude väärtused, mille alusel võrreldakse järgnevaid stsenaariume.

Tabel 4.1. Referents stsenaariumi arvutatud energia

Muutuja	S0, MWh
Elektrienergia ost	545,36
Võrku müüdnud elektrienergia	587,48
Kohapeal tarbitud elektrienergia	308,33

Järgnevas tabelis (Tabel 4.2.) on välja toodud referents stsenaariumi rahavood kulu- ja tululiikide kaupa. Hoolduskulude alla ei ole arvesatud akusalvesti hoolduskulusid. Saadud tulemused on aluseks järgnevate stsenaariumite võrdlusele.

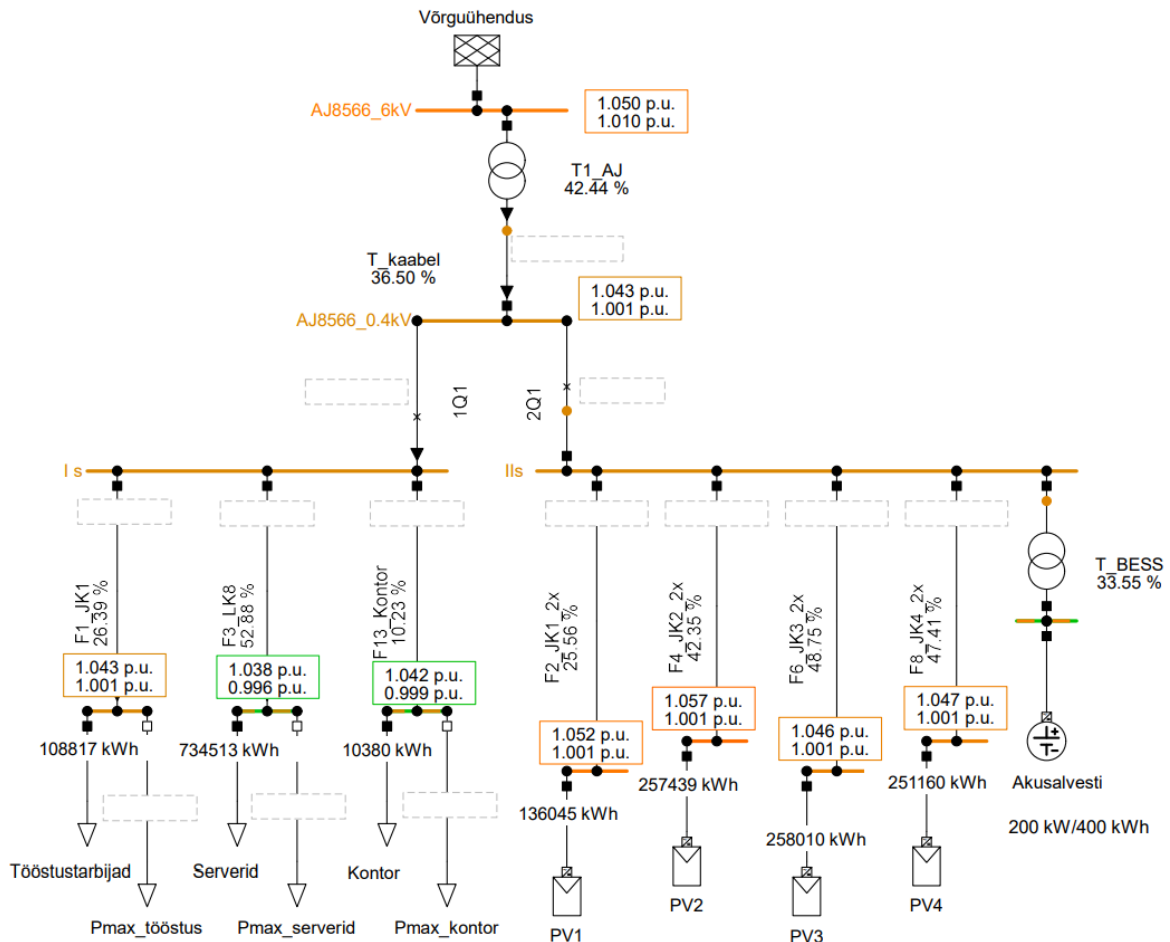
Tabel 4.2. Referents stsenaariumi rahavood

Tulud, €	S0
Elektrienergia müük	44 023,1
Kohapeal tarbitud elektrienergia	32 147,5
Kulud, €	
Elektrienergia ost	62 625,7
Võrgutasud	5 018,3
Hoolduskulud	3 320,6
Akusalvesti amortisatsioon	0
Kasum, €	5 205,9

4.2 Taastuenergia lokaalse tarbimise suurendamine

Stsenaariumi eesmärgiks on suurendada päikesejaamade poolt toodetud taastuenergia osakaalu lokaalses tarbimises kasutades akusalvestit ning seeläbi suurendada kasumit. Stsenaariumi aluseks kasutati DIgSILENT PowerFactorys loodud võrgu mudelit. Akusalvesti laadimistsükli juhtimiseks kasutati alapeatükis (3.2.3) kirjeldatud mudelit

- kohapeal toodetud energia salvestatakse, ning kasutatakse ära sama päeva õhtul kui tarbimine hakkab ületama tootmist. Saadud tulemusi võrreldakse referents stsenaariumiga kasutades tabelarvutuse tarkvara. Skeemil (Joonis 4.4.) on kuvatud 1 aastase perioodi vältel: minimaalsed ja maksimaalsed pingeväärtused suhtühikutes, kaablite ja trafode maksimaalsed koormused protsentuaalselt ning tootmisseadmete ja tarbijate elektrienergia mahud.



Joonis 4.4. Taastuenergia lokaalse tarbimise suurendamine, QDSL 1 aasta

Nagu eelnevalt jooniselt (Joonis 4.4.) on näha siis akusalvesti 1 aastase perioodi vältel võrreldes referents stsenaariumiga miinimum ja maksimum pingeväärtustele suurt mõju ei avaldanud, keskmistes pingeväärtustes on muutus tuvastatav peale neljandat või viiendat koma kohta. Põhjusteks on mudeli tunnipõhised väärtused – ehk tarbimise ja tootmise piigid ei ole antud juhul tuvastavad. Samuti on välist võrku kujutav Võrguühenduse element lõpmatu võimsusega.

4.2.1 Tulemused

Simulatsiooni tulemusel selgus, et akusalvesti suurendab taastuenergia kohapealset tarbimist ligi 90 MWh võrra – kasv 29%. Nii võrgust ostetud kui võrku müüüdud elektrienergia hulk langes vastavalt 16,4% ja 16,1%.

Energia koguste võrdlustabelites on toodud välja kasv võrreldes referents stsenaariumiga väärtusega protsentides – punane värvikood viitab langusele ning roheline värvikood kasvule. Allpool toodud tabelis (Tabel 4.3.) on väljatoodud referents stsenaariumi ja stsenaariumi S1 tulemused võrdluseks.

Tabel 4.3. Referents stsenaariumi ja stsenaariumi S1 võrdlus

Stsenaarium	Võrgust ostetud elektrienergia, MWh	Võrku müüüdud elektrienergia, MWh	Kohapeal tarbitud elektrienergia, MWh
S0	545,36	587,48	308,33
S1	455,79 (-16,4%)	492,63 (-16,1%)	397,89 (29,0%)

Alljärgnevas tabelis (Tabel 4.4) on väljatoodud stsenaariumi S1 rahavood kõrvutatult referents stsenaariumi omadega. Tabelist on näha, et akusalvesti kasutamine lokaalselt toodetud elektrienergia kohapealseks tarbimiseks mõjutab oluliselt rahavoogusid.

Tabel 4.4. Referents stsenaariumi ja stsenaariumi S1 rahavoogude võrdlus

Tulud, €	S0	S1
Elektrienergia müük	44 023,1	35 998,8
Kohapeal tarbitud elektrienergia	32 147,5	41 731,0
Kulud, €		
Elektrienergia ost	62 625,7	53 042,3
Võrgutasud	5 018,3	4 933,6
Hoolduskulud	3 320,6	4 760,6
Akusalvesti amortisatsioon	0	7 241,0
Rahavoog, €	5 205,9	7 752,2

4.3 Energia arbitraaž

Stsenaariumi eesmärgiks on suurendada majanduslikku tasuvust kasutades energia arbitraaži strateegiat. Stsenaariumi loomisel kasutati eelnevalt loodud DIGSILENT PowerFactory mudeli referents stsenaariumi tulemusi (elektrienergia tootmine ja tarbimine), DER-VET tarkvara, NordPoolSpot börsihindu ning võeti arvesse keskpinge võrgu liitumise puhul hinnapaketi võrgutasudega [86]. Arbitraaži teostades oli salvestil lubatud teostada maksimaalselt üks laadimistsükkel 24 tunnise perioodi jooksul, et vältida akusalvesti liigset kulumist. Arbitraaži simuleerimiseks kasutati kahte strateegiat ja kolme alamstsenaariumit:

- Stsenaarium 2.1 Puhas arbitraaž kogu vaadeldava perioodi vältel – energiat ostetakse võrgust odavatel tundidel (üldiselt toimus ostmise öösel) ning müüakse tagasi võrku kahel kõige kallimal tunnil.
- Stsenaarium 2.2 Arbitraaž kombineeritult taastuenergia lokaalse tarbimise stsenaariumiga – perioodil 1.03 – 30.09 järgib akusalvesti lokaalse tarbimise stsenaariumi laadimis- ja tühjakslaadimis tsükleid. 1.01-28.02 ja 1.10 - 31.12 teostatakse arbitraaži esimese strateegia järgi.
- Stsenaarium 2.3 Kolmas strateegia järgis ajaperioodide poolest sama tsüklilisust, mis teine strateegia. Arbitraaži teostamisel lähtuti ostetud elektrienergia maksimaalsest lokaalsest tarbimisest.

Saadud tulemusi võrreldi kasutades tabelarvutusprogrammi.

4.3.1 Tulemused

Järgnevas tabelis (Tabel 4.5.) on välja toodud stsenaariumi S1 ja arbitraaži stsenaariumite jooksul teostatud akusalvesti laadimistsüklite kogus. Tabelist on näha, et arbitraaži teenuse lisamisel kasvab laadimistsüklite arv ligi 50%.

Tabel 4.5. Akusalvesti kasutuse võrdlus stsenaarium S1 ja S2 alamstsenaariumitega

Stsenaarium	Akusalvesti laadimistsüklite arv, tk
S1	226
S2.1	365
S2.2	347
S2.3	347

Energia mahtude võrdluses kasvas võrgust ostetud elektrienergia müük enim stsenaariumi S2.1 puhul – elektrienergiat osteti üldiselt öisel perioodil. Täiendavalt ostetud elektrienergiast tarbiti kohapeal 45,5 MWh kasv 14,8% võrreldes referents stsenaariumiga. Stsenaariumite S2.2 ja S2.3 puhul langesid nii võrgust ostetud elektrienergia kogus kui ka võrku müüdnud elektrienergia kogus. Mõlemad stsenaariumid suurendasid kohapeal tarbitud elektrienergia kogust märkimisväärselt, vastavalt 34,2% S2.2 puhul ja 42,9% S2.3 puhul. Järgnev tabel (Tabel 4.6.) annab ülevaate arbitraaži stsenaariumite elektrienergia mahtudest elektrienergia ostu, müügi ja kohapeal tarbimise puhul.

Tabel 4.6. Referents stsenaariumi ja S2 alamstsenaariumite võrdlus

Stsenaarium	Võrgust ostetud elektrienergia, MWh	Võrku müüdnud elektrienergia, MWh	Kohapeal tarbitud elektrienergia, MWh
S0	545,36	587,48	308,33
S2.1	636,02 (16,6%)	672,05 (14,5%)	353,84 (14,8%)
S2.2	502,94 (-7,8%)	536,27 (-8,7%)	413,73 (34,2%)
S2.3	476,01 (-12,7%)	509,34 (-13,3%)	440,67 (42,9%)

Tabelis (Tabel 4.7.) on ülevaade arbitraaži stsenaariumite rahavoogudest oodatult andis parima tulemuse stsenaarium S2.3 mille eesmärgiks oli läbi arbitraaži maksimeerida kohapeal tarbitud elektrienergiat. Võrreldes referents stsenaariumitega kasvasid ka kuupõhised võrgutasud – salvesti laadimine toimus üldiselt öösel, ehk võrgust ostetud elektrienergia kogusele tarbimise katmiseks lisandus akusalvesti laadimisvõimsus.

