



INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Integreeritud energiasalvestiga nutikate madalpinge alajaamade majandusliku tasuvuse uurimine

Economic feasibility study of smart low voltage distribution substations with integrated energy storage

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Heigo Jakson

Üliõpilaskood: 215513

Juhendaja: Tarmo Korõtko, PhD
Marek Mägi, PhD

Tallinn 2022

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 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 Heigo Jakson

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Integreeritud energiasalvestiga nutikate madalpinge alajaamade majandusliku tasuvuse uurimine“,

mille juhendajad on Tarmo Korõtko ja Marek Mägi

- 1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
- 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

_____ (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 üks või enam isikut oma ühise loominguulise 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: Heigo Jakson

Lõputöö liik: Magistritöö

Töö pealkiri: Integreeritud energiasalvestiga nutikate madalpinge alajaamade majandusliku tasuvuse uurimine

Kuupäev: 20.12.2022

123 lk (*lõputöö lehekülgede arv koos lisadega*)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): Tarmo Korõtko, PhD, teadur; Marek Mägi, PhD, Harju Elekter Elektrotehnika AS elektriinsener

Sisu kirjeldus:

Käesoleva lõputöö eesmärk oli uurida, kas oluliselt tõusnud elektrihindade olukorras oleks mõistlik välja töötada ning turule pakkuda integreeritud energiasalvestiga nutikaid madalpinge alajaamu.

Lõputöös antakse ülevaade energiasalvestuslahendustest, käsitletakse tööstustarbijate vajadusi energiasalvestuse osas, uuritakse energiasalvestusalajaamadele sobilike seadmeid, töötatakse välja valitud tööstustarbijatele sobilikud salvestusalajaamad koos neile sobilike juhtimissüsteemidega ning seejärel viiakse läbi nende alajaamade tasuvusanalüüs.

Märksõnad: energiasalvesti, madalpinge alajaam, elektrihind, tasuvusanalüüs, energia arbitraaž

ABSTRACT

Author: Heigo Jakson

Type of the work: Master Thesis

Title: Economic feasibility study of smart low voltage distribution substations with integrated energy storage

Date: 20.12.2022

123 pages (the number of thesis pages including appendices)

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor(s) of the thesis: Tarmo Korõtko, PhD, Researcher; Marek Mägi, PhD, Electrical Engineer at Harju Elekter Elektrotehnika AS

Abstract:

Objective of this thesis was to research if it would be rational to develop and offer to the market low voltage distribution substations with integrated energy storage in the situation, where price of electricity has risen significantly.

The thesis provides an overview about energy storage solutions, researches needs of industrial consumers in terms of energy storage, investigates suitable devices for substations with integrated energy storage. In the thesis suitable energy storage substations for chosen industrial consumers are designed together with suitable control systems and thereafter economic feasibility study for these substations is carried out.

Keywords: energy storage, low voltage substation, price of electricity, feasibility study, energy arbitrage

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Integreeritud energiasalvestiga nutikate madalpinge alajaamade majandusliku tasuvuse uurimine
Lõputöö teema inglise keeles:	Economic feasibility study of smart low voltage distribution substations with integrated energy storage
Üliõpilane:	Heigo Jakson
Eriala:	Elektroenergeetika
Lõputöö liik:	Magistritöö
Lõputöö juhendaja:	Tarmo Korõtko, PhD
Lõputöö kaasjuhendaja: (ettevõtte, amet ja kontakt)	Marek Mägi, PhD Harju Elekter Elektrotehnika AS, elektriinsener, marek.magi@harjuelekter.com
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	2022/2023 Sügis
Lõputöö esitamise tähtaeg:	21.12.2022 kell 15:00

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Energiasalvestustehnoloogiate kiirest arengust tulenev seadmete soodsam hind ning elektrihinna tõus, koosmõjus energiasalvestussüsteemide pakutava positiivse mõjuga elektrisüsteemidele, on muutnud atraktiivseks energiasalvestuslahenduste laialdasema kasutuselevõtu elektrivõrkudes. See on omakorda muutnud aktuaalseks energiasalvestiga nutikate alajaamade majandusliku tasuvuse küsimuse, mille vastuste leidmisele käesolev lõputöö keskendub.

2. Töö eesmärk

Lõputöö käigus töötatakse välja kolmele tööstuseettevõttele sobilikud energiasalvestuse tehnilised lahendused ning seejärel hinnatakse nende majanduslikku tasuvust. Eesmärgiks on uurida, kas hetke olukorras oleks majanduslikult otstarbekas töötada välja ning pakkuda turule energiasalvestustehnoloogiaga madalpinge alajaamu.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- o Valitud tööstusettevõtete energiasalvestus vajaduste välja selgitamine ning analüüs;
- o Sobilike energiasalvestusseadmete valik;
- o Valitud tööstusettevõtetele energiasalvestiga alajaama tehnilise lahenduse väljatöötamine. Tehniliste lahenduste väljatöötamisel kaalutakse:
 - elektrienergia salvestamist madalama elektrienergia turuhinna juures ning selle kasutust tööstuseettevõtte poolt kõrgema elektrienergia turuhinna korral;
 - elektrienergia salvestamist madalama elektrienergia turuhinna juures ning selle tagasi müüki elektrivõrku kõrgema elektrienergia turuhinna korral;
 - reaktiivenergia kohalikku genereerimist energiasalvestusalajaama inverteritega tööstusettevõtte vajaduste tarbeks, et vältida reaktiivenergia tarbimist/ostu elektrivõrgust;
 - muid võimalikke aspekte/vajadusi, kui neid ilmneb läbiviidavatest intervjuudest tööstustarbijate energiavarustuse eest vastutavate isikutega;
- o Väljatöötatud energiasalvestusalajaamade majandusliku tasuvuse hindamine.

4. Lähteandmed

- o Lõputöö teemaga seotud tehniline kirjandus: artiklid, raamatud, veebimaterjalid, standardid;
- o Elektrienergia ajalooline hinnastatistika;
- o Valitud tööstustarbijate ajalooline elektrienergia tarbimisinfo;
- o Lõputöö teemaga seotud seadme tootjate koduleheküljed;
- o Intervjuud valitud tööstustarbijate energiavarustuse eest vastutavate isikutega.

5. Uurimismeetodid

Lõputöö tulemuseni jõudmiseks kasutatakse:

- o Teemaga seotud kirjanduse analüüsi;
- o Intervjuusid valitud tööstustarbijate energiavarustuse eest vastutavate isikutega;
- o Energiasalvestussüsteemide modelleerimist;
- o Tasuvusarvutusi valemitega ja graafikutega.

6. Graafiline osa

Joonised, tabelid ja skeemid esitatakse magistritöö põhiosas ning lisades. Olulisemad neist on:

- o Joonised energiasalvestussüsteemide tehnilistest lahendustest;
- o Tabelid valitud tööstustarbijate tarbimisandmete kohta;
- o Tabelid valitud energiasalvestussüsteemi seadmetest;
- o Energiasalvestusalajaamade seadmete paigutusjoonised;
- o Energiasalvestusalajaamade juhtimisega seotud voodiagrammid;
- o Energiasalvestusalajaamade tasuvusanalüüsiga seotud graafikud.

7. Töö struktuur

1. Ülevaade energiasalvestus lahendustest
 - 1.1. Ülevaade energiasalvestite arengutest
 - 1.2. Ülevaade energiasalvestite tehnilistest lahendustest
2. Tööstustarbijate vajaduste ülevaade
 - 2.1. Ülevaade tööstustarbijatest
 - 2.2. Lõputöös uuritavad tööstustarbijad ja nende profiilid
 - 2.3. Uurimisobjektide lähteülesanded salvestuslahendustele
 - 2.4. Salvestitega seotud standardid
3. Energiasalvestusseadmete valikud
 - 3.1. Sissejuhatus
 - 3.2. Akud
 - 3.3. Muundurid
 - 3.4. Juhtimisseadmed
 - 3.5. Järeldused
4. Energiasalvestusalajaamade lahendused
 - 4.1. Sissejuhatus
 - 4.2. Tööstustarbija 1 energiasalvestusalajaama tehniline lahendus

- 4.3. Tööstustarbija 2 energiasalvestusalajaama tehniline lahendus
- 4.4. Tööstustarbija 3 energiasalvestusalajaama tehniline lahendus
- 4.5. Järeldused
5. Energiasalvestite juhtimissüsteemid
 - 5.1. Sissejuhatus
 - 5.2. Tööstustarbija 1 tehniline lahendus
 - 5.3. Tööstustarbija 2 tehniline lahendus
 - 5.4. Tööstustarbija 3 tehniline lahendus
 - 5.5. Järeldused
6. Energiasalvestusalajaamade tasuvusanalüüs
 - 6.1. Sissejuhatus
 - 6.2. Tööstustarbija 1 tarbimisgraafikud energiasalvestiga
 - 6.3. Tööstustarbija 2 tarbimisgraafikud energiasalvestiga
 - 6.4. Tööstustarbija 3 tarbimisgraafikud energiasalvestiga
 - 6.5. Alternatiivsed graafikud
 - 6.6. Tasuvusanalüüsi meetoodika
 - 6.7. Järeldused
7. Kokkuvõte
 - 7.1. Järeldused
 - 7.2. Edasist uurimist vajavad teemad

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Lõputöö koostamisel kasutatakse:

- o Seadmetootjate kodulehed, spetsifikatsioonid ning brošüürid;
- o Lõputöö teemaga seotud tehniline kirjandus (artiklid, raamatud, veebimaterjalid);
- o Intervjuud tööstustarbijatega.

9. Lõputöö konsultandid

10. Töö etapid ja ajakava

- o Kirjanduse läbitöötamine ning lähteandmete kogumine (18.09.2022);
- o Lõputöö esimese kolme peatüki valmimine (02.10.2022);
- o Lõputöö neljanda peatüki valmimine (16.10.2022);
- o Lõputöö viienda peatüki valmimine (30.10.2022);
- o Lõputöö kuuenda peatüki valmimine (13.11.2022);
- o Kokkuvõtte ning järelduste kirjutamine (20.11.2022);
- o Lõputöö esialgne versioon valmis (20.11.2022);

- o Esialgse versiooni esitamine juhendajale (22.11.2022);
- o Juhendaja tagasiside põhjal korrektuuride tegemine lõputööle (06.12.2022);
- o Töö esitamine juhendajale viimaseks ülevaatuseks (07.12.2022);
- o Juhendaja kommentaaride põhjal tehtud muudatused, täiendused, parendused (14.12.2022);
- o Magistritöö lõplik versioon valmis ning esitatakse kaitsmiseks (21.12.2022).

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
Eessõna	13
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	14
Sissejuhatus	15
1 Ülevaade energiasalvestus lahendustest	17
1.1 Ülevaade energiasalvestite arengutest.....	17
1.2 Ülevaade energiasalvestite tehnilistest lahendustest.....	19
1.2.1 Energiasalvestustehnoloogiad.....	19
1.2.2 Turul pakutavad nutikad energiasalvestiga madalpingealajaamad	21
2 Tööstustarbijate vajaduste ülevaade	24
2.1 Ülevaade tööstustarbijatest.....	24
2.2 Lõputöös uuritavad tööstustarbija ja nende profiilid	25
2.2.1 Tööstustarbija 1.....	25
2.2.2 Tööstustarbija 2.....	26
2.2.3 Tööstustarbija 3.....	28
2.3 Lähteülesanded tööstustarbijatele plaanitavatele salvestuslahendustele...30	
2.3.1 Tööstustarbija 1 lähteülesanne salvestuslahendusele.....	30
2.3.2 Tööstustarbija 2 lähteülesanne salvestuslahendusele.....	30
2.3.3 Tööstustarbija 3 lähteülesanne salvestuslahendusele.....	31
2.4 Salvestitega seotud standardid	31
3 Energiasalvestusseadmete valikud	34
3.1 Sissejuhatus	34
3.2 Muundurid	35
3.3 Salvestid	39
3.4 Juhtimisseadmed	43
3.5 Järeldused	49
4 Energiasalvestusalajaamade lahendused.....	50
4.1 Sissejuhatus	50
4.2 Tööstustarbija 1 energiasalvestusalajaama tehniline lahendus	50
4.3 Tööstustarbija 2 energiasalvestusalajaama tehniline lahendus	52
4.4 Tööstustarbija 3 energiasalvestusalajaama tehniline lahendus	54

4.5	Järeldused	56
5	Energiasalvestite juhtimissüsteemid	57
5.1	Sissejuhatus	57
5.2	Tööstustarbija 1 energiasalvestusalaajaama tehniline lahendus	58
5.3	Tööstustarbija 2 energiasalvestusalaajaama tehniline lahendus	60
5.4	Tööstustarbija 3 energiasalvestusalaajaama tehniline lahendus	61
5.5	Järeldused	63
6	Energiasalvestusalaajaamade tasuvusanalüüs	65
6.1	Sissejuhatus	65
6.2	Tööstustarbija 1 energiasalvestusalaajaama tasuvusanalüüs	66
6.3	Tööstustarbija 2 energiasalvestusalaajaama tasuvusanalüüs	74
6.4	Tööstustarbija 3 energiasalvestusalaajaama tasuvusanalüüs	81
6.5	Analüüs tasuvuspunkti leidmiseks	86
6.6	Järeldused	89
7	Kokkuvõte	92
	Kasutatud kirjanduse loetelu	95
	Lisad	99
	Lisa 1. Tööstustarbija 1 energiasalvestusalaajaama tehnilise lahendusega seotud tabelid ning joonised	99
	Lisa 2. Tööstustarbija 2 energiasalvestusalaajaama tehnilise lahendusega seotud tabelid ning joonised	107
	Lisa 3. Tööstustarbija 3 energiasalvestusalaajaama tehnilise lahendusega seotud tabelid ning joonised	116

Eessõna

Käesoleva magistritöö teema "Integreeritud energiasalvestiga nutikate madalpinge alajaamade majandusliku tasuvuse uurimine" oli välja pakutud lõputöö juhendaja Tarmo Korõtko poolt. Lõputöö teema valikut toetas lõputöö autori tööandja Harju Elekter Elektrotehnika AS käivitatud projekt hindamaks, kas oleks majanduslikult tasuv välja töötada ning turule pakkuda salvestuslahendustega alajaamu olukorras, kus elektri hinnad on oluliselt tõusnud ning elektri hind ööpäeva lõikes Nordpool elektribörsil kõigub mitmekordselt.