Tabel 4.7. Referents stsenaariumi ja S2 alamstsenaariumite rahavood

Tulud, €	S0, €	S2.1, €	S2.2, €	S2.3, €
Elektrienergia müük	44 023,1	55 650,7	42 545,0	37 965,6
Kohapeal tarbitud elektrienergia	32 147,5	39 997,8	45 740,2	50 178,8
Kulud, €				
Elektrienergia ost	62 625,7	64 368,6	53 698,0	49 259,4
Võrgutasud	5 018,3	6 492,2	5 452,2	5 452,2
Hoolduskulud	3 320,6	4 760,6	4 760,6	4 760,6
Akusalvesti amortisatsioon	0	11 694,6	11 117,9	11 117,9
Rahavoog, €	5 205,9	8 332,6	13 256,3	17 554,2

4.4 Sageduse reguleerimine

Stsenaariumi eesmärgiks on suurendada majanduslikku tasuvust, lisades täiendavalt sageduse reguleerimisteenuse eelnevatele stsenaariumitele. Eelnevate stsenaariumite alusel koostati lisaks kolm stsenaariumit:

- Stsenaarium S3.1 puhas arbitraaž (S2.1) kombineeritult sageduse reguleerimisteenusega,
- Stsenaarium S3.2 taastuenergia lokaalse tarbimise suurendamine (S1) kombineeritult sageduse reguleerimisteenusega,
- Stsenaarium S3.3 sageduse reguleerimisteenus kombineeritult lokaalse tarbimise suurendamisega (S1) ja lokaalse tarbimise fookusega arbitraažiga (S2.3),

Stsenaariumites keskenduti üles reguleerimisele ning võimalusel pakuti ka alla reguleerimisteenust. Loodud stsenaariumitele seati täiendavad tingimused reguleerimisteenuse pakkumiseks:

- sagedus reguleerimisteenus on loodud stsenaariumis lisa teenusena, seega sagedus reguleerimisteenus ei tohi segada põhi teenuseid,
- reguleerimist saab teostada kui vaadeldaval tunnil turult seda teenust osteti, ning akusalvesti on täis üks tund varem ja 2 tundi hiljem (jälgib põhiteenuse laetustaset),

- peale üles reguleerimisteenuse osutamist laetakse akusalvesti järgneval (või üle järgneval tunnil kui järgneva tunni energia kogus ületab laadimisvõimsust) tunnil täis, ning võimalusel müüakse turule alla reguleerimisteenust,
- kui kõik eelnevad tingimused on täidetud pakutakse ühe tunni jooksul reguleerimisturule 200 kW võimsust, 15 minutiks.

4.4.1 Tulemused

Sageduse reguleerimisteenuse lisamisel suurenes aku laadimistsüklite arv võrreldes stsenaariumiga millega see kombineeriti vastavalt S3.1 puhul 47, S3.2 puhul 21 ja S3.3 puhul 40 tsükli võrra. Kokku osaleti reguleerimisteenuse üles või alla pakkumisel stsenaariumi S3.1 puhul 910, stsenaariumi S3.2 puhul 419 korral ning stsenaariumi S3.3 puhul 793 korral. Järgnev tabel (Tabel 4.8.) annab ülevaate sageduse reguleerimisteenuse pakkumise tulemustest.

Tabel 4.8 Sageduse reguleerimisteenuse pakkumise tulemused

Stsenaarium	aFFR Up, korda	aFFR Down, korda	Teenuse tulu, €	Akusalvesti laadimistsüklite arv, tk
S3.1	531	379	6 444,1	431
S3.2	248	171	3 033,6	257
S3.3	468	325	5 567,3	405

Elektrienergia mahtude võrdluses (Tabel 4.9) kasvasid stsenaariumi S3.1 tulemusel ostetud ja müüdud elektrienergia mahud, stsenaariumite S3.2 ja S3.3 puhul ostetud ja müüd elektrienergia mahud vähenesid. Kõikide sageduse reguleerimisteenuse stsenaariumite kohapeal tarbitud elektrienergia osakaal suurenes võrdluses nii referents stsenaariumiga kui ka stsenaariumiga millega sageduse reguleerimisteenus kombineeriti.

Tabel 4.9. Referents stsenaariumi ja S3 alamstsenaariumite võrdlus

Stsenaarium	Võrgust ostetud elektrienergia, MWh	Võrku müüdud elektrienergia, MWh	Kohapeal tarbitud elektrienergia, MWh
S0	545,36	587,48	308,33
S3.1	640,38 (17,5%)	675,10 (14,9%)	369,22 (19,8%)
S3.2	460,49 (-15,6%)	496,08 (-15,6%)	397,98 (29,1%)
S3.3	479,76 (-12,0%)	512,95 (-12,7%)	450,63 (46,2%)

Järgnev tabel (Tabel 4.10.) annab ülevaate sageduse reguleerimisteenuse stsenaariumite rahavoogudest. Sageduse reguleerimisteenuse tasu eraldi tulu reana välja ei ole toodud vaid see on arvestatud juurde tunnipõhistele väärtustele. Tabelist on näha, et võrgutasud võrreldes referents stsenaariumiga kasvasid märgatavalt, ning see vähendab sageduse reguleerimisteenusest tekkivat tulu.

Tabel 4.10. Referents stsenaariumi ja S3 alamstsenaariumite rahavood

Tulud, €	S0	S3.1	S3.2	S3.3
Elektrienergia müük	44 023,1	55 881,5	36 204,2	38 195,9
Kohapeal tarbitud elektrienergia	32 147,5	47 056,3	44 006,1	56 564,7
Kulud, €				
Elektrienergia ost	62 625,7	63 470,1	52 741,4	48 199,5
Võrgutasud	5 018,3	9 298,7	6 098,1	7 379,8
Hoolduskulud	3 320,6	4 760,6	4 760,6	4 760,6
Akusalvesti amortisatsioon	0	13 809,4	8 234,3	12 976,2
Rahavoog, €	5 205,9	11 599,2	8 376,0	21 444,5

4.4.2 Stsenaariumite tulemuste kokkuvõte

Järgnevas tabelis (Tabel 4.11) on välja toodud kõigi kolme stsenaariumi kõige suuremate rahavoogudega alamstsenaariumid:

- S0 – referents stsenaarium, akusalvesti ei ole töös,
- S1 – lokaalselt tarbitud taastuenergia suurendamine,
- S2.3 – perioodiline (1.01-28.02 – 1.10-31.12) arbitraaž lokaalse tarbimise fookusega ja lokaalselt tarbitud taastuenergia suurendamine,
- S3.3 – perioodiline (1.01-28.02 – 1.10-31.12) arbitraaž lokaalse tarbimise fookusega, lokaalselt tarbitud taastuenergia suurendamine ning sageduse reguleerimisteenuse pakkumine.

Tabel 4.11 Suurimate rahavoogudega stsenaariumid ja referents stsenaarium

Näitajad	S0	S1	S2.3	S3.3
Tulud kokku, €	76 170,5	77 729,8	88 144,4	94 760,6
Kulud kokku, €	70 964,7	69 964,7	70 590,2	73 316,1
Rahavoog, €	5 205,9	7 752,2	17 554,2	21 444,5
Aastane tsüklite arv, tk	-	226	347	405
Rahavoog, €/tsükkel	-	34,3	50,59	52,95
Prognoositud eluiga, a	-	17,7	11,5	9,9

Stsenaariumil S1 on kolmest välja toodud stsenaariumist kõige pikem prognoositud eluiga. Saadud tulemus ei olnud ootuspärane, stsenaariumi poolt tekitatud täiendav rahavoog on kõigest 2 546 € suurem kui seda on referents stsenaariumis. Samas 17 aastat on Li-ion akusalvesti tehnilise eluea ülemises otsas (10 – 20 a) [37], ehk akuelemendid ei pruugi nii kaua realselt vastu pidada ning akusalvesti ressurss jääb osaliselt kasutamata.

Stsenaariumi S2.3 puhul on näha, kui suurt rolli arbitraaži stsenaariumites mängib see, kuidas ostetud elektrienergia ära kasutatakse. Stsenaarium teenis akusalvesti 121 laadimistsükli arvelt 9 802 € täiendavat kasumit võrreldes stsenaariumiga S1 – ehk lokaalse fookusega arbitraaži ühe tsükli väärtuseks kujunes 81 €.

Stsenaariumi S3.3 puhul osales akusalvesti sageduse reguleerimisturul 793 korral, sageduse reguleerimisteenuse pakkumise tuluks kujunes 5 567 €. Võrreldes stsenaariumiga S2.3 tootis sageduse reguleerimisteenuse lisamine täiendava 58 laadimistsükli arvelt 3 890,3 € täiendavat kasumit – sageduse reguleerimisteenuse ühe tsükli väärtuseks kujunes 67,1 €

Saadud tulemuste põhjal võib väita, et eraldiseisvalt avaldab kasumile kõige suuremat mõju lokaalse tarbimise fookusega arbitraaž.

Tulenevalt sageduse reguleerimisteenusele seatud tingimustest ei ole saadud tulemus võibolla kõige optimaalsem. Üks sageduse reguleerimisteenusele rakendatud tingimustest, et kui stsenaariumi seatud tingimused on täidetud osaleb akusalvesti alati reguleerimisturul ning teenuse ostja maksab turuhinda, ei vasta reaalses elus turutingimustele.

Järgmises peatükis koostatakse stsenaariumite eelpool mainitud kolme stsenaariumi põhjal tasuvusanalüüs, mille põhjal saab teha tasuvuse suhtes põhjalikumad järeldused.

5. TASUVUSANALÜÜS

Tasuvusanalüüs teostakse alapeatükis (4.4.2) välja toodud kolme alamstsenaariumi põhjal. Koondtabelid stsenaariumite rahavoogude ja kuupõhiste võrgutasude kohta on välja toodud lisades (Lisa 7, Lisa 8). Tasuvusanalüüsi koostati kasutades tabelarvutusprogrammi, malliks kasutati Konkurentsiameti poolt koostatud tasuvusanalüüsi [91].

5.1 Projekti tasuvusarvutuste sisendandmed

Investeeringukulude ja akusalvesti eluea kohta on antud ülevaade alapeatükis (3.5), aastane kulutatud laadimistsüklite arv tuleneb iga stsenaariumi arvutatud tsüklite väärtusest. Rahavoogude ajaldamiseks on võetud diskontomääraks 5% ning arvestatakse, et igal järgneval aastal kasvavad kulude ja tulude väärtused lineaarselt 2% (inflatsioon) võrreldes eelneva aastaga (va akusalvesti amortisatsioon). Tasuvusanalüüsis arvestatakse, et projekti eluiga on võrdeline akusalvesti elueaga, ehk täiendavaid investeeringuid akuelementide väljavahetamise näol ei tehta peale eluea täitumist. Järgnevas tabelis (Tabel 5.1.) on välja toodud tasuvusanalüüside sisendandmed.

Tabel 5.1. Stsenaariumi tasuvusanalüüsi sisendandmed

Sisend	Ühik	Väärtus
Investeeringukulud kokku	€	176 160
Akusalvesti eluiga tsüklites	tk	4000
Laadimistsükleid aastas	tk	Sõltub stsenaariumist
Diskontomäär	%	5
Inflatsioonimäär	%	2

5.2 Tasuvuse hindamise meetodid

Artikli [92] autor on andud ülevaate investeeringu tasuvuse hindamise meetoditest, käesolevas töös kasutatakse investeeringu tasuvuse hindamiseks lihtsa tasuvusaja meetodit (SPBP), puhasnüüdisväärtuse (NPV) meetodit, sisemine kasuminorm meetodit (IRR), ning tasuvusnäitaja meetodit (PI).

Lihtsa tasuvusaja (SPBP) meetodi korral on tasuvusajaks periood mille jooksul investeeringu algne investeering tasutakse investeeringust saadavate tuludega. Meetod ei arvesta raha väärtuse muutust ajas. Lihtne tasuvusaeg on arvutatav järgneva valemiga (5.1).

$$-P + \sum_{k=1}^T F_k = 0 \quad (5.1)$$

kus P – algne investeering,

F_k – tulevased rahavood,

T – tasuvusaeg, kui alginvesteering on tasutud tuludega.

Puhasnüüdiväärtus (NPV) võrdub tulevaste rahavoogude praegusesse hetke ajaldatud väärtuse ja algse investeeringu väärtuse vahega. Projekt on tasuv kui NPV on suurem nullist. NPV arvutatakse kasutades järgnevat valemit (5.2).

$$NPV = -P + \sum_{k=1}^n F_k \cdot \frac{1}{(1+i)^k} \quad (5.2)$$

kus n – aastate arv,

i – diskontomäär.

Sisemine kasuminorm (IRR) on diskontomäär mille puhul on projekti esialgne investeeringu maksumus võrdne projekti elueal saadavate tulude summaarse diskonteeritud väärtusega – ehk projekt ei teeni kasumit ega tooda kahjumit. Projekt on tasuv kui IRR on suurem diskontomäärast. Sisemise kasuminormi saab arvutada järgneva valemiga (5.3).

$$-P + \sum_{k=1}^n F_k \cdot \frac{1}{(1+i)^k} = 0 \quad (5.3)$$

Tasuvuse näitaja (PI) näitab ajaldatud rahavoogude suhet võrreldes algse investeeringu maksumusega. Projekt on tasuv kui PI on suurem kui 1. Tasuvuse näitaja arvutamiseks saab kasutada järgnevat valemit (5.4).

$$PI = \frac{NPV + P}{P} \quad (5.4)$$

5.3 Tasuvuse hindamise tulemused

Tabelis (Tabel 5.2) on välja toodud tasuvuse hindamise meetodite tulemused. Stsenaariumite tasuvusanalüüsi arvutustabelid on leitavad lisades (Lisa 9-11). Lihtsa tasuvusaja järgi, mille puhul ei arvestata raha väärtuse muutust ajas, katavad kõikide stsenaariumite puhul saadavad tulud algse investeeringu oma prognoositud eluea jooksul. Samas on stsenaariumi S1 prognoositud eluiga Li-ion akuelementide ülemise otsa lähedal.

Ajaldatud tulemuste puhul, kasutades alapeatükis (5.1) väljatoodud sisendandmeid, osutus ainsaks tasuvaks stsenaariumiks stsenaarium S3.3. Stsenaarium S2.3 on oma näitajatega lähedal tasuvuse saavutamisele. Mõlemal juhul oleks tõenäoliselt mõistlik üritada stsenaariumi strateegiaid optimeerida, et suurendada kasumi potentsiaali.

Tabel 5.2. Tasuvuse hindamise meetodite tulemused diskontomäär 5%

Tasuvuse näitajad	S1	S2.3	S3.3
Lihtne tasuvusaeg (SPBP), aastat	17	9	8
Puhasnüüdisväärtus (NPV), €	-59 342,9	-738,7	10 291,3
Sisemine kasuminorm (IRR), %	0,6	4,9	6,1
Tasuvusnäitaja PI,	0,66	0,996	1,06

5.4 Järeldused

Tasuvusanalüüsi eelne autori poolne oletus, et mõlemad kombineeritud teenustega stsenaariumid, on tasuvad ei osutunud tõeseks. Teisalt sai tõestust, et akusalvestid selliste sisendandmete puhul, vajavad pakutavate teenuste kuhjamist tasuvuse parendamiseks.

Mõlema kombineeritud lahenduse puhul võiks üritada stsenaariume optimeerida – vaadata üle stsenaariumitele rakendatud piirangud teenuste pakkumisel. Samuti vajaks optimeerimist akusalvesti mudel – hetkel jälgib salvesti küll koormust, kuid arvesse ei võeta otseselt järgnevate tundide hindu.

Tasuvusehindamise tegi üpriski keeruliseks paljude arvutuslike või prognoos väärtuste olemasolu – nt elektrienergia tootmise ja tarbimise prognoosid, mille tegelikud väärtused võivad aastate lõikes oluliselt kõikuda. Prognoosväärtuste muutusega ei pruugi teostatud analüüs anda adekvaatseid väärtusi projekti tasuvuse kohta.

KOKKUVÕTE

Magistritöö põhineb Targa linna tippkeskuse poolt läbiviidava pilootprojekti „Energiavajaduste vähendamine mikrovõrkude ning energia salvestite abil“ pilootprojekti alusandmetel, mille käigus paigaldatakse Pakri Teadus- ja Tööstuspargi suletud jaotusvõrku 200 kW/ 400 kWh nimivõimusega akusalvesti. Lõputöö eesmärgiks oli hinnata töö käigus loodud suletud jaotusvõrgu mudeli alusel, milliste paindlikkusteenuste pakkumisel saab parandada salvesti tasuvust ning millist mõju avaldab pakutavate teenuste omavaheline kombineerimine tasuvusele.

Magistritöö on jaotatud viieks peatükiks, millest esimeses anti ülevaade tööga seonduvast teoreetilisest taustast - elektrienergia tarbimisest ja tootmisest, kliimaeesmärkidest, elektrivõrgu paindlikkusest, akusalvestitest ning nende poolt pakutavatest paindlikkusteenustest. Töös loodi stsenaariumid energia arbitraaži, taastuenergia lokaalse tarbimise suurendamise ning sageduse reguleerimisteenuse põhjal. Töö teises peatükis anti ülevaade Pakri Teadus- ja Tööstuspargi akusalvesti pilootalast ning pilootprojektiga seonduvatest alusandmetest, kolmandas peatükis kirjeldatakse DIGSILENT PowerFactorys loodud jaotusvõrgu mudelit – mille põhjal valiti seadmed, kuidas modelleeriti erinevad tarbimisprofiilid, kuidas toimib akusalvesti simuleerimis keskkonnas. Seejärel formuleeriti referents stsenaarium ja pakutavate teenuste stsenaariumid, millest anti põhjalik ülevaade neljandas peatükis. Töö viimases peatükis teostati stsenaariumite põhjal tasuvusanalüüs.

Lõputööd alustades oli autori poolne oletus, et energia arbitraaž on igal juhul tasuv, töös käsitletud stsenaariumite tulemuste põhjal leiti, et kõik paindlikkusteenused tekitavad positiivset rahavoogu, kuid ükski valitud paindlikkusteenustest eraldi seisvalt akusalvestit tasuvaks ei muutnud.

Samuti kinnitas eelnev, et tasuvuse tõstmiseks peab pakutavaid teenuseid omavahel kombineerima. Teenuste kombineerimine suurendab akusalvesti kasutust ja tekitab positiivset rahavoogu, kuid selle arvelt väheneb akusalvesti eluiga.

Rahavoogude suhtes kõige tulutoovamaks kombinatsiooniks osutus lokaalse tarbimise fookusega energia arbitraaž koos sagedus reguleerimisteenuse ja taastuenergia lokaalse suurendamise strateegiaga. Eraldi seisvalt genereeris suurima rahavoo lokaalse tarbimise fookusega energia arbitraaž – mida terve aastase perioodi jooksul ei simuleeritud. millele järgnes sageduse reguleerimisteenus. Autori jaoks tuli üllatusena, et lokaalse tarbimise suurendamine eraldiseisva teenusena kõige vähem kasumit teenis, samas on see põhjendatav akusalvesti vähese kasutatavusega.

Tasuvusanalüüsi käigus selgus, et kasutatud sisendparameetrite korral on ainult üks lõputöös käsitletud stsenaariumitest akusalvesti eluea jooksul ajaldatud tasuvusnäitajate poolest tasuv – eelpool mainitud kombineeritud stsenaarium lokaalse tarbimise fookusega energia arbitraaž koos sageduse reguleerimisteenuse ja taastuvenergia lokaalse tarbimise suurendamisega.

Käesoleva lõputöö tulemused näitavad, et paindlikkusteenuste kuhjamine tõstab oluliselt akusalvesti tasuvust. Lõputöö ülesandes püstitatud eesmärgid said täidetud – kuid autori arvates vajaks koostatud mudelid ja stsenaariumid täiustamist, et välja selgitada parim lahendus, mida oleks hiljem võimalik rakendada analoogse võrgu konfiguratsiooni puhul. Edasiste tegevustena peaks loodud mudelit täiustama, ning täiendavalt uurima milline mõju on valikust välja jäänud paindlikkusteenustel akusalvesti tasuvusele.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] "Paris Agreement." https://ec.europa.eu/clima/eu-action/international-action-climate-change/climate-negotiations/paris-agreement_en (kasutatud Apr. 08, 2022).
- [2] European Commission, "A European Green Deal." https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en (kasutatud Apr. 08, 2022).
- [3] "2030 climate & energy framework." https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework_et (kasutatud Apr. 08, 2022).
- [4] "2050 long-term strategy." https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_en (kasutatud Apr. 08, 2022).
- [5] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, "Riiklik energia- ja kliimakava aastani 2030," Dec. 2019. Kasutatud: Jan. 18, 2022. [Võrgumaterjal]. <https://www.mkm.ee/energeetika-ja-maavarad/energiamaajandus/energia-ja-kliimakava>
- [6] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, "Energiamaajanduse arengukava aastani 2030," Oct. 2017. Kasutatud: Dec. 14, 2021. [Võrgumaterjal]. <https://www.mkm.ee/energeetika-ja-maavarad/energiamaajandus/energiamaajanduse-arengukava>
- [7] J. Li, F. Liu, Z. Li, C. Shao, and X. Liu, "Grid-side flexibility of power systems in integrating large-scale renewable generations: A critical review on concepts, formulations and solution approaches," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 93, pp. 272–284, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2018.04.109.
- [8] "Energy Data Explorer - Our World in Data." https://ourworldindata.org/explorers/energy?tab=chart&time=2000..latest&facet=none&country=USA~GBR~CHN~OWID_WRL~IND~BRA~ZAF~RUS~EGY&Total+or+Breakdown=Total&Energy+or+Electricity=Electricity+only&Metric=Annual+demand (kasutatud Apr. 02, 2022).
- [9] Elering AS, "Elektrisüsteemi kokkuvõte juunis 2021, Elektrisüsteem 06 2021.xlsx," Jul. 2021. Kasutatud: Mar. 28, 2022. [Võrgumaterjal]. <https://elering.ee/elektrisusteemi-kokkuvote-juunis-2021>
- [10] Elering AS, "Võrku antud kütuseliigiti - Net production mix by fuel," Mar. 2022. Kasutatud: Apr. 01, 2022. [Võrgumaterjal]. <https://elering.ee/toodang-ja-prognoos>
- [11] Elering AS, "Taastuenergia - Renewable energy," Mar. 2022. Kasutatud: Apr. 01, 2022. [Võrgumaterjal]. <https://elering.ee/toodang-ja-prognoos>
- [12] Elektrilevi OÜ, "Taastuvelektri mikrotootjate buum jätkub ka sel aastal," Mar. 30, 2022. <https://www.elektrilevi.ee/et/uudised/avaleht/-/newsv2/2022/03/30/taastuvelektri-mikrotootjate-buum-jatkub-ka-sel-aastal> (kasutatud Apr. 08, 2022).
- [13] "Share of renewable energy in gross final energy consumption by sector." https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/sdg_07_40/default/table?lang=en (kasutatud Jan. 03, 2022).
- [14] "Renewable energy targets." https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-targets_en (kasutatud Apr. 26, 2022).
- [15] A. Akrami, M. Doostizadeh, and F. Aminifar, "Power system flexibility: an overview of emergence to evolution," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 7, no. 5, pp. 987–1007, Sep. 2019, doi: 10.1007/S40565-019-0527-4/FIGURES/5.
- [16] O. M. Babatunde, J. L. Munda, and Y. Hamam, "Power system flexibility: A review," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 101–106, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.EGYR.2019.11.048.