Autor soovib avaldada tänu lõputöö kaasjuhendajale Marek Mägile ning lõputöö juhendajale Tarmo Korõtkole, kelle kommentaarid ning nõuanded olid magistritöö läbiviimisel oluliseks abiks.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

ESS – Energy Storage System ehk energiasalvestussüsteem

IEC - Rahvusvaheline Elektrotehnika Komisjon

CENELEC - Euroopa Elektrotehnika Standardikomitee

EVS - Eesti Standardiseerimis- ja Akrediteerimiskeskuse standard

DoD – akude tühjakslaetavuse sügavus

$C_{Salvesti}$ – Akupanga minimaalne mahtuvus

$C_{Aj_kasulik}$ – Energiasalevstiga alajaama kasulik mahtuvus

$DoD\%$ - Akupanga tühjakslaetavuse sügavus

$\eta_{Inverter}$ – Inverteri kasutegur

$P_{Inverter}$ – Inverteri minimaalne väljund aktiivvõimsus

$t_{tüh}$ - Alajaama akupanga tühjakslaadimise aeg

Sissejuhatus

Tulenevalt üha kallinevast elektri hinnast, mille mõju on avaldunud eriti tugevalt alates 2021 aastast, on ettevõtete üheks suurimaks mureks olnud elektrivarustuse sisendhinna kiire kasv. Selles situatsioonis on tööstusettevõtted asunud uurima võimalusi, et optimeerida elektrienergiale tehtavaid kulutusi. Olukorras, kus Nordpool elektribörsi hind ööpäeva lõikes kõigub mitmekordselt on hakatud esitama küsimust, kas oleks võimalik vähendada kulutusi elektrienergiale kasutades integreeritud energiasalvestiga nutikaid madalpinge alajaamu. Nimetatud küsimusele vastuse leidmisega antud lõputöö keskendubki.

Lõputöö esimene peatükk annab ülevaate energiasalvestus lahendustest. Selles peatükis kirjeldatakse arenguid energiasalvestite valdkonnas, energiasalvestamise jaoks kasutatavaid tehnilisi lahendusi ning tutvustatakse täna turul pakutavaid nutikaid energiasalvestiga madalpinge alajaamu.

Lõputöö teine peatükk keskendub tööstustarbijate vajaduste määratlemisele salvestusalajaamade osas. Esmalt kirjeldatakse tööstustarbijate üldist elektrikasutuse profiili ning seejärel keskendutakse konkreetsetele lõputöös vaadeldavate tööstustarbijate elektrikasutusele. Järgnevalt formuleeritakse lähteülesanded lõputöös käsitletavatele tööstustarbijatele sobivatele energiasalvestiga alajaamadele. Peatüki viimases osas loetletakse standardid, millest lähtutakse energiasalvestiga alajaamade planeerimisel.

Lõputöö kolmas peatükk käsitleb seadmete valikuid energiasalvestiga madalpinge alajaamade koostamiseks. Esmalt kirjeldatakse kriteeriume, mille alusel sobilikke seadmeid valida ning seejärel kirjeldatakse olulisemaid konkreetseid sobilikke seadmeid: muundureid, salvesteid, juhtimisseadmeid.

Lõputöö neljas peatükk keskendub valitud tööstustarbijatele sobilike energiasalvestusalajaamade lahenduste välja töötamisele. Esmalt tuuakse välja põhimõtted/parameetrid konkreetsete salvestusalajaamade tehniliste lahenduste väljatöötamisele. Järgnevalt töötatakse välja igale vaadeldavale tööstustarbijale sobiv salvestusalajaama tehniline lahendus, määratakse sobivad seadmed, alajaama ehitus ning seejärel ka alajaama maksumus.

Lõputöö viies peatükk vaatleb energiasalvestusalajaamade juhtimissüsteeme. Esmalt käsitletakse võimalikke juhtimispõhimõtteid üldiselt. Sellele järgnevalt kirjeldatakse konkreetsemalt vaadeldavatele tööstustarbijatele valitud salvestusalajaamade juhtimissüsteemi komponente ning kirjeldatakse nende alajaamade juhtimisalgoritme.

Lõputöö kuues peatükk keskendub planeeritud salvestusalajaamade tasuvuse määramisele. Esmalt kirjeldatakse põhimõtteid, kuidas tasuvusanalüüs läbi viiakse ning parameetreid, mida arvestatakse. Sellele järgnevad konkreetsed arvutused ning analüüs tööstustarbijatele planeeritud salvestusalajaamade tasuvuse osas.

Lõputöö seitsmes ja viimane peatükk on lõputöö kokkuvõte.

1 Ülevaade energiasalvestus lahendustest

1.1 Ülevaade energiasalvestite arengutest

Energia salvestamiseks nimetatakse toodetud energia säilitamist selle tarbimise edasi lükkamiseks sobivamale ajale tulevikus [1]. Tänapäevaks on välja töötatud mitmeid erinevaid tehnilisi lahendusi energia salvestamiseks. Kasutusel olevad tehnoloogiad põhinevad erinevate teadusharude nähtustel ja on võimelised, vastavalt tehnoloogiale, laengut hoidma mõnest sekundist kuni aastate pikkuste perioodideni. Tehnoloogilise lahenduse järgi jaotuvad energiasalvestid:

- Mehaanilistel põhimõtetel töötavad energiasalvestid;
- Keemilistel põhimõtetel töötavad energiasalvestid;
- Elektrokeemilistel põhimõtetel töötavad energiasalvestid;
- Elektrotehnilistel põhimõtetel töötavad energiasalvestid;
- Soojustehnika põhimõtetel töötavad energiasalvestid.

Mehaanilistel põhimõtetel töötavatest energiasalvestitest on enim levinud hooratas-energiasalvesti, suruõhk-energiasalvesti ning pump-hüdroakumulatsioonijaam. Keemilistel põhimõtetel saab energiat salvestada erinevate keemiliste kütustena, näiteks vesinikuna. Elektrokeemilisi nähtusi kasutatakse akupatareides energia salvestamiseks. Elektrotehnilistel põhimõtetel toimib energiasalvestus üli-kondensaatorites ning ülijuhtivates mähistes. Soojustehnika põhimõtteid kasutatakse energia säilitamiseks soojussalvestites.

Energiasalvestustehnoloogiaid kasutatakse maailmas paljudel erinevatel eesmärkidel. Enamlevinud neist on:

- Energia arbitraaž – energiat ostetakse ning salvestatakse madala hinna korral ning kasutatakse või müüakse, kui hind on kõrge;
- Sageduse reguleerimine – tagatakse, et võrgu sagedus jääks etteantud piiridesse, reguleerides, et elektrienergia tarbimine ning võrku andmine oleks tasakaalus;
- Pinge toetus – reaktiivenergia võrku andmine või võrgust tarbimine tagamaks, et võrgu pinge jääks etteantud piiridesse;
- Pimekäivitus - energiat salvestatakse olukordadeks, kui on tarvis süsteem/elektrijaam taaskäivitada ilma võrgust saadava elektrita;
- Reservvõimsus – energiat salvestatakse ning säilitatakse olukordadeks, kui mingil põhjusel tekib ootamatu võimsuse puudujääk. Nt mõne generaatori süsteemist väljalülitumine;

- Võrguühenduseta mikrovõrgud - energiat salvestatakse olukordadeks, kui mikrovõrgus olevate tootmiseseadmetega parasjagu elektrit toota ei saa või pole nende antav toodang piisav kogu tarbimise katmiseks. Enamlevinud on see võrkudes, kus on kasutusel ainult või peamiselt tuulegeneraatorid ning päikesepaneelid;
- Investeeringute edasi lükkamine ning võrgu läbilaskevõime probleemide lahendamine – elektrienergiat salvestatakse madala tarbimisnivoo juures ning kasutatakse ajal, kui on suurem tarbimine. Eesmärgiks on vähendada kindlaks määratud liinile langeva koormuse hulka tiputundide ajal, kuna liini läbilaskevõime on madalam kui tipukoormus;
- Koormuse nihutamine ning koormustippude vähendamine – energiat salvestatakse kui elektritoodangut on rohkem tarbimisest ning tarvitatakse salvestist, et katta energiatarvet tiputundide ajal. Nt. taastuenergia elektritoodangu nihutamine tarbimise ajale ja baaselektrijaamade koormuse ühtlustamine.

2021 aasta lõpu seisuga oli maailmas installeeritud, võrguga ühendatud ning töövalmis 173,55 GW jagu energiasalvestusvõimsust. Lisaks sellele oli ehitusfaasis 0,63 GW jagu energiasalvestusseadmeid ja lepinguid oli sõlmitud täiendava 2,97 GW energiasalvestusvõimsuse rajamiseks. [2]

Tuleviku vaates nähakse energiasalvestusseadmete ühe laialdasemat ning kiirenevat kasutuselevõttu. Maailmas on toimumas üleminek mitte fossiilkütustel põhinevale energiale, kus omavad suurt osakaalu kõikuva toodanguga taastuvaenergiaallikad nagu tuule- ja päikeseenergia. Sellest tulenevalt on muutumas ka energiavõrkude struktuur, kus tsentraalselt tootmiselt toimub üleminek hajatootmisele. Energiasalvestussüsteemide kasutamine toetab võrkude stabiilsust ning töökindlust, toetab taastuvaenergiaallikate integreerimist võrku ja lubab optimeerida nii võrgu struktuuri, kui ka energia kasutust selles.

Energiasalvestussüsteemid on siiani olnud küllaltki kallid, mis on muutnud nende kasutamise mitte tasuvaks ning piiranud nende laialdasemat kasutust energiavõrkudes. See olukord on nüüd aga muutumas, kus tulenevalt suurtest investeeringutest viimasel dekaadil arendustegevusse ning seadmete suurematest tootmismahitudest, on tehnoloogia hind oluliselt soodsamaks muutunud, samal ajal kui energiakandjate hinnad on viimastel aastatel oluliselt tõusnud ning nende hinna varieeruvuse vahemik suurenenud.

1.2 Ülevaade energiasalvestite tehnilistest lahendustest

1.2.1 Energiasalvestustehnoloogiad

Hooratas-energiasalvesti on inertsil põhinev energiasalvestusseade. Energia salvestatakse kineetilise energiana hooratta pöörlevas massis. Enamasti koosnevad hooratas energiasalvestid kolmest peamisest osast: hoorattast, mootor-generaatorist ning muundurist. Energia salvestamiseks kiirendatakse hooratas elektrienergia toel suurtele kiirustele kasutades mootor-generaatorit mootori režiimis. Salvestist energia kätte saamiseks kasutatakse mootor-generaatorit generaatori režiimis, mida käitab hooratas oma pöörlemisenergiaga, tootes elektrienergiat. Hooratas-energiasalvesti kasutegur võib küündida kuni 95%-ni [3]. Hooratasenergiasalvesti eeliseks on selle pikk eluiga, kiire reageerimisaeg ning suur ühikvõimsus. Negatiivseks küljeks on aga tema võime säilitada energiat ainult lühikesteks perioodideks ja madal energiatihedus.