- [17] *Status of Power System Transformation 2018*. OECD, 2018. doi: 10.1787/9789264302006-en.
- [18] "ACER-CEER White Paper on Facilitating Flexibility Document title: European Energy Regulators'," 2017.
- [19] I. Renewable Energy Agency, "Power system flexibility for the energy transition, Part 1: Overview for policy makers," 2018, Accessed: Mar. 29, 2022. [Võrgumaterjal]. www.irena.org
- [20] V. Oree, S. Z. Sayed Hassen, and P. J. Fleming, "Generation expansion planning optimisation with renewable energy integration: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 790–803, Mar. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2016.11.120.
- [21] "Status of Power System Transformation 2018 : Advanced Power Plant Flexibility | OECD iLibrary." https://www.oecd-ilibrary.org/energy/status-of-power-system-transformation-2018_9789264302006-en (kasutatud Mar. 29, 2022).
- [22] J. Aghaei and M. I. Alizadeh, "Demand response in smart electricity grids equipped with renewable energy sources: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 18, pp. 64–72, Feb. 2013, doi: 10.1016/J.RSER.2012.09.019.
- [23] A. Rosin, I. Drovtar, S. Link, H. Hõimoja, H. Mödler, and T. Möller, "Tarbimise juhtimine - suurtarbijate koormusgraafikute salvestamine ning analüüs tarbimise juhtimise rakendamise võimaluste tuvastamiseks," Tallinn, 2014. Kasutatud: Apr. 01, 2022. [Võrgumaterjal]. https://elering.ee/sites/default/files/attachments/Tarbimise_juhtimine_1.pdf
- [24] Konkurentsiamet, "Tarbimise juhtimine." <https://www.konkurentsiamet.ee/et/uudised/tarbimise-juhtimine-aitab-elektrituru-hindu-alla-tuua-kuid-hetkel-suuresti-kasutamata> (kasutatud Mar. 29, 2022).
- [25] R. Zhang, X. Cheng, and L. Yang, "Flexible Energy Management Protocol for Cooperative EV-to-EV Charging," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 172–184, Jan. 2019, doi: 10.1109/TITS.2018.2807184.
- [26] J. Li, F. Liu, Z. Li, C. Shao, and X. Liu, "Grid-side Flexibility of Power Systems in Integrating Large-scale Renewable Generations: A Critical Review on Concepts, Formulations and Solution Approaches".
- [27] Levin and Todd, "Survey of U.S. Ancillary Services Markets Energy Systems Division", Accessed: Mar. 29, 2022. [Võrgumaterjal]. www.anl.gov.
- [28] M. L. Nicolson, M. J. Fell, and G. M. Huebner, "Consumer demand for time of use electricity tariffs: A systematized review of the empirical evidence," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 97, pp. 276–289, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2018.08.040.
- [29] A. Esmat, J. Usaola, and M. Á. Moreno, "A Decentralized Local Flexibility Market Considering the Uncertainty of Demand," *Energies 2018, Vol. 11, Page 2078*, vol. 11, no. 8, p. 2078, Aug. 2018, doi: 10.3390/EN11082078.
- [30] "2030 Climate & Energy Framework." https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework_en (kasutatud Mar. 29, 2022).
- [31] K. M. Tan, T. S. Babu, V. K. Ramachandaramurthy, P. Kasinathan, S. G. Solanki, and S. K. Raveendran, "Empowering smart grid: A comprehensive review of energy storage technology and application with renewable energy integration," *Journal of Energy Storage*, vol. 39, p. 102591, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.EST.2021.102591.
- [32] S. Koohi-Fayegh and M. A. Rosen, "A review of energy storage types, applications and recent developments," *Journal of Energy Storage*, vol. 27, p. 101047, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.EST.2019.101047.
- [33] K. Mongird *et al.*, "Energy Storage Technology and Cost Characterization Report," Jul. 2019, doi: 10.2172/1573487.
- [34] Epo, "Innovation in batteries and electricity storage A global analysis based on patent data |," 2020.

- [35] "Energy Storage – Analysis - IEA." <https://www.iea.org/reports/energy-storage> (kasutatud Mar. 29, 2022).
- [36] BloombergNEF, "Battery Pack Prices Fall to an Average of \$132/kWh, But Rising Commodity Prices Start to Bite," Nov. 30, 2021. https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-to-an-average-of-132-kwh-but-rising-commodity-prices-start-to-bite/#_ftn1 (kasutatud May 10, 2022).
- [37] Danish Energy Agency and Energinet, "Technology Data for Energy Storage." Accessed: Mar. 29, 2022. [Võrgumaterjal]. <https://ens.dk/en/our-services/projections-and-models/technology-data/technology-data-energy-storage?fbclid=IwAR3SM0dJUPRmfjBhKnWVGIIYq2mkhs5XLWWK7QsFbhqajYssZ1WomWNqjh0>
- [38] I. Renewable Energy Agency, "ELECTRICITY STORAGE AND RENEWABLES: COSTS AND MARKETS TO 2030," 2017, Accessed: May 17, 2022. [Võrgumaterjal]. www.irena.org
- [39] "Elektrituruseadus–Riigi Teataja." <https://www.riigiteataja.ee/akt/115032022009> (kasutatud Mar. 29, 2022).
- [40] "Võrgueeskiri–Riigi Teataja." <https://www.riigiteataja.ee/akt/121022019003> (kasutatud Feb. 24, 2022).
- [41] "Technical regulation 3.3.1 for battery plants," Jun. 2017, Accessed: May 15, 2022. [Võrgumaterjal]. <https://en.energinet.dk/Electricity/Rules-and-Regulations/Regulations-for-grid-connection?fbclid=IwAR3kJKMOOnUVjZnH5F9w8vmUxhIUy5kEMWE2mN1OKxcnQGe0len3JiJrW-JE>
- [42] L. Maeyaert, L. Vandeveld, and T. Döring, "Battery Storage for Ancillary Services in Smart Distribution Grids," *Journal of Energy Storage*, vol. 30, p. 101524, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.EST.2020.101524.
- [43] H. Shafique, L. B. Tjernberg, D.-E. Archer, and S. Wingstedt, "Energy Management System (EMS) of Battery Energy Storage System (BESS) Providing Ancillary Services," *2021 IEEE Madrid PowerTech*, 2021, doi: 10.1109/PowerTech46648.2021.9494781.
- [44] L. Maeyaert, L. Vandeveld, and T. Döring, "Battery Storage for Ancillary Services in Smart Distribution Grids," *Journal of Energy Storage*, vol. 30, p. 101524, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.EST.2020.101524.
- [45] R. C. K Y Mou N, G. Fitzgerald, J. Mandel, J. Morris, and H. Touati, "THE ECONOMICS OF BATTERY ENERGY STORAGE HOW MULTI-USE, CUSTOMER-SITED BATTERIES DELIVER THE MOST SERVICES AND VALUE TO CUSTOMERS AND THE GRID THE ECONOMICS OF BATTERY ENERGY STORAGE", Accessed: Mar. 29, 2022. [Võrgumaterjal]. <https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/03/RMI-TheEconomicsOfBatteryEnergyStorage-FullReport-FINAL.pdf>
- [46] P. V. Brogan, R. J. Best, D. J. Morrow, K. McKinley, and M. L. Kubik, "Effect of BESS Response on Frequency and RoCoF During Underfrequency Transients," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 1, pp. 575–583, Jan. 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2018.2862147.
- [47] Elering AS, AS "Augstsprieguma tīkls," and LITGRID AB, "Baltic Load-Frequency Control block concept document." Sep. 30, 2020. Kasutatud: Dec. 28, 2021. [Võrgumaterjal]. https://elering.ee/sites/default/files/2021-01/Baltic%20Load-Frequency%20Control%20concept%20document_0.pdf
- [48] I. Palu, M. Leinakse, Ü. Treufeldt, and M. Meldorf, "Reaktiivvõimsuse kompenseerimine Eesti elektrisüsteemis," 2017.
- [49] T. Tewari, A. Mohapatra, and S. Anand, "Coordinated control of OLTC and energy storage for voltage regulation in distribution network with high PV penetration," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 12, no. 1, pp. 262–272, Jan. 2021, doi: 10.1109/TSTE.2020.2991017.
- [50] R. Murugan and R. Ramasamy, "Understanding the power transformer component failures for health index-based maintenance planning in electric utilities,"

- Engineering Failure Analysis*, vol. 96, pp. 274–288, Feb. 2019, doi: 10.1016/J.ENGFAILANAL.2018.10.011.
- [51] W. Syakirah, W. Abdullah, M. Osman, M. Zainal, A. A. Kadir, and R. Verayiah, "Battery energy storage system (BESS) design for peak demand reduction, energy arbitrage and grid ancillary services," *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, vol. 11, no. 1, pp. 398–408, 2020, doi: 10.11591/ijpeds.v11.i1.pp398-408.
- [52] "Süsteemiteenused | Elering." <https://elering.ee/susteemiteenused> (kasutatud Mar. 29, 2022).
- [53] L. Maeyaert, L. Vandeveld, and T. Döring, "Battery Storage for Ancillary Services in Smart Distribution Grids," *Journal of Energy Storage*, vol. 30, p. 101524, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.EST.2020.101524.
- [54] H. C. Hesse, M. Schimpe, D. Kucevic, and A. Jossen, "Lithium-Ion Battery Storage for the Grid—A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids," *Energies 2017, Vol. 10, Page 2107*, vol. 10, no. 12, p. 2107, Dec. 2017, doi: 10.3390/EN10122107.
- [55] T. Bowen, I. Chernyakhovskiy, and P. Denholm, "Grid-Scale Battery Storage: Frequently Asked Questions", Accessed: Mar. 29, 2022. [Võrgumaterjal]. www.greeningthegrid.org
- [56] J. Li, H. You, J. Qi, M. Kong, S. Zhang, and H. Zhang, "Stratified optimization strategy used for restoration with photovoltaic-battery energy storage systems as black-start resources," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 127339–127352, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2937833.
- [57] A. di Giorgio, A. Giuseppi, F. Liberati, and A. Pietrabissa, "Controlled electricity distribution network black start with energy storage system support," *2017 25th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2017*, pp. 781–786, Jul. 2017, doi: 10.1109/MED.2017.7984213.
- [58] M. B. Roberts, A. Bruce, and I. MacGill, "Impact of shared battery energy storage systems on photovoltaic self-consumption and electricity bills in apartment buildings," *Applied Energy*, vol. 245, pp. 78–95, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.04.001.
- [59] A. Kadri and K. Raahemifar, "Optimal Sizing and Scheduling of Battery Storage System Incorporated with PV for Energy Arbitrage in Three Different Electricity Markets," in *2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, May 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/CCECE.2019.8861776.
- [60] M. B. Mustafa, P. Keatley, Y. Huang, O. Agbonaye, O. O. Ademulegun, and N. Hewitt, "Evaluation of a battery energy storage system in hospitals for arbitrage and ancillary services," *Journal of Energy Storage*, vol. 43, p. 103183, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.EST.2021.103183.
- [61] E. Pusceddu, B. Zakeri, and G. Castagneto Gissey, "Synergies between energy arbitrage and fast frequency response for battery energy storage systems," *Applied Energy*, vol. 283, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.APENERGY.2020.116274.
- [62] K. H. Chua, Y. S. Lim, and S. Morris, "Energy storage system for peak shaving," *International Journal of Energy Sector Management*, vol. 10, no. 1, pp. 3–18, Apr. 2016, doi: 10.1108/IJESM-01-2015-0003/FULL/PDF.
- [63] G. He, J. Michalek, S. Kar, Q. Chen, D. Zhang, and J. F. Whitacre, "Utility-Scale Portable Energy Storage Systems," *Joule*, vol. 5, no. 2, pp. 379–392, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.JOULE.2020.12.005.
- [64] R. T. Elliott *et al.*, "Sharing Energy Storage Between Transmission and Distribution," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 1, pp. 152–162, Jan. 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2018.2866420.
- [65] A. Development Bank, "Handbook on Battery Energy Storage System," 2018, doi: 10.22617/TCS189791-2.
- [66] J. R. Martinez-Bolanos, M. E. M. Udaeta, A. L. V. Gimenes, and V. O. da Silva, "Economic feasibility of battery energy storage systems for replacing peak power plants for commercial consumers under energy time of use tariffs," *Journal of Energy Storage*, vol. 29, p. 101373, Jun. 2020, doi: 10.1016/J.EST.2020.101373.

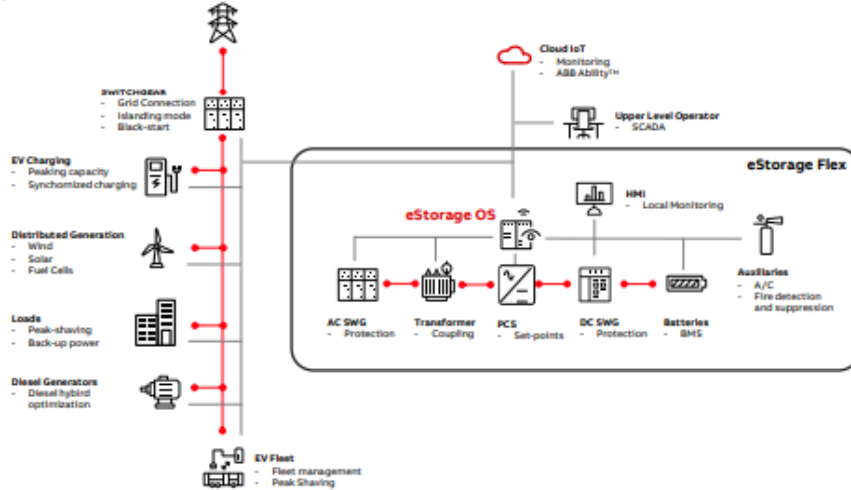
- [67] M. L. Nicolson, M. J. Fell, and G. M. Huebner, "Consumer demand for time of use electricity tariffs: A systematized review of the empirical evidence," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 97, pp. 276–289, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2018.08.040.
- [68] G. Castagneto Gisse, D. Subkhankulova, P. E. Dodds, and M. Barrett, "Value of energy storage aggregation to the electricity system," *Energy Policy*, vol. 128, pp. 685–696, May 2019, doi: 10.1016/J.ENPOL.2019.01.037.
- [69] B. Zakeri, G. C. Gisse, P. E. Dodds, and D. Subkhankulova, "Centralized vs. distributed energy storage – Benefits for residential users," *Energy*, vol. 236, p. 121443, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.121443.
- [70] J. Arteaga, H. Zareipour, and N. Amjadi, "Energy Storage as a Service: Optimal Pricing for Transmission Congestion Relief," *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, vol. 7, pp. 514–523, 2020, doi: 10.1109/OAJPE.2020.3031526.
- [71] M. Szott, S. Wermiński, M. Jarnut, J. Kaniewski, and G. Benysek, "Battery Energy Storage System for Emergency Supply and Improved Reliability of Power Networks," *Energies 2021, Vol. 14, Page 720*, vol. 14, no. 3, p. 720, Jan. 2021, doi: 10.3390/EN14030720.
- [72] B. J. Kalkbrenner, "Residential vs. community battery storage systems – Consumer preferences in Germany," *Energy Policy*, vol. 129, pp. 1355–1363, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.ENPOL.2019.03.041.
- [73] A. Kafetzis, C. Ziogou, K. D. Panopoulos, S. Papadopoulou, P. Seferlis, and S. Voutetakis, "Energy management strategies based on hybrid automata for islanded microgrids with renewable sources, batteries and hydrogen," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 134, p. 110118, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.RSER.2020.110118.
- [74] H. C. Hesse, M. Schimpe, D. Kucevic, and A. Jossen, "Lithium-Ion Battery Storage for the Grid—A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids," *Energies 2017, Vol. 10, Page 2107*, vol. 10, no. 12, p. 2107, Dec. 2017, doi: 10.3390/EN10122107.
- [75] C. K. Das *et al.*, "Optimal allocation of distributed energy storage systems to improve performance and power quality of distribution networks," *Applied Energy*, vol. 252, p. 113468, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113468.
- [76] M. Katsanevakis, R. A. Stewart, and L. Junwei, "A novel voltage stability and quality index demonstrated on a low voltage distribution network with multifunctional energy storage systems," *ELECTRIC POWER SYSTEMS RESEARCH*, vol. 171, pp. 264–282, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.EPSR.2019.01.043.
- [77] M. Zeraati, M. E. Hamedani Golshan, and J. M. Guerrero, "Distributed Control of Battery Energy Storage Systems for Voltage Regulation in Distribution Networks with High PV Penetration," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3582–3593, Jul. 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2636217.
- [78] "Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiiv (EL) 2019/ 944", Accessed: Jan. 15, 2022. [Võrgumaterjal]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/?uri=CELEX:32019L0944>
- [79] "Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiiv 2009/72/EÜ", Accessed: Jan. 15, 2022. [Võrgumaterjal]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex%3A32009L0072>
- [80] "X-GIS(2) - Maainfo." https://xgis.maaamet.ee/maps/XGis?app_id=UU82A&user_id=at&LANG=1&WIDTH=1387&HEIGHT=902&zlevel=9,506273.4446875,6578120.8521871&setlegend=UUKAT1_82=1 (kasutatud Mar. 29, 2022).
- [81] "DIGSILENT Website." <https://www.digsilent.de/en/company.html> (kasutatud Apr. 10, 2022).
- [82] "Prysmian Group Product Catalog." <https://baltics-catalogue.prysmiangroup.com/s/#/family/AXPK> (kasutatud Jan. 03, 2022).
- [83] "Lapp Group Product Catalogue." <https://products.lappgroup.com/online-catalogue/power-and-control-cables/harsh-conditions/rubber-cables/nsgafoeu-183-kv.html> (kasutatud Jan. 03, 2022).

- [84] "PCS100 ESS - Power Converters and Inverters | ABB." <https://new.abb.com/power-converters-inverters/power-converters-and-inverters/pcs100-ess> (kasutatud Feb. 11, 2022).
- [85] "Elering Dashboard API docs." <https://dashboard.elering.ee/assets/api-doc.html> (kasutatud Feb. 02, 2022).
- [86] "Elektrilevi OÜ 7-3/2021-067." Accessed: Mar. 10, 2022. [Võrgumaterjal]. <https://www.konkurentsiamet.ee/et/elektri-vorgutasud>
- [87] "Automatic Frequency Restoration Reserve (aFRR), realised hourly transactions - Fingrid." <https://data.fingrid.fi/en/dataset/?q=afrr> (kasutatud Apr. 13, 2022).
- [88] Konkurentsiamet, "Ülevaade päikesejaamade tasuvusanalüüsist," Feb. 2021. Kasutatud: Mar. 14, 2022. [Võrgumaterjal]. <https://www.konkurentsiamet.ee/et/uudised/konkurentsiamet-soovitab-taastuenergia-toetused-jark-jargult-kaotada>
- [89] K. Mongird *et al.*, "An Evaluation of Energy Storage Cost and Performance Characteristics," *Energies* 2020, Vol. 13, Page 3307, vol. 13, no. 13, p. 3307, Jun. 2020, doi: 10.3390/EN13133307.
- [90] M. Qadrdan, N. Jenkins, and J. Wu, "Smart Grid and Energy Storage," *McEvoy's Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*, pp. 915–928, Jan. 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-809921-6.00025-2.
- [91] Konkurentsiamet, "Päikesejaamade tasuvusarvutused," 2021. Kasutatud: May 14, 2022. [Võrgumaterjal]. https://www.konkurentsiamet.ee/sites/default/files/news-related-files/paikesejaamade_tasuvusarvutused.xlsx
- [92] R. Kuhi-Thalfeldt, "Hajaenergeetika investeringute hindamine - projekt," 2011.

LISAD

Lisa 1 ABB eStorage Flex 20 andmeleht

System Architecture

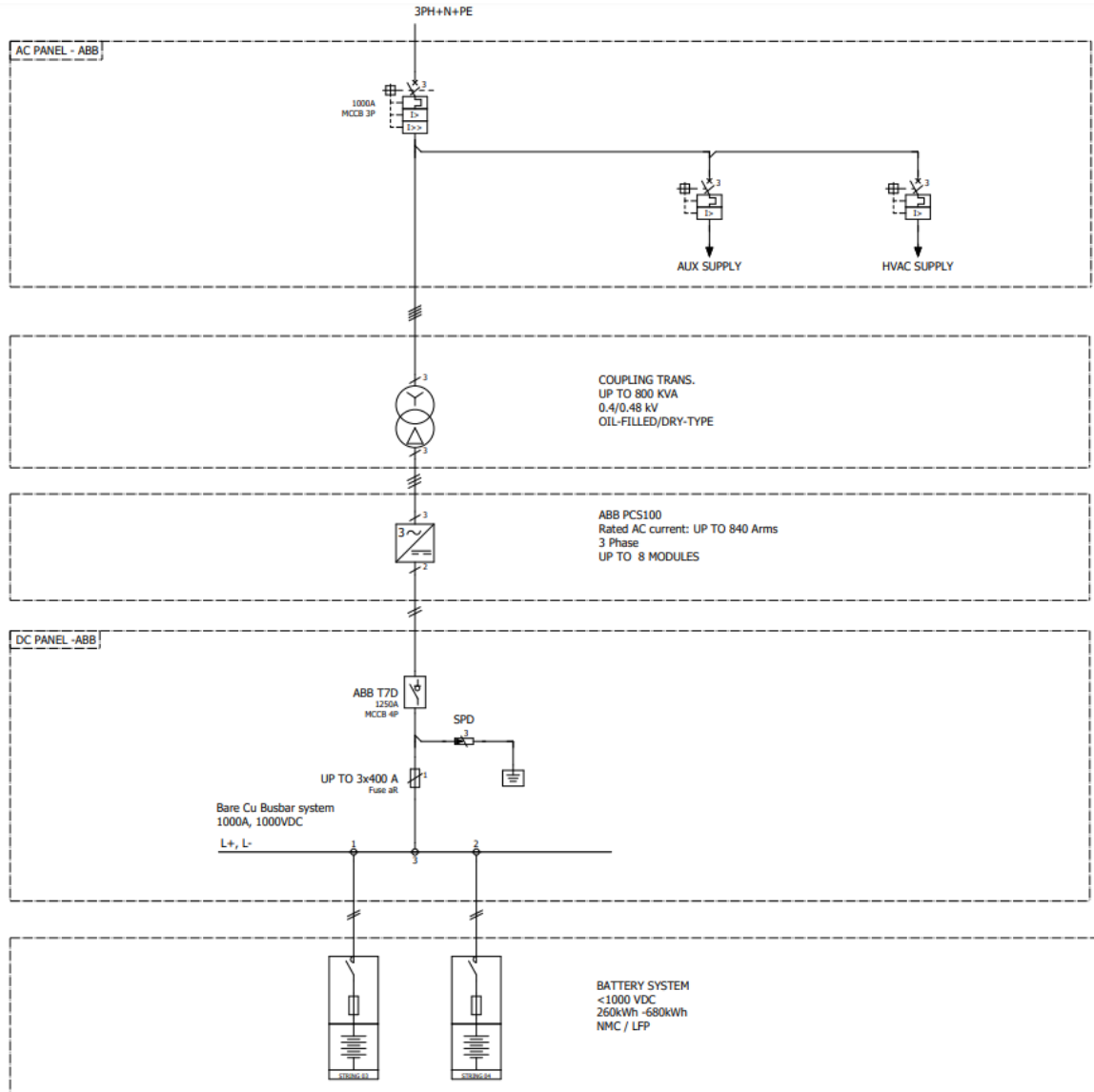


The eStorage OS is a fully integrated digital operating system that provides asset management, control, and protection; Embedded energy management functions and remote connectivity are available upon request.