Akupatareides salvestatakse energiat kasutades elektrokeemilisi protsesse. Akupatareid koosnevad üldjuhul ühest või enamast elektrokeemilisest akuelemendist. Akuelemendid koosnevad anoodist ehk negatiivsest elektroodist, katoodist ehk positiivsest elektroodist ning elektroode ümbritsevast elektrolüüdist. Akuelemendid võidakse omavahel ühendada jadamisi või paralleelis, et saavutada soovitud aku pinget ja võimsust. Elektrivoolu tekitamiseks liiguvad elektronid anoodilt katoodile läbi akupatarei klemmidele ühendatud välise elektriahela. Akupatareis energia salvestamiseks ehk aku laadimiseks ühendatakse selle klemmidele väline vooluallikas. See muudab vastupidiseks akupatareis toimuva keemilise reaktsiooni ning taastab aku laetud oleku, kus elektronid suunatakse katoodilt tagasi anoodile. Tänapäevaks on välja töötatud palju erinevaid akupatareide tüüpe: pliiakud, liitium-ioonakud, nikkelmetallhüdriidakud, nikkel-kaadiumakud, naatrium-väävelakud, vanaadium-redoksakud, jpt. Akupatarei-energiasalvestite kasutegur vastavalt tehnoloogiale võib ulatuda isegi kuni 98%-ni. Akupatareide eeliseks on nende kiire reageerimisaeg, pikk eluiga, kõrge kasutegur, kõrge energiatihedus ning suur ühikvõimsus. Puudustena võib aga välja tuua nende kõrge hinna ning võimalikku ohtu keskkonnale. Oma kompaktsuse, kõrge kasuteguri ning hea jälgitavuse ning juhitavuse tõttu on akupatareid väga sobivad kasutamiseks tehasetootelistes ja teisaldatavates energiasalvestitega alajaamades.

Pump-hüdroakumulatsioonijaamad salvestavad energiat vee potentsiaalse energiana. Pump-hüdroakumulatsioonijaamad koosnevad enamasti kahest erineval kõrgusel asuvast veereservuaarist, mis on omavahel ühendatud lüüsiga ning lüüsil asuvast pump-hüdrogeneraatorist. Energia salvestamiseks pumbatakse vett alumisest

reservuaarist kõrgemal asuvasse reservuaari kasutades selleks pump-hüdrogeneraatorit pumba režiimis. Salvestatud energia taaskasutamiseks lastakse ülemisse reservuaari pumbatud veel joosta tagasi alumisse reservuaari, läbi pump-hüdrogeneraatori, mis nüüd töötab generaatori režiimis, tootes elektrienergiat.

Pump-hüdroakumulatsioonijaamad on tänapäeval enim kasutatud (enim installeeritud salvestusmahtuvust) energiasalvestusviis suurtes elektrisüsteemides. Selle energiasalvestusviisi kasutegur jääb üldjuhul vahemiku 70-85 % [4]. Pump-hüdroakumulatsioonijaamade eeliseks on suur energiasalvestusmahtuvus ja suur ühikvõimsus, pikk eluiga ning kiire reageerimisaeg. Negatiivseks küljeks on mõju keskkonnale ning vajadus spetsiifilise asukoha järele: suur kõrguste vahe, veeressursi olemasolu.

Suruõhk-energiasalvestis kasutatakse kokku surutud õhku energia salvestamiseks. Suruõhk-energiasalvesti peamised osad on kompressor, suruõhu reservuaar ning generaator koos turbiiniga. Suruõhu reservuaarina eelistatakse kasutada olemasolevaid, õhutihedaid, maa-aluseid tühimike, hoidmaks kokku kulusid. Hästi sobivad selleks vanad soolakaevandused või poorsed kivimid. Energia salvestamiseks surutakse, kompressorit kasutades, õhk reservuaari, kus seda hoiustatakse kõrge rõhu all. Salvestatud energia kasutamiseks vabastatakse rõhu all olev õhk ning juhitakse see läbi turbiini, millega käitatakse generaatorit ja toodetakse elektrienergiat. Suruõhk-energiasalvesti täistsükli kasutegur jääb vahemiku 27-70 % [5] olenevalt kasutatud tehnoloogiast. Suruõhk-energiasalvesti eeliseks on suur energiamahutuvus, võimalus energiat salvestada pikaks perioodiks ja pikk eluiga. Negatiivse küljena saab aga välja tuua tema madala kasuteguri ning vajadus spetsiifilise sobiva asukoha järele.

Ülikondensaator-energiasalvestid koosnevad ülikondensaatoritest, mida nimetatakse ka kaksikkihtkondensaatoriteks ning milles kasutatakse elektrostaatilist välja, energia hoiustamiseks. Ülikondensaator on suure mahutuvusega kondensaatori tüüp, mis koosneb kahest elektroodist, kahest voolukollektorist, elektrolüüdist ning separaatorist. Elektroodid on valmistatud poorsest süsinikust, millel on suur efektiivpind ja mis lubab saavutada suuri kondensaatori mahutuvusi. Elektroodid kinnituvad voolukollektoritele, mis on enamasti valmistatud metalsetest fooliumitest (nt alumiinium). Voolukollektorid on mõeldud ühendamaks elektroode ülikondensaatori klemmidega (positiivne ja negatiivne). Elektrolüüt paikneb elektroodide pinnal ning selles sisalduvad positiivsed ning negatiivsed laengukandjad. Separatuur on mõeldud elektroodide eraldamiseks üksteisest, vältimaks lühist. Ülikondensaatorid on kiire reageerimisajaga, nad on kiirelt laetavad ning tühjendatavad. Sobivad lühiajaliselt andma välja suurt võimsust. Ülikondensaator-energiasalvestite kasutegurid küündivad tüüpiliselt kuni

95 %-ni [5]. Selle lahenduse eelisteks on kõrge kasutegur, pikk eluiga, vähene hooldusvajadus ning suur ühikvõimsus. Puuduseks on aga madal energiatihedus.

Ülijuhtivad mähised on energiasalvestuslahendus, kus energiat salvestatakse magnetvälja kujul. Magnetväli tekitatakse alalisvoolu poolt, pooli mähises, mis on jahutatud madalale temperatuurile. Ülijuhtivates materjalides madalatel temperatuuridel takistus peaaegu puudub, mille tõttu elektrivool nendes võib ringelda pikemat aega ilma energiat kaotamata ka siis, kui sellelt on pingeallikas lahti ühendatud. Seda energiasalvestusviisi iseloomustab kiire reageerimisaeg ning nad on kiirelt laetavad ning tühjendatavad. Ülijuhtivad energiasalvestid koosnevad ülijuhtivast mähisest, toitesüsteemist, jahutist ning kontrollsüsteemist. Ülijuhtivate energiasalvestite kasutegurid ulatuvad 95 %-ni [5]. Selle energiasalvestus-süsteemi eelisteks on kiire reageerimisaeg, pikk eluiga, kõrge efektiivsus ning suur ühikvõimsus. Negatiivse külje pealt saab välja tuua madala energiatiheduse.

Soojussalvestites salvestatakse energiat juhtides soojust, salvestavale ainele, tõstes selle temperatuuri. Salvestatud energia kätte saamiseks eemaldatakse soojus salvestavalt ainelt. Soojuse salvestamiseks on välja töötatud palju erinevaid lahendusi ning sellel on palju erinevaid rakendusi. Soojussalvesteid jaotatakse kontseptsiooni järgi aktiivseteks ja passiivseteks või toimimispõhimõtte järgi faasimuutuseta, faasimuutusega ning keemilisteks. Soojussalvestite kasutegur jääb vahemikku 50-90 % [6] sõltuvalt kasutatavast tehnilisest lahendusest.

Vesinik-energiasalvestis salvestatakse energiat vesiniku kujul. Vesinikku saab toota veest elektrolüüsi teel, salvestades nõnda elektrienergiat. Toodetud vesiniku saab muundada tagasi elektrienergiaks, kasutades kütuseelemente, või kasutada kütusena. Vesiniku saab säilitada rõhu all gaasina, veeldatud kujul, madalal temperatuuril või tahkes faasis (materjalide pinnal, absorbeerununa materjali sees või seotuna hüdriididesse). Vesinik-energiasalvestite kasutegurid küünivad tüüpiliselt 50 %-ni [5].

1.2.2 Turul pakutavad nutikad energiasalvestiga madalpingealajaamad

Merus Power on energiasalvestuslahendusena välja töötanud tooteseeria Merus™ Energy Storage System (ESS) (Joonis 1.2.2.1). Nimetatud energiasalvestuslahendus on disainitud ja sobilik reservvõimsuse tagamiseks, sageduse reguleerimiseks, pimekäivituste tegemiseks, energia arbitraažiks, elektrivõrgu läbilaskevõime optimeerimiseks, koormuste nihutamiseks, koormustippude vähendamiseks, elektrisüsteemi stabiilsuse tõstmiseks, taastuenergiaallikate energiavoogude juhtimiseks. Tegum on tehasetooteliste konteinertüüpi salvestusalajaamadega, mis on

modulaarne ning skaleeritav. Kõnealune toode on lisaks aktiivvõimsuse salvestamisele võimeline genereerima ka reaktiivenergiat. Alajaam on digitaalselt reaalajas monitooritav ning juhitav. Salvestusalajaamale on võimalik juurde lisada jõutrafo, mis võimaldab alajaama ühendamist ka otse keskpingevõrguga.



Joonis 1.2.2.1 Merus™ Energy Storage System (ESS) energiasalvestusalajaam. [7]

Merus™ Energy Storage System (ESS) energiasalvestusalajaama tooteseria tehnilised parameetrid on: [7]

Nimipinge: 400...690 VAC

Installeeritud võimsus: 3080 ... 8360 kW

Salvestusmahtuvus: 1540...4180 kWh

Akude tüüp: liitium-ioon

Akupanga pinge: 588...1500 VDC

Eeldatav eluiga: 10 aastat

ABB on energiasalvestuslahendusena välja töötanud tooteseria eStorage Flex (Joonis 1.2.2.2). Selle tooteseria alajaamad on disainitud ning sobilikud koormustippude vähendamiseks, sageduse reguleerimiseks, taastuenergiaallikate energiavoogude juhtimiseks, energia arbitraažiks, elektrisüsteemi stabiilsuse tõstmiseks, koormuste nihutamiseks ja elektrivõrgu läbilaskevõime optimeerimiseks. ABB eStorage Flex tooteseria puhul on tegu tehasetooteliste konteinertüüpi salvestusalajaamadega. Antud toode on lisaks aktiivvõimsuse salvestamisele võimeline genereerima ka reaktiivenergiat. Alajaam on digitaalselt reaalajas monitooritav ning juhitav. Salvestusalajaamale on võimalik juurde lisada jõutrafo, mis võimaldab alajaama ühendamist ka otse keskpingevõrguga.



Joonis 1.2.2.2 ABB eStorage Flex energiasalvestusalajaam. [8]

ABB eStorage Flex energiasalvestusalajaama tooteseeria tehnilised parameetrid on: [8]

Nimipinge: 400...480 VAC

Maksimum väljundvõimsus: 85...1400 kVA

Salvestusmahtuvus: 95...1550 kWh

Akude tüüp: liitium-ioon

2 Tööstustarbijate vajaduste ülevaade

2.1 Ülevaade tööstustarbijatest

Tööstustarbijad kasutavad elektrienergiat kaupade tootmiseks, töötlemiseks ning koostamiseks. Tööstussektor on üks suurimaid elektritarbijaid nii Eestis kui ka mujal maailmas. 2016 aastal avaldatud andmete alusel tarbiti tollel aastal tööstustarbijate poolt 22,1% kogu Eestis tarbitud elektrienergiast [9]. Eelnevast tulenevalt on elektrienergia oluline sisend tööstussektorile ning selle hind omab olulist mõju paljude tööstusettevõtete kuludele ning seeläbi ka tegevuse kasumlikkusele. Seda eriti nüüd, kus elektrienergia hind on tõusnud oluliselt võrreldes varasemaga ning on oodata ka selle tõusu jätkumist.

Tööstussektori võime reageerida operatiivselt elektrihinna muutustele on piiratud. Vajalikud tegevused tuleb läbi viia ettemääratud tööaja jooksul, mis enamasti jääb kõrgema elektrihinna päevasele ajale. Töö ümberkorraldamist soodsama elektrihinna ajale takistavad töötajate vastuseis või ka juba kasutusel olev mitme vahetusega töösüsteem. Energiasäästlikumate seadmete kasutuselevõtt nõuab enamasti suuri investeeringuid ning omab üldjuhul piiratud efekti.

Tööstustarbijate omapäraks on suur elektriseadmete osakaal. Kasutatakse palju erinevaid elektrit tarbivaid seadmeid: valgustid, pumbad, konveierid, mootorid, muundurid, jahutus-/külmutusseadmed, kompressorid, tööstus-robotid, ahjud/kütteseadmed, kui nimetada mõned neist.

Tööstusettevõtete elektri tarbimist mõjutavad mitmed tegurid:

- Ettevõttes kasutusel olevad seadmed – kui palju ja millise võimsusega seadmeid kasutatakse ning kas seadmed on töös pidevalt või ainult teatud hetkedel;
- Aastaaeg – elektrikasutuse sõltuvus aastaajast. Nt suvel kulub vähem elektrit küttele ning valgustusele, kui talvisel ajal, samas kui jahutusele kulub rohkem elektrienergiat;
- Ettevõtte äritegevuse sesoonsus – kas ettevõtte toodangu järgi on pidev ühtlane vajadus, või kõigub see tulenevalt mingist asjaolust. Nt vihikute järele on vajadus suurem kooliaasta kestel, kui kooliaasta välisel ajal, samal ajal nõudlus leiva järele on palju ühtlasem terve aasta vältel;
- Vahetustega töö – kas töö toimub ühes või enamas vahetuses;
- Nädalapäev – kas ettevõtte töötab ainult tööpäevadel või toimub töö ka nädalavahetustel;
- Muud tegurid – nt kollektiivpuhkused, seadmete hooldused, riiklikud pühad

Mainitud tegurite koosmõjus kujuneb igale tööstustarbijale iseloomulik tarbimisprofiil.