Technical data

Description	eStorage Flex-20-260	eStorage Flex-20-360	eStorage Flex-20-450	eStorage Flex-20-540	eStorage Flex-20-680
Electrical specifications					
Maximum Output power (S) ¹	350kVA	430kVA	500kVA	600kVA	700kVA
Typical Output power (P) ^{1,2}	260kW	360kW	450kW	540kW	630kW
Installed Energy	260kWh	360kWh	450kWh	540kWh	680kWh
Max C-rate	<1C				
Nominal voltage	400Vac, 480Vac				
Frequency	50/60Hz				
Power factor range	4-quadrant, 0 to 1				
Connection method	3-phase				
Equipment					
Enclosure	ABB EcoFlex				
Inverter operations modes	VSI PQ, VSI Vf, CSI PQ, Islanding, Black-start				
Battery chemistry	NMC	NMC	NMC, LFP	NMC	NMC, LFP
Transformer type	Oil-filled, dry-type				
Environmental conditions					
Ambient temp. range (nom. ratings)	-20°C to +50°C				
Relative humidity	5% to 95% non-condensing				
IP degree transformer compartment	IP23D				
IP degree battery compartment	IP54				
General specifications					
Overall dimensions (LxWxH)	6000x2450x2700mm (ISO 20ft)				
Product compliance					
Power conversion system	IEC 62103, IEC 61000-6-2, UL1741, IEC62154				
Batteries	IEC 62619, UL1973, UN 38.3, UL9540A				
Transformer	IEC 60076				
Low-voltage distribution	IEC 61439				
User interface and communications options					
Fieldbus connectivity (predefined option)	Modbus, Ethernet for remote control and monitoring				
Local user interface (upgrade package)	ABB local control panel and embedded ABB Energy Management System				
Remote connectivity (upgrade package)	Advanced SCADA and cloud connection, IEC62351				

Lisa 2 ABB eStorage Flex 20 ühejooneskeem



Lisa 4 DiGSILENT akusalvesti QDSL mudeli kood

```
1 ///////////////////////////////////////////////////Initialisation
2 double Pmõõt;
3
4 SOC = SOCalg;
5 Pmõõt = 0.;
6 Ptoi = 0.;
7 Plae = 0.;
8
9 ! measured power operation area
10 Aolek = 0.;
11 if ((PmaxL <= PstartL).or.(-PstartT <= -PmaxT)) {
12     Aolek = 0; ! Error
13     // Warn('PmaxL must be > than PstartL and PmaxT > than PstartT');
14 }
15 else if (Pmõõt < PstartT) { ! kui mõõdetud on väiksem kui PstartT
16     Aolek = 3;
17 }
18 else if (Pmõõt > PstartL) { !kui mõõdetud on suurem kui PstartL
19     Aolek = 1;
20 }
21 else {
22     Aolek = 2;
23 }
24 ! energy operation area
25 iniSOCoob = 0; ! Inside bounds
26 if (SOCmin >= SOCmax) {
27     Asoc = 0; ! Error
28     Warn('SOCmin must be < than SOCmax.');
```

```
29 }
30 else if (SOC > SOCmax) {
31     Asoc = 3;
32     iniSOCoob = 1;
33 }
34 else if (SOC = SOCmax) {
35     Asoc = 3;
36 }
37 else if (SOC = SOCmin) {
38     Asoc = 1;
39 }
40 else if (SOC < SOCmin) {
41     Asoc = 1;
42     iniSOCoob = 1;
43 }
44 else {
45     Asoc = 2;
46 }
47 ///////////////////////////////////////////////////Load Flow Valemid
48 double Pgen,
49         Qgen,
50         redFac;
51 Pmõõt = Pliin*Osuund - Pset; ! negative=load
52 Ptoi = -Pmõõt;
53 if ((Aolek = 3).and.(Asoc >= 2).and.(Asoc > 0)) {
54     if (Pmõõt > 0.2) {
55         Ptoi = 0.2; }
56 }
57 Plae = Pmõõt;
58 if ((Aolek = 1).and.(Asoc <= 2).and.(Asoc > 0)) {
59     if (Pmõõt > 0.2) {
60         Plae = 0.2; }
61 }
62 redFac = 1.0;
63 if ((Aolek = 3).and.(Asoc >= 2).and.(Asoc > 0)) {
64     if (Pmõõt > -PmaxT) {
65         redFac = 1 - ((Pmõõt)/(-PstartT + PmaxT));
66     }
67     Pgen = Ptoi * redFac; ! discharge = GEN, feeding
68     Qgen = Qfeed * redFac; ! discharge = GEN, feeding
69 }
70 else if ((Aolek = 1).and.(Asoc <= 2).and.(Asoc > 0)) {
71     if (Pmõõt < PmaxL) {
72         redFac = 1 - ((PmaxL - Pmõõt)/(PmaxL - PstartL));
73     }
```

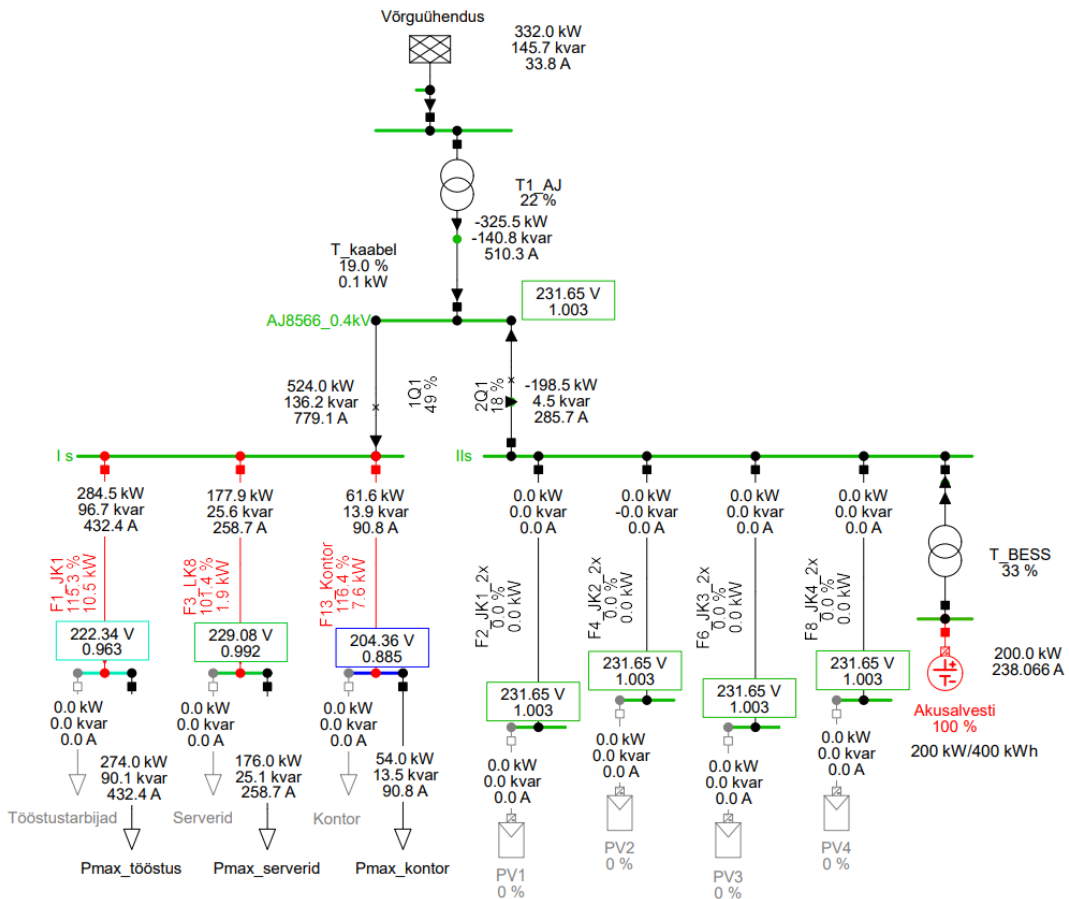
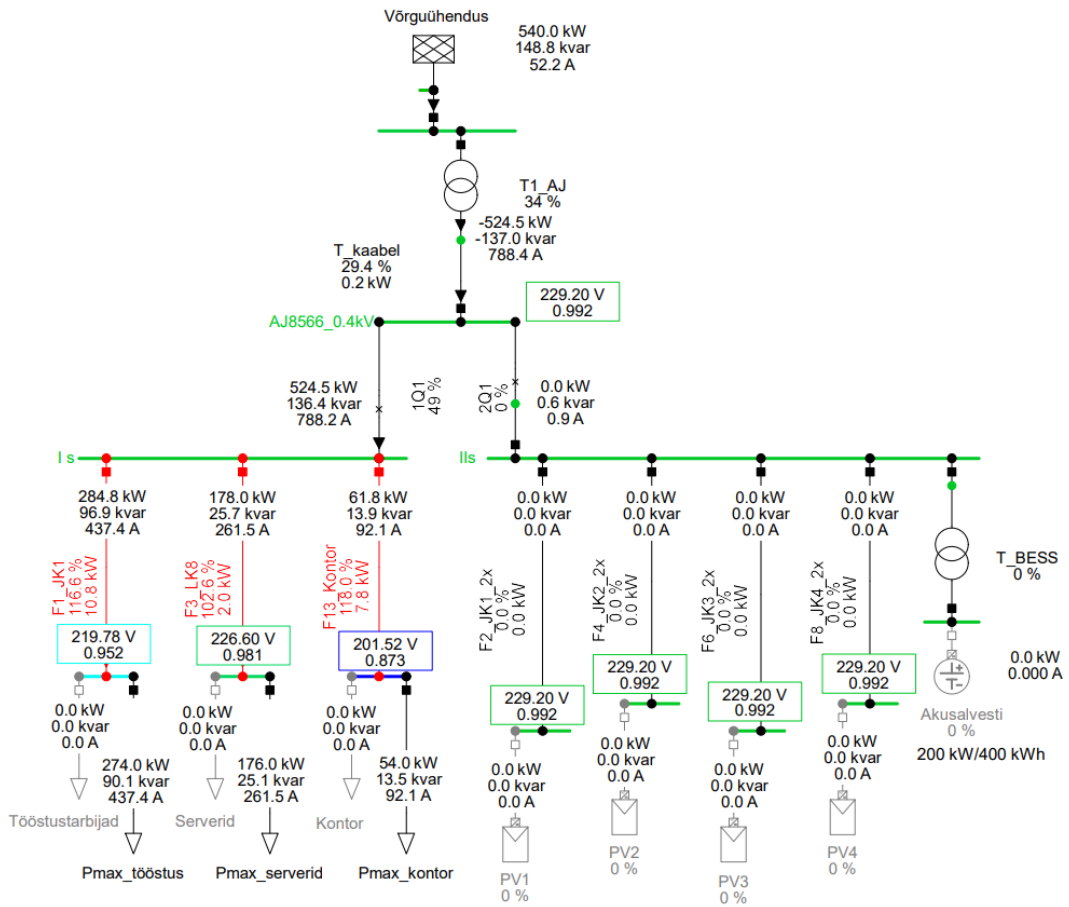


```

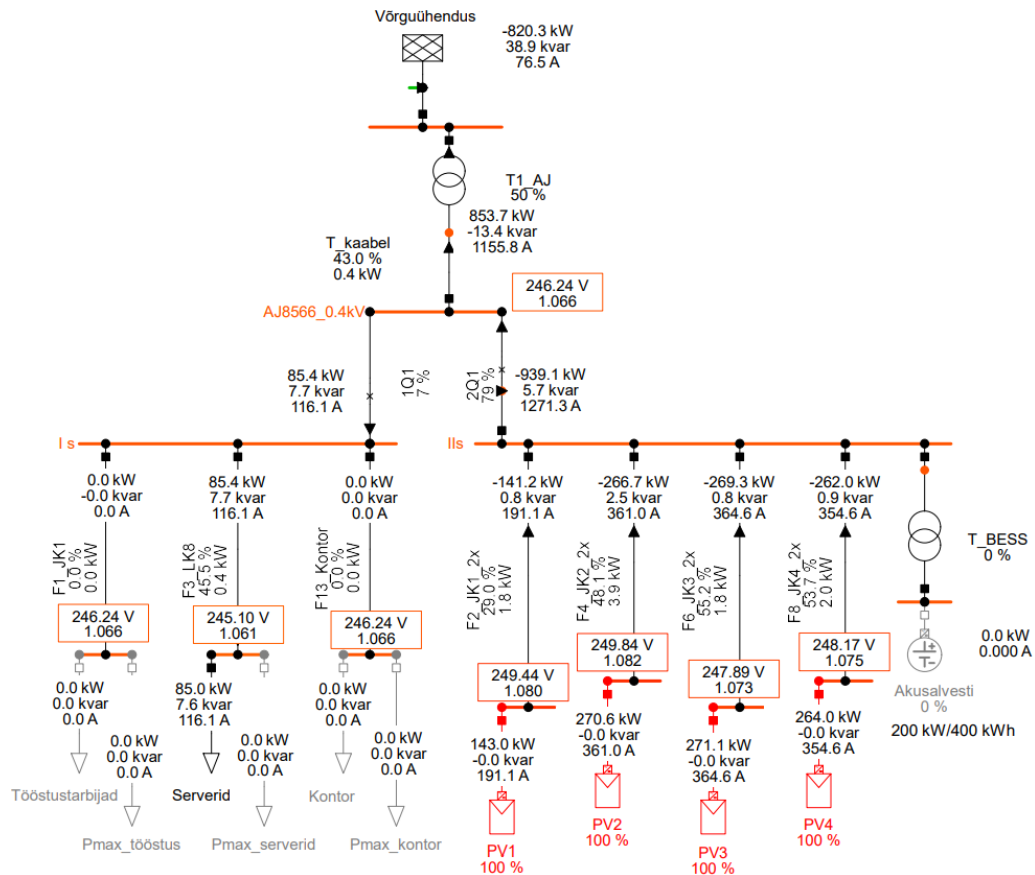
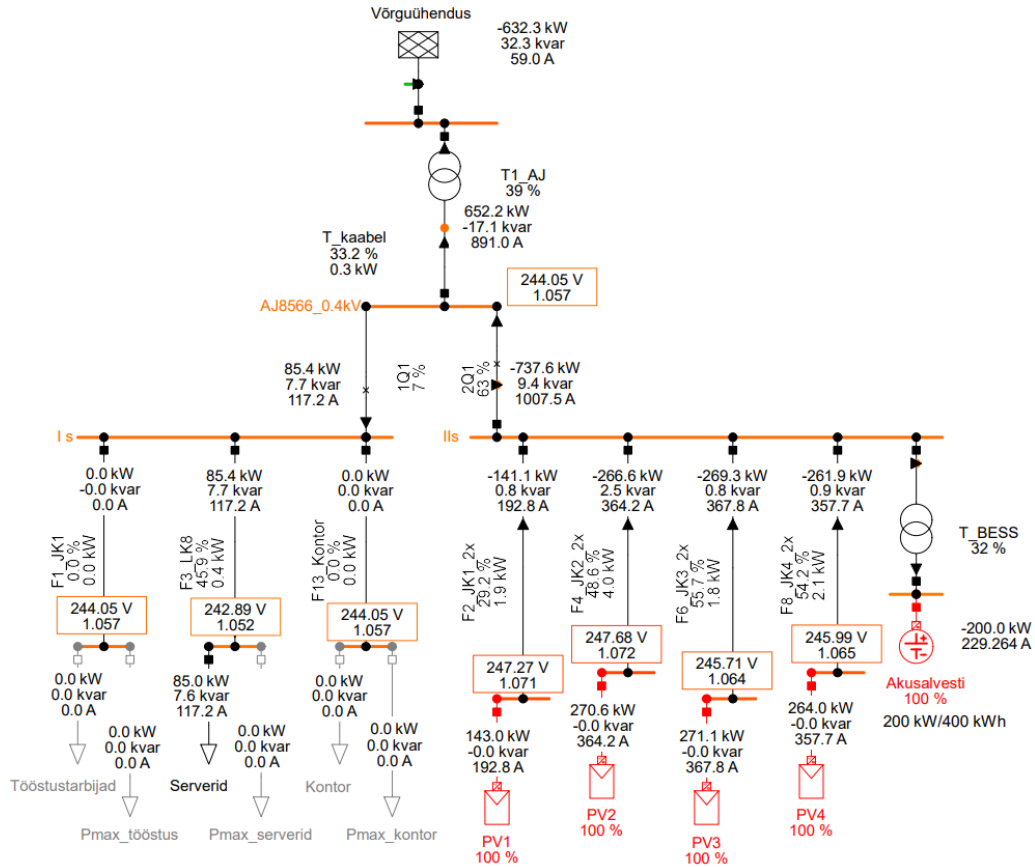
74   Pgen = -Plae * redFac; ! charge = LOAD, storing
75   Qgen = -Qstore * redFac; ! charge = LOAD, storing
76 }
77 else {
78   Pgen = 0.;
79   Qgen = 0.;
80 }
81 SetEquation(0, Pset - Pgen);
82 SetEquation(1, Qset - Qgen);
83 ////////////////////////////////////////////////////Load Flow Control
84 Pm55t = Pliin*Osuund - Pset; ! negative=load
85
86 ! measured power operation area
87 if (Aolek > 0) { ! Not initial error
88   if (Pm55t < -PstartT) {
89     Aolek = 3;
90   }
91   else if (Pm55t > PstartL) {
92     Aolek = 1;
93   }
94   else {
95     Aolek = 2;
96   }
97 }
98 ! energy operation area
99 if (Asoc > 0) { ! Not initial error
100   if (SOC >= SOCmax) {
101     Asoc = 3;
102     if ({iniSOCcob = 0}.and.{SOC > SOCmax}) {
103       SOC = SOCmax;
104     }
105   }
106   else if (SOC <= SOCmin) {
107     Asoc = 1;
108     if ({iniSOCcob = 0}.and.{SOC < SOCmin}) {
109       SOC = SOCmin;
110     }
111   }
112   else {
113     Asoc = 2;
114     iniSOCcob = 0; ! Inside limits now
115   }
116 }
117 ////////////////////////////////////////////////////Quasi-Dynamic Simulation Equations
118 SOC = -Pset * 100. / (Emaht * 3600.); ! slope of charge/discharge in %
119 ////////////////////////////////////////////////////Quasi-Dynamic Simulation Control
120 ! energy operation area
121 if (Asoc > 0) { ! Not initial error
122   if (SOC >= SOCmax) {
123     Asoc = 3;
124     if ({iniSOCcob = 0}.and.{SOC > SOCmax}) {
125       SOC = SOCmax;
126     }
127   }
128   else if (SOC <= SOCmin) {
129     Asoc = 1;
130     if ({iniSOCcob = 0}.and.{SOC < SOCmin}) {
131       SOC = SOCmin;
132     }
133   }
134   else {
135     Asoc = 2;
136     iniSOCcob = 0; ! Inside limits now
137   }
138 }
139