2.2 Lõputöös uuritavad tööstustarbijad ja nende profiilid

2.2.1 Tööstustarbija 1

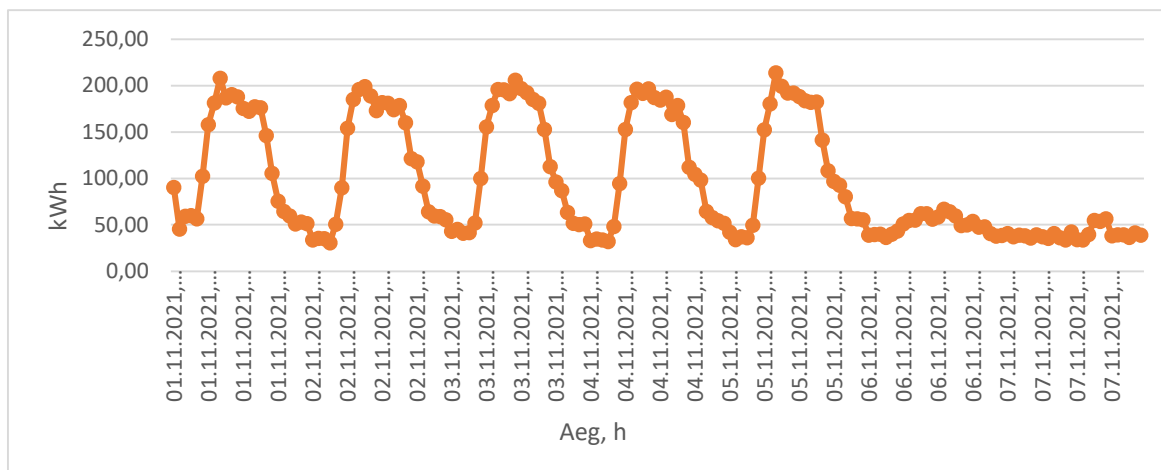
Tööstustarbija 1 on tööstusettevõtte, mis tegeleb madal- ning keskpinge elektri jaotus-seadmete valmistamisega. Ettevõtte tootmine on jaotatud kahe tootmishoone vahel, millest kumbki saab toite erinevast liitumispunktist. Lisaks on sellel tööstustarbijal ka kolmas liitumispunkt, millest toidetakse eraldiseisvat laohoonet. Antud lõputöös vaadeldakse elektritarbimist tootmishoones, milles toimub selle tööstustarbija suurim elektritarbimine. Nimetatud tootmisüksuse elektritarve 2021 aastal oli 819,3 MWh. Maksimaalne elektritarve 2021 aastal selles tootmistsehhis ühe tunni jooksul oli 236,94 kWh ning minimaalne elektritarve ühe tunni jooksul oli 4,92 kWh. Elektritarve tööstustarbija 1 valitud tootmishoones, kuude lõikes, on välja toodud tabelis 2.2.1.1. Tööstustarbija poolt kasutatav reaktiivenergia kompenseeritakse kohapealsete kondensaator-seadmetega ning võrgust tarbitav ning võrku antav reaktiivenergia on marginaalne.

Tabel 2.2.1.1 Tööstustarbija 1 valitud tootmishoone elektritarve kuude lõikes

Kuu	Tarbimine [MWh]
Jaanuar	62,54
Veebruar	62,26
Märts	69,42
Aprill	64,54
Mai	65,07
Juuni	64,50
Juuli	77,95
August	75,77
September	72,72
Oktoober	70,32
November	71,27
Detsember	62,92

Enim elektrienergiat tarvitavad selles tootmishoones järgmised seadmed: sise- ja välisvalgustus, ventilatsiooniseadmed, suruõhukompressor, elektrilised tööpingid, pistikupesad teisaldatavatele tööriistadele ning telfer. Tootmine toimub ühes vahetuses tööpäevadel, mille jooksul toimub ka suurim osa elektrienergia tarbimisest.

Puhkepäevadel ning riiklike pühade ajal tootmist tavapäraselt ei toimu. Tööstustarbija 1 ühe nädala tarbimist iseloomustab graafik joonisel 2.2.1.1. Seadmete hooldused viiakse läbi tootmistegevuse välisel ajal, millest tulenevalt see tööstustarbija elektritarbimisele mõju ei avalda. Ettevõttes toimus 2021 aastal kollektiivpuhkus, mis leidis aset detsembris ning kestis 14 päeva. Kollektiivpuhkuse ajal sarnaneb ettevõtte elektritarbimine nädalavahetuste elektritarbimisele.



Joonis 2.2.1.1 Tööstustarbija 1 ühe nädala tarbimist iseloomustav graafik.

Tööstustarbija 1 peamine elektrikasutus toimub tööpäevadel, päevasel ajal 8-9 tunni vältel, millele eelneb 3-4 tunnine kiire tõusuperiood ning järgneb samuti 3-4 tunnine kiire langusperiood. Järelejäänud perioodil, tööpäevade vahelisel ajal ning nädalavahetustel, on elektritarbimine madalseisus, moodustades ca 25 % tööpäevasest kõrgtasemest.

2.2.2 Tööstustarbija 2

Tööstustarbija 2 on tööstusettevõtte, mis tegeleb metallitöödega. Peamiseks tegevusalaks on lehtmetailtoodete valmistamine, koostamine ning pulbervärvimine allhanketöona aga valmistatakse ning turustatakse ka enda väljatootatud tooteid.

Ettevõtte tootmine koosneb kahest tootmishallist, kahest pulbervärviliinist koos pesuliinidega ning ladustamis- ja komplekteerimisaladest. Tootmishooned saavad toite kahest eraldiseisvast liitumispunktist. Antud lõputöös vaadeldakse elektritarbimist selle tööstusettevõtte suurima tarbimisega liitumispunktis, mis toidab pulbervärviliine. Elektritarve nimetatud liitumispunktis 2021 aastal oli 1712,7 MWh. Maksimalne elektritarve 2021 aastal selles liitumispunktis ühe tunni jooksul oli 495,13 kWh ning minimalne elektritarve ühe tunni jooksul oli 12,99 kWh. Elektritarve tööstustarbija 2 valitud liitumispunktis, kuude lõikes, on välja toodud tabelis 2.2.2.1.

Tabel 2.2.2.1 Tööstustarbija 2 elektritarve valitud liitumispunktis kuude lõikes

Kuu	Tarbimine [MWh]
Jaanuar	125,04
Veebruar	125,61
Märts	152,74
Aprill	155,53
Mai	146,96
Juuni	137,25
Juuli	154,99
August	156,80
September	163,97
Oktoober	149,22
November	146,35
Detsember	98,25

Ettevõtte tarbib võrgust teatava koguse reaktiivenergiat, reaktiivenergia kompenseerimist kohapeal ei toimu. Tööstustarbija 2 tarbitud ning võrku antud reaktiivenergia kogused valitud liitumispunktis on välja toodud tabelis 2.2.2.2.

Tabel 2.2.2.2 Tööstustarbija 2 reaktiivenergia tarbimine valitud liitumispunkti kaudu kuude lõikes

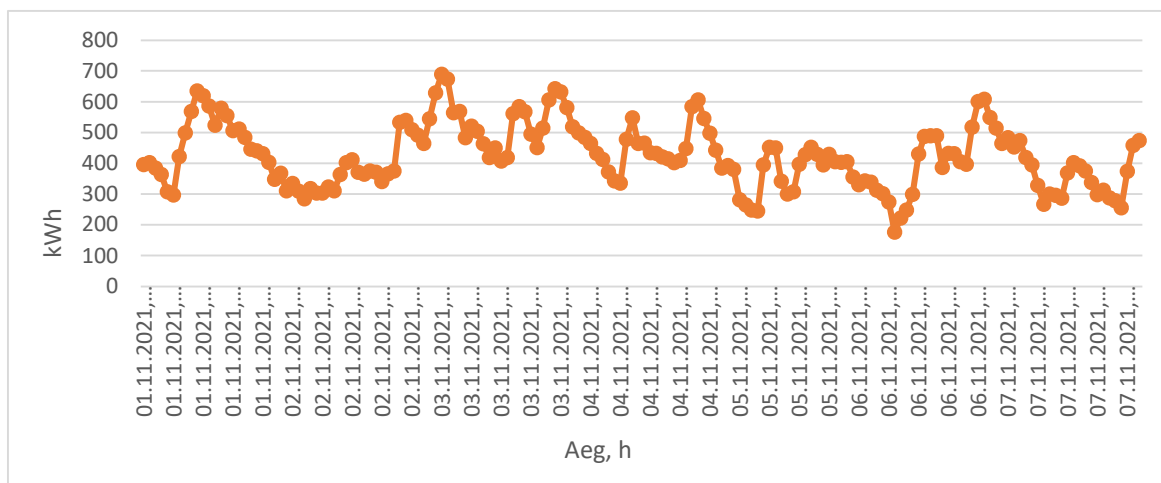
Kuu	Võrgust tarbitav reaktiivenergia [MVARh]	Võrku antav reaktiivenergia [MVARh]
Jaanuar	23,71	1,30
Veebruar	23,52	1,19
Märts	29,27	1,44
Aprill	30,89	1,19
Mai	29,87	1,13
Juuni	32,80	0,39
Juuli	38,71	0,00
August	37,22	0,00
September	37,90	0,08
Oktoober	36,67	0,03
November	35,20	0,07
Detsember	19,73	1,95

Suurimateks elektritarvititeks, mida toidetakse läbi vaadeldava liitumispunkti, on järgmised seadmed: värviliinide ahjud, värviliinide pesuliinid ning suruõhukompressorid. Töö värviliinidel toimub kahes vahetuses tööpäevadel, mille jooksul toimub ka suurim osa elektrienergia tarbimisest. Puhkepäevadel ning riiklike pühade ajal tootmist tavapäraselt ei toimu. Tööstustarbija 2 ühe nädala tarbimist

Tabel 2.2.3.1 Tööstustarbija 3 elektritarve valitud liitumispunktis kuude lõikes

Kuu	Tarbimine [MWh]
Jaanuar	238,64
Veebruar	277,75
Märts	318,45
Aprill	312,21
Mai	300,69
Juuni	249,43
Juuli	168,05
August	279,72
September	291,99
Oktoober	301,02
November	296,53
Detsember	162,45

Suurimaks elektritarvitiks, mida toidetakse läbi vaadeldava liitumispunkti, on kaablitootmisliin. Töö selles tööstusettevõttes toimub kolmes vahetuses, kõikidel nädalapäevadel. Töö toimub ka riiklike pühade ajal. Kaablitootmisliini töö peatatakse ainult hoolduste ning kollektiivpuhkuste ajaks, mis üldjuhul omavahel ühildatakse. Seadmete hooldused viiakse läbi kollektiivpuhkuste ajal, millest tulenevalt see tööstustarbija elektritarbimisele eraldi mõju ei avalda. Tööstustarbija 3 ühe nädala tarbimist iseloomustab graafik joonisel 2.2.3.1. Ettevõttes toimus 2021 aastal kaks kollektiivpuhkust, mis leidsid aset juulis ning detsembris ning kestsid mõlemad 14 päeva. Kollektiivpuhkuse ajal on antud tootmisüksuses elektrienergia tarve üsna madal, moodustades ca 10 % tavapärastest elektritarbe tippudest.



Joonis 2.2.3.1 Tööstustarbija 3 ühe nädala tarbimist iseloomustav graafik.

Tööstustarbija 3 puhul toimub pidev elektrikasutus, teatud kõikumistega päeva jooksul. Tarbimine toimub kõikidel päevadel kogu nädala jooksul, k.a. nädalavahetustel ning riiklikel pühadel.

2.3 Lähteülesanded tööstustarbijatele plaanitavatele salvestuslahendustele

2.3.1 Tööstustarbija 1 lähteülesanne salvestuslahendusele

Tööstustarbija 1 peamine elektrikasutus jääb päevasele ajale tööpäevadel, millal ka elektrihind on üldjuhul kõige kõrgem. Tulenevalt üha kallinevast elektrienergia hinnast, mille mõju avaldus eriti tugevalt 2021 aastal, on ettevõtte üheks suurimaks mureks elektrivarustusel sisendhinna kiire kasv.

Tööstustarbija saaks kokku hoida elektrienergia soetuskuludelt kasutades sobivat energiasalvestiga alajaama, ostes elektrienergia madala hinna korral, salvestades selle alajaama akupangas ning kasutades seda kõrge elektrihinna korral. Energiasalvestuslahenduse tõhusust saab tõsta müües tagasi võrku salvestatud energiat kõrge elektrihinna korral, kui ettevõtte omatarve on väiksem kui salvestatud energia kogus. Seda siis kas tööpäevade kestel või nädalavahetustel, kui tööstusettevõtte tehases tootmist ei toimu.

Parameetrid millele Tööstustarbija 1 salvestusalajaam peab vastama:

- Vastab kõikidele asjakohastele seadustele ning standarditele;
- On ohutu kasutajatele ning keskkonnale;
- On kompaktne ja tehasetooteline ning valmiskujul objektile tarnitav;
- On digitaalselt jälgitav ning juhitav;
- Salvestusintervall on üks ööpäev, mille jooksul toimub alajaama akupanga täis- ning tühjakslaadimine;
- Alajaama salvesti on nii täis- kui tühjakslaetav ühe tunni jooksul;
- On elektrivõrguga ühendatav/sünkroonitav;
- Salvestusalajaama nimipinge on 400 VAC.

2.3.2 Tööstustarbija 2 lähteülesanne salvestuslahendusele

Tööstustarbija 2 peamine elektrikasutus jääb varahommikusele ning päevasele ajale tööpäevadel, mis üldjuhul kattub suuremas osas ka ajaga, millal elektrihind on kõige kõrgem. Tulenevalt üha kallinevast elektrienergia hinnast, mille mõju avaldus eriti tugevalt 2021 aastal, on ettevõtte üheks suurimaks mureks elektrivarustusel sisendhinna kiire kasv. Lisaks tarbib ettevõtte arvestatavas koguses reaktiivenergiat, mis suurendab omakorda veelgi ettevõtte kulusid elektrienergiale.

Tööstustarbija saaks kokku hoida elektrienergia soetuskuludelt kasutades sobivat energiasalvestiga alajaama, ostes elektrienergia madala hinna korral, salvestades selle alajaama akupangas ning kasutades seda kõrge elektrihinna korral. Energiasalvestus-

lahenduse tõhusust saab tõsta veelgi kasutades seda lisaks ka reaktiivenergia genereerimiseks.

Parameetrid, millele Tööstustarbija 2 salvestusalajaam peab vastama:

- Vastab kõikidele asjakohastele seadustele ning standarditele;
- On ohutu kasutajatele ning keskkonnale;
- On kompaktne ja tehasetooteline ning valmiskujul objektile tarnitav;
- On digitaalselt jälgitav ning juhitav;
- Salvestusintervall on üks ööpäev, mille jooksul toimub alajaama akupanga täis- ning tühjakslaadimine;
- Alajaama salvesti on nii täis- kui tühjakslaetav ühe tunni jooksul
- On elektrivõrguga ühendatav/sünkroonitav;
- On võimeline reguleerima reaktiivenergiat (nii tootma/kui tarbima);
- Salvestusalajaama nimipinge on 400 VAC.

2.3.3 Tööstustarbija 3 lähteülesanne salvestuslahendusele

Tööstustarbija 3 puhul toimub pidev aktiivne suuremahuline elektritarbimine, millest osa kattub ajaliselt ka elektri kõrge hinna perioodidega tööpäevadel ning nädalavahetustel. Tulenevalt üha kallinevast elektrienergia hinnast, mille mõju avaldus eriti tugevalt 2021 aastal, on ettevõtte üheks suurimaks mureks elektrivarustusel sisendhinna kiire kasv.

Tööstustarbija saaks kokku hoida elektrienergia soetuskuludelt kasutades sobivat energiasalvestiga alajaama, ostes elektrienergiat madala hinna korral, salvestades selle alajaama akupangas ning kasutades seda kõrge elektrihinna korral.

Parameetrid, millele Tööstustarbija 3 salvestusalajaam peab vastama:

- Vastab kõikidele asjakohastele seadustele ning standarditele;
- On ohutu kasutajatele ning keskkonnale;
- On kompaktne ja tehasetooteline ning valmiskujul objektile tarnitav;
- On digitaalselt jälgitav ning juhitav;
- Salvestusintervall on üks ööpäev, mille jooksul toimub alajaama akupanga täis- ning tühjakslaadimine;
- Alajaama salvesti on nii täis- kui tühjakslaetav ühe tunni jooksul;
- Salvestusalajaama nimipinge on 400 VAC.

2.4 Salvestitega seotud standardid

Elektriseadmete projekteerimiseks ning koostamiseks on välja töötatud suur hulk erinevaid standardeid. Elektriala standardite peamine väljatöötaja maailmas on

Rahvusvaheline Elektrotehnika Komisjon ehk IEC, kelle standardeid võetakse tihti üle teiste standardiseerimisorganisatsioonide poolt. Sellisteks organisatsioonideks on näiteks Euroopa Elektrotehnika Standardikomitee CENELEC, kelle poolt üle võetud IEC standardite lisatakse tähis EN või Eesti Standardiseerimis- ja Akrediteerimiskeskus, kelle poolt üle võetud standarditele lisatakse tähis EVS.

Standardid võivad olla kasutamiseks vabatahtlikud või kohustuslikud vastavalt erinevates riikides kehtestatud seadusandlusele. Allpool on välja toodud peamised standardid, mida kasutatakse energiasalvestiga madalpingealajaamade planeerimisel ning ehitamisel.

- EVS-EN IEC 62933-1:2018 - Electrical energy storage (EES) systems - Part 1: Vocabulary (eestikeelne tõlge puudub);
- EVS-EN IEC 62933-2-1:2017 - Electrical energy storage (EES) systems - Part 2-1: Unit parameters and testing methods - General specification (eestikeelne tõlge puudub);
- IEC TS 62933-3-1:2018 - Electrical energy storage (EES) systems - Part 3-1: Planning and performance assessment of electrical energy storage systems - General specification (eestikeelne tõlge puudub);
- IEC TS 62933-4-1:2017 - Electrical energy storage (EES) systems - Part 4-1: Guidance on environmental issues - General specification (eestikeelne tõlge puudub);
- IEC TS 62933-5-1:2017 - Electrical energy storage (EES) systems - Part 5-1: Safety considerations for grid-integrated EES systems - General specification (eestikeelne tõlge puudub);
- EVS-EN IEC 62933-5-2:2020 - Electrical energy storage (EES) systems - Part 5-2: Safety requirements for grid-integrated EES systems - Electrochemical-based systems (eestikeelne tõlge puudub);
- EVS-EN IEC 63056:2020 - Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Safety requirements for secondary lithium cells and batteries for use in electrical energy storage systems (eestikeelne tõlge puudub);
- EVS-EN IEC 62619:2022 - Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Safety requirements for secondary lithium cells and batteries, for use in industrial applications (eestikeelne tõlge puudub);
- EVS-EN IEC 61439-1:2021 - Madalpingelised aparaadikoosted. Osa 1: Üldreeglid;
- EVS-EN IEC 61439-2:2021 - Madalpingelised aparaadikoosted. Osa 2: Jõuaparaadikoosted;

- EVS-EN IEC 62477-1:2012 - Jõupooljuht-muundussüsteemide ja -muundusseadmete ohutusnõuded. Osa 1: Üldnõuded;
- EVS-EN IEC 61000-1-2:2016 - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 1-2: General - Methodology for the achievement of functional safety of electrical and electronic systems including equipment with regard to electromagnetic phenomena (eestikeelne tõlge puudub);
- EVS-EN IEC 61000-6-2:2019 - Elektromagnetiline ühilduvus. Osa 6-2: Erialased põhistandardid. Häiringutaluvus tööstuskeskkondades;
- EVS-EN IEC 61000-6-4:2019 - Elektromagnetiline ühilduvus. Osa 6-4: Erialased põhistandardid. Tööstuskeskkondade kiirguslike häiringute standard.

3 Energiasalvestusseadmete valikud

3.1 Sissejuhatus

Seadmete valikul energiasalvestiga alajaamadele tuleb arvestada mitmeid erinevaid aspekte. Arvesse tuleb võtta nii tehnilisi, majanduslikke kui ka seadusandlusest tulenevaid tegureid.

Seadustega näevad riigid ette nõuded elektriseadmetele, millele need vastama peavad, et neid tohiks vastaval territooriumil kasutusele võtta. Tegu võib olla näiteks piirangutega keemiliste ühendite kasutamisele, piirangutega teatud liiki häirete tekitamisele seadme poolt või seadet ümbritsevate inimeste ohutuse tagamisega. Näitena võib tuua Eestis ning mujal Euroopa Liidus kehtiva nõude, et madalpingeseadmed peavad omama CE märgistust ning vastama RoHS direktiivile.

Majanduslikust vaatest tuleb tagada, et alajaama jaoks valitud seadmete hinnad oleksid aktsepteeritava kvaliteedi juures võimalikult soodsad, tagades lõpptoote konkurentsivõimelist ning kliendile sobilikku hinnataset. Eelistatud on investeringud, mis võimalikult tasuvad ning ennast kiiresti tagasi teenivad.

Tehnilise külje pealt jälgitakse, et sobivate seadmete valimisel oleks arvesse võetud kõik vajalikud tehnilised parameetrid, mis lõpptoote tööd mõjutavad. Valitud seadmed peavad olema omavahel ühilduvad ning sobima integreerituna koos töötama. Oluline on toote jaoks määratud seadmetega saavutada kliendi soovitud lõpptulemuse täitmine. Energiasalvestiga nutika madalpingealajaama kõige olulisemateks seadmeteks on muundurid ehk inverterid, salvestid ehk akupangad ning juhtimisseadmed. Nende seadmete valimisel antud lõputöös kirjeldatud lahenduste jaoks tuleks jälgida järgnevat:

Muundurid ehk inverterid

- Energiasalvestiga alajaamadele, mis võtavad elektrienergia võrgust, salvestavad selle ning hiljem tagastavad salvestatud elektrienergia tagasi võrku, on sobilikud kahe-suunalised akuinverterid;
- Inverter peab olema võrguga sünkroniseeritav;
- Inverteri puhul üheks olulisemaks parameetrik on tema nimivõimsus;
- Inverteri võimsuse valimisel tuleb arvestada peale vajatava väljundvõimsuse ka kadusid inverteris energia muundamisel ning akupangas energia salvestamisel. Inverteri kadude suurust iseloomustab tema kasutegur;
- Kahe-suunaliste akuinverterite korral tuleb arvestada muunduri kasuteguriga kahekordselt. Esmalt vahelduv võrgupinge muundamisel alalispingele ning hiljem alalispingelt tagasi võrgu vahelduvpingele;

- Tänapäevaste muunduritega on võimalik toota ning tarbida reaktiivenergiat. Reaktiivenergia reguleerimise võimekuse vajaduse korral tuleb veenduda, et valitud seadmel on nimetatud funktsionaalsus olemas;
- Alalispinge muundamisel tagasi võrgu vahelduvnimipingeks peab inverteri vahelduvnimipinge sobituma võrgu nimipingega ning inverteri alalispingega peab sobituma akupanga nimipingega;
- Inverteri juhtimise andmesideprotokoll peab ühilduma teiste süsteemi osade andmesideprotokollidega.

Salvestid ehk akupangad

- Akupanga peamiseks parameetrik on tema mahtuvus;
- Akupanga vajaliku mahtuvuse kalkuleerimisel on peale vajatava energia hulga tarvis arvesse võtta ka akude tühjakslaetavuse sügavust (DoD);
- Akupanga mahtuvuse määramisel tuleb arvestada, et akude mahtuvus alajaama eluajal ei jää samaks vaid väheneb aja jooksul;
- Akupanga nimipinge peab sobituma inverteri alalispinge vahemikuga;
- Akupangast saab kätte vähem energiat, kui kasutati selle laadimiseks. Seda nähtust iseloomustab akupanga kasutegur;
- Akupankade üheks oluliseks iseloomustavaks suuruseks on tema täis- ning tühjakslaadimise kiirus;
- Akupanga juhtimissüsteemi andmesideprotokoll peab saama ühildada teiste süsteemi osade andmesideprotokollidega.

Juhtimisseadmed

- Valitud juhtimisseadmetega peab olema võimalik lugeda infot alajaama teistest seadmetest ning juhtida neid ehk siis tema andmesideprotokoll peab ühilduma otse teiste süsteemi osade andmesideprotokollidega;
- Juhtimisseadmega peab olema võimalik ligipääs internetile andmete lugemiseks.

3.2 Muundurid

Allpool on välja toodud valik kahesuunalisi akuinvertereid, mis on sobilikud kasutamiseks integreeritud energiasalvestiga nutikates madalpinge alajaamades. Lõputöö kirjutamise raames kogutud info põhjal varieerusid muundurite hinnad väljundvõimsuse ühe kW kohta omavahel palju. Maksimaalne hind oli 180 €/kW, minimaalne hind oli 40 €/kW ning keskmiseks hinnaks kujunes 86 €/kW.