```

Lisa 5 LFA PV võimsus null, koormus max



Lisa 6 LFA PV võimsus maksimaalne, tarbimine minimaalne



Lisa 7 Võrgutasude arvutustabelid

Võrguühenduse kasutusvõimsuse tasu maksumus																
Maksimaalne tarbimine tunni jooksul									Võrguühenduse kasutusvõimsuse tasu maksumus							
Kuu	S0	S1	S2.1	S2.2	S3.3	S3.1	S3.2	S3.3	S0	S1	S2.1	S2.2	S2.3	S3.1	S3.2	S3.3
1	144.0	144.0	146.8	146.8	146.8	290.7	144.0	290.7	397.3	397.3	405.0	405.0	405.0	802.2	397.3	802.2
2	143.3	143.3	148.3	148.3	148.3	269.8	143.3	269.8	395.5	395.5	409.4	409.4	409.4	744.7	395.5	744.7
3	121.4	119.0	155.4	154.7	154.7	242.9	196.1	119.0	335.0	328.3	429.0	426.9	426.9	670.5	541.1	328.3
4	115.0	99.0	146.0	99.0	99.0	185.5	113.8	113.8	317.4	273.1	403.0	273.1	273.1	512.1	314.0	314.0
5	95.3	95.3	145.6	95.3	95.3	170.3	137.2	137.2	263.2	263.2	402.0	263.2	263.2	469.9	378.7	378.7
6	95.9	95.9	165.4	95.9	95.9	238.2	200.1	105.3	264.8	264.8	456.6	264.8	264.8	657.4	552.2	290.7
7	108.1	107.5	169.6	107.5	107.5	258.1	199.9	141.9	298.3	296.8	468.0	296.8	296.8	712.3	551.6	391.7
8	112.5	112.5	157.5	112.5	112.5	223.8	155.8	153.7	310.4	310.4	434.8	310.4	310.4	617.6	430.0	424.3
9	125.4	113.7	156.2	113.7	113.7	249.8	113.7	113.7	346.2	313.9	431.2	313.9	313.9	689.5	313.9	313.9
10	134.3	134.3	193.3	193.3	193.3	276.8	134.3	276.8	370.7	370.7	533.6	533.6	533.6	764.0	370.7	764.0
11	154.0	154.0	174.4	174.4	174.4	295.7	154.0	295.7	424.9	424.9	481.3	481.3	481.3	816.3	424.9	816.3
12	160.4	160.4	225.3	225.3	225.3	299.2	160.4	299.2	442.7	442.7	621.8	621.8	621.8	825.7	442.7	825.7
Kokku:									4166.4	4081.7	5475.7	4600.3	4600.3	8282.2	5112.7	6394.5

Võrguühenduse läbilaskevõime tasu arvutus																
Suurim netokoormus ("-" = tootmissuunaline)									Võrguühenduse läbilaskevõime tasu arvutus							
Kuu	S0	S1	S2.1	S2.2	S3.3	S3.1	S3.2	S3.3	S0	S1	S2.1	S2.2	S2.3	S3.1	S3.2	S3.3
1	-161.44	-117.49	-313.25	-313.25	-259.89	-313.25	-117.49	-259.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	-416.62	-416.62	-416.62	-416.62	-416.62	-416.62	-416.62	-416.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	-615.85	-615.85	-729.64	-615.85	-615.85	-729.64	-665.85	-665.85	0.00	0.00	131.33	0.00	0.00	131.33	119.85	119.85
4	-672.01	-671.94	-830.26	-671.94	-671.94	-830.26	-671.94	-671.94	120.96	120.95	149.45	120.95	120.95	149.45	120.95	120.95
5	-678.33	-678.33	-863.70	-678.33	-678.33	-863.70	-702.11	-702.11	122.10	122.10	155.47	122.10	122.10	155.47	126.38	126.38
6	-700.89	-700.89	-870.52	-700.89	-700.89	-870.52	-699.49	-699.49	126.16	126.16	156.69	126.16	126.16	156.69	125.91	125.91
7	-686.46	-686.46	-855.76	-686.46	-686.46	-855.76	-711.43	-711.43	123.56	123.56	154.04	123.56	123.56	154.04	128.06	128.06
8	-667.71	-667.71	-802.72	-667.71	-667.71	-802.72	-679.87	-679.87	120.19	120.19	144.49	120.19	120.19	144.49	122.38	122.38
9	-632.99	-632.99	-629.74	-632.99	-632.99	-629.74	-648.94	-648.94	113.94	113.94	0.00	113.94	113.94	0.00	116.81	116.81
10	-413.59	-413.59	-425.99	-425.99	-413.59	-442.96	-413.59	-442.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	-169.90	-48.75	-169.90	-169.90	-169.90	-169.90	-48.75	-169.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	-56.06	-40.67	-198.27	-198.27	-122.73	-198.27	-40.67	-122.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Kokku:									726.91	726.90	891.47	726.90	726.90	891.47	860.33	860.33