Sunny Tripower Storage 60 on Saksamaal asuva peakorteriga, rahvusvahelise ettevõtte SMA poolt toodetav ning turustatav kahe-suunaline akuinverter. Muundur on kõrge kasuteguriga, kompaksete mõõtudega ning seinale paigaldatav. Sobib kasutamiseks nii kommerts- kui ka tööstuslahendustes. Inverteri maksimaalne väljundvõimsus on 75 kVA, kuid suurema väljundvõimsuse vajaduse korral on võimalik süsteemi skaleerida ühendades mitu inverterit paralleeltööle. Lisaks võimaldab seade nii toota kui ka tarbida reaktiivenergiat. On tehniliselt sobilik elektrivõrguga paralleeltööle ühendamiseks ning on digitaalselt loetav ja juhitav kasutades Modbus andmesideprotokolli. Inverter on sobilik kasutamiseks koos liitium-ioon akudega. [10] Seadme olulisemad tehnilised parameetrid on välja toodud tabelis 3.2.1 ning seade ise on näidatud joonisel 3.2.1.

Tabel 3.2.1 Kahe-suunalise akuinverteri Sunny Tripower Storage 60 parameetrid [10]

Akupoolne ühendus:	
Maksimum laadimisvõimsus	60 000 W
Alalispinge vahemik	575...1000 V
Maksimaalne alalisvool	140 A
Sobiv aku tüüp	Li-ion
Võrgupoolne ühendus:	
Maksimaalne võimsus	75 000 W
Maksimaalne näivvõimsus	75 000 VA
Maksimaalne reaktiivvõimsus	75 000 Var
Nimi vahelduvpinge	3 / PE, 400 V, +/- 10%
Vahelduvpinge vahemik	360...530 V
Nimisagedus /-pinge	50 Hz / 400 V
Sagedusvahemik	44...55 Hz
Maksimaalne väljundvool	109 A
Vooluharmonikuid hindav tegur	≤ 1 %
Faaside arv väljundis/sisendis	3/3
Kasutegur:	
Maksimaalne kasutegur	98,80%
Üldandmed:	
Mõõdud	570 x 740 x 306 mm
Kaal	77 kg
Töötemperatuur	-25...+60 °C
Maksimaalne lubatav õhuniiskus	95%
Omatarve ooterežiimis	≤ 3 W
Andmeside protokoll	Modbus



Joonis 3.2.1 Kahesuunaline akuinverter Sunny Tripower Storage 60. [11]

blueplanet gridsave 92.0 TL3-S on Saksamaal asuva ettevõtte KACO poolt toodetav ning turustatav kahesuunaline akuinverter. On oma omadustelt väga sarnane eelnevale SMA inverterile. Muundur on kõrge kasuteguriga, kompaktsete mõõtudega ning seinale paigaldatav. Sobib kasutamiseks nii kommerts- kui ka tööstuslahendustes. Inverteri maksimaalne väljundvõimsus on 92 kVA, kuid suurema väljundvõimsuse vajaduse korral on võimalik süsteemi skaleerida ühendades mitu inverterit paralleeltööle. Lisaks võimaldab seade nii toota kui ka tarbida reaktiivenergiat. On tehniliselt sobilik elektrivõrguga paralleeltööle ühendamiseks ning on digitaalselt loetav ja juhitav kasutades Modbus andmesideprotokolli. Inverter on sobilik kasutamiseks erinevat tüüpi akudega. Samas tooteseerias pakub KACO ka väiksemat 50 kVA väljundvõimsusega akuinverterit. [12] Seadme olulisemad tehnilised parameetrid on välja toodud tabelis 3.2.2 ning seade ise on näidatud joonisel 3.2.2.

Tabel 3.2.2 Kahesuunalise akuinverteri blueplanet gridsave 92.0 TL3-S tehnilised parameetrid [12]

Alalisvoolu sisend:	
Pingevahemik	668...1100 V
Maksimaalne sisendvool	145 A
Maksimaalne lühisvool	300 A
Alalsivoolu sisendite arv	1
Vahelduvvoolu väljund:	
Nimivõimsus	92 000 VA
Maksimaalne võimsus	92 000 VA
Liinipinge	400 V
Nimisagedus	50 Hz
Sagedusvahemik	45...65 Hz
Nimivool	3 x 132,3 A
Maksimaalne vool	3 x 132,3 A
Reaktiivvõimsus / cosφ	0-100% Smax / 0,3 ind. - 0,3 maht.

Tabel 3.2.2 järg

Tabel 3.2.2 Kahesuunalise akuinverteri blueplanet gridsave 92.0 TL3-S tehnilised parameetrid [12]

Vooluharmonikuid hindav tegur	≤ 3%
Võrgufaaside arv	3
Üldandmed:	
Maksimaalne kasutegur	98,80%
Töörežiim	paralleelis võrguga (laadimine/tühjendamine)
Andmeside protokoll	Modbus
Omatarve ooterežiimis	<10 W
Töötemperatuur	-20...+60 °C
Õhuniiskus	0...100%
Mõõdud	719 x 699 x 450 mm
Kaal	84 kg



Joonis 3.2.2 Kahesuunaline akuinverter blueplanet gridsave 92.0 TL3-S. [12]

BCS250K-B on Hiinas asuva ettevõtte Kehua poolt toodetav ning turustatav kahesuunaline akuinverter. Tegu on kõrge kasuteguriga tööstusinverteriga. Seade on mõeldud põrandale paigaldamiseks. Inverteri maksimaalne väljundvõimsus on 275 kVA, kuid suurema väljundvõimsuse vajaduse korral on võimalik süsteemi skaleerida ühendades mitu inverterit paralleeltööle. Lisaks võimaldab seade nii toota kui ka tarbida reaktiivenergiat. On tehniliselt sobilik elektrivõrguga paralleeltööle ühendamiseks ning on digitaalselt loetav ja juhitud kasutades Modbus andmesideprotokolli. Samas tooteserias pakub Kehua ka suurema väljundvõimsusga (550 kVA ning 693 kVA) kahesuunalisi akuinvertereid. [13] Seadme olulisemad tehnilised parameetrid on välja toodud tabelis 3.2.3 ning seade ise on näidatud joonisel 3.2.3.

Tabel 3.2.3 Kahesuunalise akuinverteri BCS250K-B tehnilised parameetrid [13]

Alalisvoolu ühendus:	
Maksimaalne alalispinge	1000 V
Alalispinge töövahemik	500...900 V
Maksimaalne alalisvool	463 A
Vahelduvvooluühendus võrguga:	
Nimivõimsus	250 kW
Maksimaalne näivvõimsus	275 kVA
Nimipinge	315/400 V
Väljundpinge vahemik	-15...10%
Nimisagedus	50/60 Hz
Maksimaalne väljundvool	397 A
Vooluharmonikuid hindav tegur	<3%
Kasutegur:	
Maksimaalne kasutegur	98,80%
Üldandmed:	
Töötemperatuur	-30...+65 °C
Õhuniiskus	0...95%
Mõõdud	1100 x 1950 x 700mm
Kaal	700 kg
Andmeside protokoll	Modbus-RTU/Modbus-TCP/IEC61850



Joonis 3.2.3 Kahesuunaline akuinverter BCS250K-B. [13]

3.3 Salvestid

Allpool on välja toodud valik akupankasid, mis on sobilikud kasutamiseks integreeritud energiasalvestiga nutikates madalpinge alajaamades. Lõputöö kirjutamise raames kogutud info põhjal varieerusid nende salvestite hinnad mahtuvuse ühe kWh kohta palju. Maksimaalne hind oli 893 €/kWh, minimaalne hind oli 270 €/kWh ning keskmiseks hinnaks kujunes 558 €/kW.

TS HV 70 on Saksamaal asuva peakorteriga rahvusvahelise ettevõtte TESTVOLT poolt toodetav ning turustatav akupank. Salvestussüsteem koosneb liitium-ioon akumoodulitest ja akupanga juhtimis-/kontrollseadmetest, mis on paigaldatud metallist seadmekappi. Iga akumoodul on koostatud kõrge kvaliteediga Samsung SDI akuelementidest ning sisaldab akuhaldussüsteemi. Tootja lubab akupangale pikka eluiga, kuni 8000 tsükli või 30 aastat. Salvesti talub suuri voolusid ning seda on võimalik nii täis laadida kui ka tühjendada ühe tunni jooksul. Akupank on põrandale paigaldatav. Seda salvestusseadet on võimalik tellida kahe erineva mahtuvusega: 67 kWh ning 76 kWh. Suurema mahtuvuse vajaduse korral on võimalik nimetatud akupankasid ühendada mitmeid paralleeltööle. Salvestusseade on digitaalselt loetav ning juhitav kasutades Modbus andmesideprotokolli. [14] Salvesti olulisemad tehnilised parameetrid on välja toodud tabelis 3.3.1 ning akupank ise on näidatud joonisel 3.3.1.

Tabel 3.3.1 Akupanga TS HV 70 tehnilised parameetrid [14]

Mahtuvus (14 16 aku moodulit)	67 kWh 76 kWh
C-suhtarv	1C
Akuelement	Liitium-ioon NMC (Samsung SDI)
Maksimaalne laadimis- ja tühjendamisvool	94 A
Tsükleid @ 100% DoD 70% EoL 23°C +/- 5°C 1C/1C	6000
Tsükleid @ 100% DoD 70% EoL 23°C +/- 5°C 0.5C/0.5C	8000
Aku kasutegur	≤98%
Omatarve ooterežiimis	5 W
Tööpinge vahemik	666...930 VDC
Töötemperatuur	-10...+50 °C
Õhuniiskus	0...85%
Kaal (14 16 aku moodulit)	714 kg 791 kg
Mõõdud	1900 x 1200 x 600 mm



Joonis 3.3.1 Akupank TS HV 70. [15]

Cammeo HV Longlife on Saksamaal asuva ettevõtte Cammeo poolt toodetav ning turustatav modulaarne akupank. Salvestussüsteem koosneb liitium-ioon akumoodulitest ja akupanga juhtimis-/kontrollseadmetest, mis on paigaldatud spetsiaalsesse metallist seadmekappi. Akumoodulite arvu varieerides saab klient endale kokku kombineerida sobivaima pinge ning mahtuvusega akupanga. Ühe Longlife akumooduli mahtuvus on 4,45 kWh ning pinge on 51,8 VDC. Kõik akumoodulid sisaldavad integreeritud akuhaldussüsteemi. Ühe akupanga mooduli maksimaalne mahutavus on 66,8 kWh ning pinge 750 VDC. Suurema mahtuvuse vajaduse korral on võimalik nimetatud akupankasid ühendada mitmeid paralleeltööle. Tootja annab oma akumoodulite oodatavaks elueaks 12 aastat või minimaalselt 10 000 tsüklit 80 %-lise tühjakslaadimissügavuse juures. Salvesti talub suuri voolusid, akumoodul on laetav vooluga 1,8 C ning tühjendatav vooluga 2,3 C, kus voolud on antud C-suhtarvudena. Akupank on põrandapealse paigaldusviisiga. Salvestusseade on digitaalselt loetav ning juhitud kasutades CAN-Bus, Ethernet, andmesideprotokolle. [16], [17] Salvesti olulisemad tehnilised parameetrid on välja toodud tabelis 3.3.2 ning akupank ise on näidatud joonisel 3.3.2.

Tabel 3.3.2 Akupanga Cammeo HV Longlife tehnilised parameetrid [16]

Akude tehnoloogia	Liitium-ioon
Andmeside protokoll	CAN-Bus Ethernet
Nimimahtuvus	66,8 kWh
Nimipinge	776 VDC
Nimivõimsus tühjaks laadimisel	153,5 kW
Eluiga tsüklites kuni 80% mahtuvuseni (1C laadimisel 2C tühjendamisel 25 °C)	>10 000 @ 80% DoD
Oodatav eluiga	12 aastat
Kaitseklass	IP20
Mõõdud	1000 x 2000 x 600mm
Kaal	899,5 kg
Maksimaalne laadimisvool	154,8 A
Maksimaalne vool tühjaks laadimisel	197,8 A
Töötemperatuur	+5...+50 °C laadimisel +5...+55 °C tühjendamisel
Tööpinge vahemik	654...874 VDC



Joonis 3.3.2 Akupank Cammeo HV Longlife. [18]

Powercube M3A-180 on Hiinas asuva ettevõtte Pylontech poolt toodetav ning turustatav modulaarne akupank. Kõne all olev salvestussüsteem koosneb liitium-ioon akumoodulitest ja akupanga juhtimis-/kontrollseadmetest, mis on paigaldatud spetsiaalsesse metallist seadmeriulisse. Akumoodulite arvu varieerides saab klient endale kokku kombineerida sobivaima pinge ning mahtuvusega akupanga. Ühe akumooduli mahtuvus on 5,69 kWh ning pingeline on 38,4 VDC. Kõik akumoodulid sisaldavad integreeritud akuhaldussüsteemi. Ühe akupanga mooduli maksimaalne mahutavus on 164,81 kWh ning pingeline 1113,6 VDC. Suurema mahtuvuse vajaduse korral on võimalik ühendada mitu akupangamoodulit paralleelselt. Akupanga oodatavaks elueaks on minimaalselt 15 aastat või 5000 tsüklit 90 %-lise tühjakslaadimise sügavuse juures. Salvesti talub suuri voolusid nii laadimisel kui tühjenemisel. Akusid on võimalik laadimistsükli jooksul laadida ning tühjendada konstantselt voolu 1 C juures, kus vool on antud C-suhtarvuna, ilma ülekuumenemist kartmata. Akupank on põrandapealse paigaldusviisiga. Salvestusseade on digitaalselt loetav ning juhitav kasutades CAN-Bus ning Modbus RTU/TCP/IP andmesideprotokolle. [19] Salvesti olulisemad tehnilised parameetrid on välja toodud tabelis 3.3.3 ning akupank ise on näidatud joonisel 3.3.3.

Tabel 3.3.3 Akupanga Powercube M3A-180 parameetrid maksimaalse mahtuvuse juures [19]

Mahtuvus	164,81 kWh
Nimipinge	1113,6 VDC
Pingevahemik	939,6...1252,8 VDC
Kasutegur	96%
Aku tühjakslaadimise sügavus	90%
Mõõdud	1365 x 855 x 2130mm
Kaal	1885 kg
Projekteeritud eluiga	≥15
Töötemperatuur	+10...+40 °C

Tabel 3.3.3 Akupanga Powercube M3A-180 parameetrid maksimaalse mahtuvuse juures [19]

Õhuniiskus	5...95%
C-suhtarv	1C
Andmesideprotokoll	CAN-Bus, Modbus RTU/TCP/IP



Joonis 3.3.3 Akupank Powercube M3A-180. [19]

3.4 Juhtimisseadmed

Allpool on välja toodud juhtimissüsteemi peamised seadmed, mis on sobilikud kasutamiseks integreeritud energiasalvestiga nutikates madalpinge alajaamades ning valiti näidisseadmetena antud lõputöö käsitlemiseks. Sarnaseid kontrollersüsteeme on võimalik hankida ka mitmetelt teistelt alternatiivsetelt tootjatelt. Sarnase lahenduse hinnanguline maksumus jääb vahemikku 2000-4000 € olenevalt tootjast ning soetatavate seadmete kogusest.

Keskkontroller CPU 1511-1 PN [20] on kontrollersüsteemi S7-1500 keskne komponent, mis programmeeritav ning juhib kogu automaatikasüsteemi vastavalt etteantud käsklustele. Seade kogub kokku teiste automaatikasüsteemi osade saadetud informatsiooni, töötleb seda ning saadab vastavalt vajadusele käsklusi vastu. Kontroller võimaldab süsteemi juhtimiseks kasutada mitmeid andmesideprotokolle, mille hulgas on ka Modbus protokoll. Seade sisaldab ka integreeritud veebiserverit ning omab tarkvaralist MQTT vahendusliidest, millest tulenevalt kontroller võimeline andmeid vahetama ka pilveteenustega. Seadme olulisemad tehnilised parameetrid on välja toodud tabelis 3.4.1 ning seade ise on näidatud joonisel 3.4.1.

Tabel 3.4.1 Keskkontrolleri CPU 1511-1 PN põhiparameetrid [20]

Seade	CPU 1511-1 PN
Tarkvara versioon	V2.9
Toitepinge nimiväärtus	24 VDC
Toitepinge min. lubatud väärtus	19,2 VDC
Toitepinge maks. lubatud väärtus	28,8 VDC
Nimivoolutarve	0,7 A
Maksimaalne voolutarve	0,95 A
Võimsustarve	5,7 W
SIMATIC mälukaardi vajadus	Jah
SIMATIC mälukaardi pesasid	1
Integreeritud mälu (programmidele)	150 kbait
Integreeritud mälu (andmete)	1 Mbait
Andmesideprotokoll	IP, PROFINET, SIMATIC, VEEBISERVER MODBUS
Maksimaalne ühenduste arv	96
Töötemperatuur	-25...60°C
Mõõtmed	35x147x129mm
Kaal	405 g



Joonis 3.4.1 Keskkontroller CPU 1511-1 PN. [21]

Digitaalne sisendmoodul DI 16x24 V DC HF [22] on kontrollisüsteemi S7-1500 lisamoodul. Seade omab 16 digitaalset sisendkanalit. Moodul võimaldab teistelt seadmetelet võtta vastu digitaalsignaale (nt lugeda kaitselülite olekusignaale). Seadme olulisemad tehnilised parameetrid on välja toodud tabelis 3.4.2 ning seade ise on näidatud joonisel 3.4.2.

Tabel 3.4.2 Digitaalse sisendmooduli DI 16x24VDC HF põhiparameetrid [22]

Seade	DI 16x24VDC HF
Tarkvara versioon	V2.2.0
Toitepinge nimiväärtus	24 VDC
Toitepinge min. lubatud väärtus	19,2 VDC
Toitepinge maks. lubatud väärtus	28,8 VDC
Maksimaalne voolutarve	20 mA
Võimsustarve	2,6 W

Tabel 3.4.2 Digitaalse sisendmooduli DI 16x24VDC HF põhiparameetrid [22]

Digitaalsete sisendite arv	16
Sisendite nimipinge	24 VDC
Signaali "0" pingevahemik	-30...+5 VDC
Signaali "1" pingevahemik	+11...+30 VDC
Töötemperatuur	-30...60 °C
Mõõtmed	35x147x129 mm
Kaal	240 g



Joonis 3.4.2 Digitaalne sisendmoodul DI 16x24 V DC HF. [23]

Digitaalne väljundmoodul DQ16x24 V DC/0.5A HF [24] on kontrollisüsteemi S7-1500 lisamoodul. Seade omab 16 digitaalset väljundkanalit. Moodul lubab juhtida erinevaid alajaama seadmeid digitaalsignaali kaudu (nt juhtida kontaktoreid). Seadme olulisemad tehnilised parameetrid on välja toodud tabelis 3.4.3 ning seade ise on näidatud joonisel 3.4.3.

Tabel 3.4.3 Digitaalse väljundmooduli DQ16x24 V DC/0.5A HF põhiparameetrid [24]

Seade	DQ16x24 V DC/0.5A HF
Tarkvara versioon	V1.1.0
Toitepinge nimiväärtus	24 VDC
Toitepinge min. lubatud väärtus	19,2 VDC
Toitepinge maks. lubatud väärtus	28,8 VDC
Maksimaalne voolutarve	30 mA
Võimsustarve	2 W
Digitaalsete väljundite arv	16
Min. pinge signaali "1" korral	-0,8 V
Nimi väljundvool signaali "1" korral	0,5 A
Maks. vool signaali "0" korral	0,5 mA
Maks. vool kanali kohta	0,5 A
Töötemperatuur	-30...60 °C
Mõõtmed	35x147x129 mm
Kaal	230 g



Joonis 3.4.3 Digitaalne väljundmoodul DQ16x24 V DC/0.5A HF. [25]

SCALANCE M876-4 4G [26] on mitmekülgsete kasutusvõimalustega juhtmevaba 4G ruuter, mis sobib kasutamiseks programmeeritavate kontrollritega süsteemides (nt kontrollisüsteem Siemens S7-1500). Seade on optimeeritud töötamiseks Euroopa regioonis. Ruuter võimaldab kontrolleri ühenduse internetiga. Seadme olulisemad tehnilised parameetrid on välja toodud tabelis 3.4.4 ning seade ise on näidatud joonisel 3.4.4.

Tabel 3.4.4 Ruuteri SCALANCE M876-4 4G põhiparameetrid [26]

Seade	SCALANCE M876-4 4G
Andmeedastuskiirus	10 Mbit/s, 100 Mbit/s
Ühenduste arv sisevõrgule	4
Ühenduste arv välisvõrgule	2
Ühenduste arv toitele	2
Sisevõrgu ühendused	RJ45
Välisvõrgu ühendus	SMA
Toite ühendus	klemmliist
Toetatavad juhtmevabavõrgu süsteemid	LTE, UMTS, GSM
Toite nimipinge	24 VDC
Toitepinge lubatud vahemik	10,8...28,8 VDC
Maksimaalne voolutarve	330 mA
Võimsustarve	8 W
Töötemperatuur	-20...+70 °C
Maksimaalne õhuniiskus	95%
Mõõtmed	35x147x127 mm



Joonis 3.4.4 Ruuter SCALANCE M876-4. [27]

SCALANCE XB005 [28] on DIN-liistule paigaldatav tööstuslik kommutaator. Seade on fikseeritud eelseadistustega. Kommutaator võimaldab süsteemis olevate andmeside-protokolle kasutavate seadmete vahel tekitada kohtvõrgu ning võimaldab nendevahelist suhtlust (nt Modbus protokoll kasutavad seadmed). Seadme olulisemad tehnilised parameetrid on välja toodud tabelis 3.4.5 ning seade ise on näidatud joonisel 3.4.5.

Tabel 3.4.5 Kommutaatori SCALANCE XB005 põhiparameetrid [28]

Seade	SCALANCE XB005
Andmeedastuskiirus	10 Mbit/s, 100 Mbit/s
Võrguühenduste arv	5; RJ45
Ühenduste arv toitele	1
Toite ühendus	klemmliist, 3-poolust
Toite nimipinge	24 VDC
Toitepinge lubatud vahemik	19,2...28,8 VDC
Maksimaalne voolutarve	0,07 A
Töötemperatuur	-10...+60 °C
Maksimaalne õhuniiskus	95%
Mõõtmed	45x100x87 mm
Kaal	0,165 kg



Joonis 3.4.5 Kommutaator SCALANCE XB005. [29]

SIMATIC PM 1507 24 V/3 A [30] on kontrollersüsteemiga S7-1500 ühilduv toiteplokk. Seade muundab võrgupinge kontrollersüsteemile sobivaks toitepingeks. Toiteplokk on valitud piisava võimsusega toitmaks ära kõiki juhtimissüsteemi seadmeid. Seadme

olulisemad tehnilised parameetrid on välja toodud tabelis 3.4.6 ning seade ise on näidatud joonisel 3.4.6.

Tabel 3.4.6 Toiteploki SIMATIC PM 1507 24 V/3 A põhiparameetrid [30]

Seade	SIMATIC PM 1507 24 V/3 A
Toide	1-faasiline vahelduvvool
Nimi toitepinge	120/230 VAC
Toitepinge vahemik	85...132/170...264 VAC
Toitepinge sagedus	60/50 Hz
Nimi väljundpinge	24 VDC
Nimi väljundvool	3A
Väljundvool	0...3 A
Väljundvõimsus	72W
Töötemperatuur	0...60 °C
Mõõtmed	50x147x129 mm
Kaal	0,45 kg



Joonis 3.4.6 Toiteplokk SIMATIC PM 1507 24 V/3 A. [31]

SENTRON 7KM PAC2200 on võrguanalüsaator, millega on võimalik jälgida pinget, voolu, sagedust ja aktiiv-, reaktiiv- ning näivvõimsust kolmefaasilises süsteemis. Lisaks on võimalik selle seadmega jälgida energia liikumise suunda. Seadme olulisemad tehnilised parameetrid on välja toodud tabelis 3.4.7 ning seade ise on näidatud joonisel 3.4.7.

Tabel 3.4.7 Võrguanalüsaatori SENTRON 7KM PAC2200 põhiparameetrid [32]

Seade	SENTRON 7KM PAC2200
Tööpinge L-L	3...480 V
Tööpinge N-L	3...276 V
Töösagedus	45...65 Hz
Töö nimivool	5 A
Andmesideprotokoll	Modbus
Kaitseklass	IP40
Mõõtmed	108x71x97 mm
Kaal	406 g



Joonis 3.4.7 Võrguanalüsaator SENTRON 7KM PAC2200. [33]

3.5 Järeldused

Seadmete valimise etapp on olulise tähtsusega integreeritud energiasalvestiga nutikate madalpinge alajaamade planeerimisel. On vaja jälgida, et valitud seadmed oleksid nõuetekohased, sobiksid omavahel integreerituna koos töötama ja oleksid võimelised täitma tellija poolt ette antud ülesandeid. Sellele kõigele lisaks tuleb silmas pidada, et valitud seadmete nomenklatuur ning hinnatase oleks võimalikult optimaalsed, toetamaks lõpptoote tasuvust ning seeläbi ka konkurentsivõimelisust.

Lõputöö kirjutamise käigus kogutud andmetest ilmnes:

- Erinevate tootjate/tarnijate hinnatasemetes, sarnaste parameetritega seadmetele, võivad olla üsna suured käärid;
- Akupankade mahtuvuse suurenemisel nende hind ühe kWh kohta langeb;
- Inverterite võimsuse suurenemisel nende hind ühe kW kohta langeb;
- Juhtimisseadmete hind energiasalvestiga alajaamade mahtuvuse ning võimsuse muutmisel oluliselt ei muutu. Juhtimisseadmete hind omab olulisemat mõju väiksema mahtuvuse ning võimsusega salvestusalajaamade korral. Suurema mahtuvuse ning võimsusega salvestusalajaamade korral omavad juhtimisseadmed marginaalset mõju kogu süsteemi hinnale;
- Seadmete hind langeb ostetatva koguse suurenemisel;
- Kõige suurem mõju integreeritud energiasalvestiga nutika madalpinge alajaama lõpphinnale avaldab akupanga maksumus;
- Erinevate tootjate akupankade lubatavad eluead võivad olla üsna erinevad arvestatuna nii laadimistsüklite arvuna kui aastatena.