Lisa 8 Rahavoogude koondtabel

Rahavood								
Tulud €	S0	S1	S2.1	S2.2	S2.3	S3.1	S3.2	S3.3
Elektrienergia müügitulud	44 023,1	35 998,8	55 650,7	42 545,0	37 965,6	55 881,5	36 204,2	38 195,9
Elektrienergia sääst (kohapeal tarbitud)	32 147,5	41 731,0	39 997,8	45 740,2	50 178,8	47 056,3	44 006,1	56 564,7
Tulud kokku:	76 170,5	77 729,8	95 648,6	88 285,1	88 144,4	102 937,8	80 210,4	94 760,6
Kulud, €								
Elektrienergia ostukulud	62 625,7	53 042,3	64 368,6	53 698,0	49 259,4	63 470,1	52 741,4	48 199,5
Võrgutasud	5 018,3	4 933,6	6 492,2	5 452,2	5 452,2	9 298,7	6 098,1	7 379,8
Hoolduskulud	3 320,6	4 760,6	4 760,6	4 760,6	4 760,6	4 760,6	4 760,6	4 760,6
Akusalvesti amortisatsioon	0,0	7 241,0	11 694,6	11 117,9	11 117,9	13 809,2	8 234,3	12 976,2
Kulud kokku:	70 964,7	69 977,6	87 316,0	75 028,8	70 590,2	91 338,6	71 834,4	73 316,1
Rahavoog, €	5 205,9	7 752,2	8 332,6	13 256,3	17 554,2	11 599,2	8 376,0	21 444,5

Lisa 9 Tasuvusanalüüs S1

Aasta	Ühik	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
		2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038
SISENDID																				
Investeeringu maksumus	€	176 160																		
Inflatsioon	%		0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%
Salvesti laadimistsüklid	tk	4 000	3 774	3 548	3 322	3 096	2 870	2 644	2 418	2 192	1 966	1 740	1 514	1 288	1 062	836	610	384	158	-68
TULUD (SÄÄST)																				
Elektri müük võrku	€	0	35 999	36 719	37 453	38 202	38 966	39 746	40 540	41 351	42 178	43 022	43 882	44 760	45 655	46 568	47 500	48 450	49 419	50 407
Kohapeal tarbitud elektrienergia	€	0	41 731	42 566	43 417	44 285	45 171	46 074	46 996	47 936	48 895	49 872	50 870	51 887	52 925	53 983	55 063	56 164	57 288	58 433
Tulud (sääst) kokku	€	0	77 730	79 284	80 870	82 487	84 137	85 820	87 536	89 287	91 073	92 894	94 752	96 647	98 580	100 552	102 563	104 614	106 706	76 188
KULUD																				
Investeeringu kulud	€	176 160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Elektrienergia ost	€	0	53 042	54 103	55 185	56 289	57 415	58 563	59 734	60 929	62 148	63 390	64 658	65 951	67 270	68 616	69 988	71 388	72 816	74 272
Akusalvesti amortisatsioon	€	0	7 241	7 241	7 241	7 241	7 241	7 241	7 241	7 241	7 241	7 241	7 241	7 241	7 241	7 241	7 241	7 241	7 241	7 241
Elektriaudit	€	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Salvesti hoolduskulud	€	0	1 440	1 469	1 498	1 528	1 559	1 590	1 622	1 654	1 687	1 721	1 755	1 790	1 826	1 863	1 900	1 938	1 977	2 016
Võrgutasud (kuupõhine)	€	0	4934	5 032	5 133	5 236	5 340	5 447	5 556	5 667	5 780	5 896	6 014	6 134	6 257	6 382	6 510	6 640	6 773	6 908
Kulud kokku	€	176 160	69 978	71 232	72 512	73 818	75 149	76 507	77 893	79 306	80 747	82 217	83 716	85 246	86 806	88 397	90 021	91 676	93 365	66 561
Puhas rahavoog	€	-176 160	7 752	8 052	8 358	8 670	8 988	9 313	9 644	9 982	10 326	10 677	11 036	11 401	11 774	12 154	12 542	12 938	13 342	9 627
Kumulatiivne puhasrahavoog	€	-176 160	-168 408	-160 356	-151 998	-143 328	-134 339	-125 027	-115 383	-105 401	-95 075	-84 398	-73 362	-61 961	-50 187	-38 033	-25 490	-12 552	789	10 417
Nüüdisväärtus	€	-176 160	7 383	7 304	7 220	7 133	7 042	6 949	6 854	6 756	6 656	6 555	6 452	6 349	6 244	6 139	6 033	5 927	5 821	4 000
Kumulatiivne diskonteeritud rahavoog	€	-176 160	-160 388	-145 447	-131 301	-117 916	-105 258	-93 297	-82 000	-71 340	-61 286	-51 813	-42 893	-34 502	-26 615	-19 209	-12 261	-5 750	344	4 328

Algne investeering	€	-176 160
Lisanduv investeering	€	0
Kokku investeering	€	-176 160
Puhas rahavoog akusalvesti eluea jooksul	€	186 577
Lihntasuvusaeg (SPBP)	aastat	17
Puhasnüüdisväärtus (NPV)	€	-59 342,9
Sisemine kasuminorm (IRR)	%	0,6%
Tasuvusnäitaja (PI)		0,66

	Ühik	Väärtus
Investeeringukulud kokku	€	176 160
Akusalvesti seadmete hind	€	128 160
Akusalvesti võimsus	kW	200
Akusalvesti energia	kWh	400
Diskontomäär	%	5%
Akusalvesti laadimistsükrite arv	tk	4000
Laadimistsükleid aastas	tk	226
Prognoositud eluiga	aastat	17,7
Akusalvesti amortisatsioon	%	5,7%

Maksumused	€	€/kW
MWh	63 360	316,8
MW PCS	64 800	324
Muud kulud	48 000	240
Kokku	176 160	881

Lisa 10 Tasuvusanalüüs S2.3

Aasta	Ühik	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
SISENDID														
Investeeringu maksumus	€	176 160												
Inflatsioon	%		0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%
Salvesti laadimistsüklid	tk	4 000	3 653	3 306	2 959	2 612	2 265	1 918	1 571	1 224	877	530	183	-164
TULUD (SÄÄST)														
Elektri müük võrku	€	0	37 966	38 725	39 499	40 289	41 095	41 917	42 755	43 611	44 483	45 372	46 280	47 205
Kohapeal tarbitud elektrienergia	€	0	50 179	51 182	52 206	53 250	54 315	55 401	56 509	57 640	58 792	59 968	61 168	62 391
Tulud (sääst) kokku	€	0	88 144	89 907	91 705	93 540	95 410	97 319	99 265	101 250	103 275	105 341	107 448	54 798
KULUD														
Investeeringu kulud	€	176 160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Elektrienergia ost	€	0	49 259	50 245	51 249	52 274	53 320	54 386	55 474	56 584	57 715	58 870	60 047	61 248
Akusalvesti amortisatsioon	€	0	11 118	11 118	11 118	11 118	11 118	11 118	11 118	11 118	11 118	11 118	11 118	11 118
Elektriaudit	€	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Salvesti hoolduskulud	€	0	1 440	1 469	1 498	1 528	1 559	1 590	1 622	1 654	1 687	1 721	1 755	1 790
Võrgutasud (kuupõhine)	€	0	5452	5 561	5 672	5 786	5 902	6 020	6 140	6 263	6 388	6 516	6 646	6 779
Kulud kokku	€	176 160	70 590	71 780	72 993	74 230	75 493	76 780	78 093	79 433	80 799	82 193	83 614	42 532
Puhas rahavoog	€	-176 160	17 554	18 128	18 713	19 309	19 918	20 539	21 172	21 817	22 476	23 148	23 833	12 266
Kumulatiivne puhasrahavoog	€	-176 160	-158 606	-140 478	-121 765	-102 456	-82 538	-62 000	-40 828	-19 010	3 466	26 614	50 447	62 713
Nüüdisväärtus	€	-176 160	16 718	16 442	16 165	15 886	15 606	15 326	15 046	14 767	14 488	14 211	13 935	6 830
Kumulatiivne diskonteeritud rahavoog	€	-176 160	-151 053	-127 418	-105 185	-84 291	-64 671	-46 265	-29 016	-12 867	2 234	16 339	29 495	34 921

Algne investeering	€	-176 160
Lisanduv investeering	€	0
Kokku investeering	€	-176 160
Puhas rahavoog akusalvesti eluea jooksul	€	238 873
Lihne tasuvusaeg (SPBP)	aastat	9
Puhasnüüdisväärtus (NPV)	€	-738,7
Sisemine kasuminorm (IRR)	%	4,9%
Tasuvusnäitaja (PI)		0,996

	Ühik	Väärtus
Investeeringukulud kokku	€	176 160
Akusalvesti seadmete hind	€	128 160
Akusalvesti võimsus	kW	200
Akusalvesti energia	kWh	400
Diskontomäär	%	5%
Akusalvesti laadimistsüklite arv	tk	4000
Laadimistsükleid aastas	tk	347
Prognoositud eluiga	aastat	11,5
Akusalvesti amortisatsioon	%	8,7%

Maksumused	€	€/kW
MWh	63 360	316,8
MW PCS	64 800	324
Muud kulud	48 000	240
Kokku	176 160	881

Lisa 11 Tasuvusanalüüs S3.3

Aasta	Ühik	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
SISENDID												
Investeeringu maksumus	€	176 160										
Inflatsioon	%		0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%
Salvesti laadimistsüklid	tk	4 000	3 595	3 190	2 785	2 380	1 975	1 570	1 165	760	355	-50
TULUD (SÄÄST)												
Elektri müük võrku	€	0	38 196	38 960	39 739	40 534	41 344	42 171	43 015	43 875	44 753	45 648
Kohapeal tarbitud elektrienergia	€	0	56 565	57 696	58 850	60 027	61 227	62 452	63 701	64 975	66 275	67 600
Tulud (sääst) kokku	€	0	94 761	96 656	98 589	100 561	102 572	104 623	106 716	108 850	111 027	99 658
KULUD												
Investeeringu kulud	€	176 160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Elektrienergia ost	€	0	48 200	49 163	50 147	51 150	52 173	53 216	54 280	55 366	56 473	57 603
Akusalvesti amortisatsioon	€	0	12 976	12 976	12 976	12 976	12 976	12 976	12 976	12 976	12 976	12 976
Elektriaudit	€	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Salvesti hoolduskulud	€	0	1 440	1 469	1 498	1 528	1 559	1 590	1 622	1 654	1 687	1 721
Võrgutasud (kuupõhine)	€	0	7380	7 527	7 678	7 831	7 988	8 148	8 311	8 477	8 647	8 820
Kulud kokku	€	176 160	73 316	74 523	75 754	77 009	78 290	79 596	80 929	82 288	83 674	74 877
Puhas rahavoog	€	-176 160	21 445	22 133	22 835	23 551	24 282	25 027	25 787	26 562	27 353	24 781
Kumulatiivne puhasrahavoog	€	-176 160	-154 715	-132 583	-109 747	-86 196	-61 914	-36 887	-11 100	15 462	42 815	67 596
Nüüdisväärtus	€	-176 160	20 423	20 075	19 726	19 376	19 025	18 676	18 326	17 978	17 632	15 213
Kumulatiivne diskonteeritud rahavoog	€	-176 160	-147 348	-120 256	-94 804	-70 914	-48 511	-27 526	-7 889	10 465	27 599	41 498

Algne investeering	€	-176 160
Lisanduv investeering	€	0
Kokku investeering	€	-176 160
Puhas rahavoog akusalvesti eluea jooksul	€	243 756
Lihne tasuvusaeg (SPBP)	aastat	8
Puhasnüüdisväärtus (NPV)	€	10 291,3
Sisemine kasuminorm (IRR)	%	6,1%
Tasuvusnäitaja (PI)		1,06

	Ühik	Väärtus
Investeeringukulud kokku	€	176 160
Akusalvesti seadmete hind	€	128 160
Akusalvesti võimsus	kW	200
Akusalvesti energia	kWh	400
Diskontomäär	%	5%
Akusalvesti laadimistsüklite arv	tk	4000
Laadimistsükleid aastas	tk	405
Prognoositud eluiga	aastat	9,88
Akusalvesti amortisatsioon	%	10,1%

Maksumused	€	€/kW
MWh	63 360	316,8
MW PCS	64 800	324
Muud kulud	48 000	240
Kokku	176 160	881