4 Energiasalvestusalajaamade lahendused

4.1 Sissejuhatus

Käesolevas lõputöös viiakse läbi tasuvusanalüüs integreeritud energiasalvestiga nutikate madalpinge alajaamade majandusliku tasuvuse osas. Tasuvusanalüüsi teostamiseks töötatakse igale vaadeldavale tööstustarbijale välja sobivad energiasalvestusalajaamade tehnilised lahendused ning määratakse nende hind. Tehniliste lahenduste koostamisel arvestatakse, et iga tööstustarbija kohta vaadeldakse tasuvusanalüüsi teostamisel nelja erinevat olukorda. Nendest ettevõtetest igaühe kohta töötatakse välja neli erineva mahtuvusega alajaamalahendust, mille kasulikud mahtuvused on 10%, 25%, 50% ja 75% vastava tööstustarbija vaadeldava ühenduse maksimaalsest tunni tarbimisvõimsusest. Projekteeritavate alajaamade väljundvõimsuse määramisel arvestatakse, et selle salvestusseadmeid oleks võimalik nii täis- kui tühjakslaadida ühe tunni vältel.

Energiasalvestusalajaamad loetakse antud lõputöös koosnevaks järgnevatest komponentidest: muundur, salvesti, juhtimisseade, väliskest, muud materjalid (nt kaitselülitid, kontaktorid, ...), tootearendus ning koostamine, arendaja üldkulud ning kasum. Alajaamade väliskestasid tehniliselt valmis ei projekteerita ning nende hind arvestatakse töö autorile ametialaselt teada oleva varasemalt valmistatud konteinerhoonete hinnastatistika põhjal.

Lihtsustusena ei ole selles töös käsitletud jahutus-, kütte- ning tulekustutusüsteeme, mida teatud olukordades on energiasalvestitega alajaamdes vajalik kasutada.

Salvestusalajaamade akupanga vajaliku mahtuvuse määramisel võetakse arvesse nende alajaamade nõutavat kasulikku mahtuvust, akude tühjakslaetavuse sügavust (DoD) ning inverteeri kasutegurit.

Muunduri vajaliku väljundvõimsuse määramisel võetakse võrku antavat energia kogust ning aega, mille jooksul see energia võrku tuleb toimetada. Kui kahe-suunaline akuinverter peab olema võimeline reguleerima ka reaktiivenergiat, siis võetakse ka seda arvesse muunduri väljundvõimsuse määramisel.

4.2 Tööstustarbija 1 energiasalvestusalajaama tehniline lahendus

Tööstustarbija 1 maksimaalne elektritarve 2021 aastal vaatluse all olevas tootmisüksuses, ühe tunni jooksul, oli 236,94 kWh. Sellest infost lähtuvalt töötatakse sellele tarbijale välja alajaamalahendused kasuliku mahtuvusega 23,69 kWh;

59,24 kWh; 118,47 kWh ning 177,71 kWh (Lisa 1. Tabel L1.1). Neid lahendusi nimetatakse edaspidi vastavalt projekteeritavataks alajaamadeks TT1-AJ1; TT1-AJ2; TT1-AJ3 ja TT1-AJ4.

Akupanga minimaalse vajamineva mahtuvuse määramiseks kasutatakse valemit:

$$C_{Salvesti} = \frac{C_{Aj_kasulik}}{\eta_{Inverter} \cdot DoD\%} \quad (4.1)$$

$C_{Salvesti}$ – Akupanga minimaalne mahtuvus [kWh]

$C_{Aj_kasulik}$ – Energiasalevstiga alajaama kasulik mahtuvus [kWh]

$\eta_{Inverter}$ – Inverteri kasutegur [%]

$DoD\%$ - Akupanga tühjakslaetavuse sügavus [%]

Lihtsustusena on arvutustes kasutatud muundurite maksimaalset kasutegurit.

Tööstustarbijale 1 projekteeritavate salvestusalajaamade arvutatud akupanga minimaalsed vajalikud mahtuvused on TT1-AJ1: 26,65 kWh; TT1-AJ2: 66,62 kWh; TT1-AJ3: 133,32 kWh ning TT1-AJ4: 199,85 kWh (Lisa 1. Tabel L1.2).

Vastavalt arvutatud minimaalsetele mahtuvustele valitakse välja sobivad akupangad projekteeritavatele alajaamadele.

Tööstustarbijale 1 projekteeritavate alajaamade jaoks valitakse akupangad (Lisa 1. Tabel L1.3):

- TT1-AJ1: Alpha ESS Storion T30 akupanga mahtuvusega 28,7 kWh;
- TT1-AJ2: Alpha ESS Storion T30 akupanga mahtuvusega 68,4 kWh;
- TT1-AJ3: Pylontech Powercube M3A-180 mahtuvusega 136,32 kWh;
- TT1-AJ4: Pylontech Powercube M3A-180 (2tk) kogumahtuvusega 204,48 kWh.

Inverteri minimaalse vajaliku aktiivvõimsuse määramiseks kasutatakse valemit:

$$P_{Inverter} = \frac{C_{Aj_kasulik}}{t_{tüh}} \quad (4.2)$$

$P_{Inverter}$ – Inverteri minimaalne väljund aktiivvõimsus [kWh]

$t_{tüh}$ - Alajaama akupanga tühjakslaadimise aeg [h]

Inverteri minimaalse väljund näivvõimsuse määramiseks kasutatakse valemit [35]:

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} \quad (4.3)$$

S – näivvõimsus

P – aktiivvõimsus

$\cos\varphi$ – võimsustegur

Tööstustarbija 1 elektrienergia tarbimise korral on reaktiivenergia kompenseeritud eraldi kondensaatorseadmega, millest tulenevalt seda inverteriga eraldi lisaks tegema ei pea ning võimsustegur $\cos\phi$ on antud juhul 1.

Tööstustarbijale 1 projekteeritavate salvestusalajaamade inverterite minimaalseks vajalikuks väljundvõimsuseks saadi: TT1-AJ1: 23,7 kVA; TT1-AJ2: 59,2 kVA; TT1-AJ3: 118,5 kVA; TT1-AJ4: 177,7 kVA (Lisa 1. Tabel L1.4)

Vastavalt määratud inverterite minimaalsetele väljundvõimsustele valitakse sobivad muundurid projekteeritavatele alajaamadele.

Tööstustarbijale 1 projekteeritavate alajaamade jaoks valitakse muundurid (Lisa 1. Tabel L1.5):

- TT1-AJ1: Alpha ESS Storion T30 Inverter väljundvõimsusega 30 kVA;
- TT1-AJ2: SMA SUNNY TRIPOWER STORAGE 60 väljundvõimsusega 75 kVA;
- TT1-AJ3: SMA SUNNY TRIPOWER STORAGE 60 (2tk) koguväljundvõimsusega 150 kVA;
- TT1-AJ4: KACO blueplanet gridsave 92.0 TL3-S (2tk) koguväljundvõimsusega 184 kVA.

Peale muundurite ning salvestusseadmete valikut saab, teades seadmete arvu, tehnilisi parameetreid ning nõudeid paigaldusele, koostada projekteeritavatele alajaamadele põhimõtteskeemid (Lisa 1. Joonised L1.1; L1.3; L1.5; L1.7) ja seejärel ka asendiplaanid (Lisa 1. Joonised L1.2; L1.4; L1.6; L1.8).

Tööstustarbijale 1 planeeritud alajaamade ligikaudseteks hindadeks kujuneb:

- TT1-AJ1: 29 000 €. Suurimad kuluread selle alajaama hinna juures on muundur ning salvesti, mis üheskoos moodustavad üle poole alajaama hinnast (Lisa 1. Tabel L1.6);
- TT1-AJ2: 38 000 €. Suurimaks kulureaks selle alajaama hinna juures on salvesti, mis moodustab ca pool alajaama koguhinnast (Lisa 1. Tabel L1.7);
- TT1-AJ3: 71 500 €. Suurimaks kulureaks selle alajaama hinna juures on salvesti, mis moodustab ca 59 % kogu alajaama hinnast (Lisa 1. Tabel L1.8);
- TT1-AJ4: 101 000€. Suurimaks kulureaks selle alajaama hinna juures on salvesti, mis moodustab ca 59 % kogu alajaama hinnast (Lisa 1. Tabel L1.9).

4.3 Tööstustarbija 2 energiasalvestusalajaama tehniline lahendus

Tööstustarbija 2 maksimaalne elektritarve 2021 aastal vaatluse all olevas tootmisüksuses, ühe tunni jooksul, oli 495,13 kWh. Sellest infost lähtuvalt töötatakse sellele tarbija jaoks välja alajaamalahendused kasuliku mahtuvusega 49,51 kWh;

123,78 kWh; 247,57 kWh ning 371,35 kWh (Lisa 2. Tabel L2.1). Neid lahendusi nimetatakse edaspidi vastavalt projekteeritavateks alajaamadeks TT2-AJ1; TT2-AJ2; TT2-AJ3 ja TT2-AJ4.

Akupanga minimaalse vajamineva mahtuvuse määramiseks kasutatakse valemit 4.1. Lihtsustusena on arvutustes kasutatud muundurite maksimaalset kasutegurit.

Tööstustarbijale 2 projekteeritavate salvestusalajaamade arvutatud akupanga minimaalsed vajalikud mahtuvused on TT2-AJ1: 68,4 kWh; TT2-AJ2: 142,00 kWh; TT2-AJ3: 289,68 kWh ning TT2-AJ4: 431,68 kWh (Lisa 2. Tabel L2.2).

Vastavalt arvutatud minimaalsetele mahtuvustele valitakse välja sobivad akupangad projekteeritavatele alajaamadele.

Tööstustarbijale 2 projekteeritavate alajaamade jaoks valitakse akupangad (Lisa 2. Tabel L2.3):

- TT2-AJ1: Alpha ESS Storion T30 akupanga mahtuvusega 68,4 kWh;
- TT2-AJ2: Pylontech Powercube M3A-180 mahtuvusega 142,00 kWh;
- TT2-AJ3: Pylontech Powercube M3A-180 (3tk) kogumahtuvusega 289,68 kWh;
- TT2-AJ4: Pylontech Powercube M3A-180 (4tk) kogumahtuvusega 431,68 kWh.

Tööstustarbija 2 korral peab valitav muundur olema võimeline reguleerima ka reaktiivenergiat. Reaktiivenergia kompenseerimisel inverteriga ei suurene aktiivenergia tarbimine, mistõttu ei ole tarvis suurendada ka akupanga mahtu. Küll on aga tarvis suurendada inverteri väljundvõimsust, et see vastaks võrku antavale näivvõimsusele [36].

Tööstustarbija 2 korral puuduvad täpsed andmed võimsusteguri $\cos\phi$ kohta igal ajahetkel, et määrata selle maksimaalset väärtust. Küll aga on olemas info selle tarbija kuisete aktiiv- ning reaktiivenergia tarvete kohta. Lihtsustusena eeldatakse selles lõputöös, et selle tarbija kõige madalam võimsustegur on selle tarbija madalaim kuu keskmine võimsustegur ($\cos\phi=0,97$) (Lisa 2. Tabel L2.4).

Inverteri minimaalse vajaliku aktiivvõimsuse määramiseks kasutatakse valemit 4.2 ning minimaalse väljund näivvõimsuse määramiseks kasutatakse valemit 4.3.

Tööstustarbijale 2 projekteeritavate salvestusalajaamade inverterite minimaalseks vajalikuks väljundvõimsuseks saadi: TT2-AJ1: 51,0 kVA; TT2-AJ2: 127,6 kVA; TT2-AJ3: 255,2 kVA; TT2-AJ4: 382,4 kVA (Lisa 2. Tabel L2.5)

Vastavalt määratud inverterite minimaalsetele väljundvõimsustele valitakse sobivad muundurid projekteeritavatele alajaamadele.

Tööstustarbijale 2 projekteeritavate alajaamade jaoks valitakse muundurid (Lisa 2. Tabel L2.6):

- TT2-AJ1: SMA SUNNY TRIPOWER STORAGE 60 väljundvõimsusega 75 kVA;
- TT2-AJ2: KACO blueplanet gridsave 92.0 TL3-S (2tk) koguväljundvõimsusega 184 kVA;
- TT2-AJ3: Kehua BCS500K-B väljundvõimsusega 550 kVA;
- TT2-AJ4: Kehua BCS500K-B väljundvõimsusega 550 kVA.

Peale muundurite ning salvestusseadmete valikut saab, teades seadmete arvu, tehnilisi parameetreid ning nõudeid paigaldusele, koostada projekteeritavatele alajaamadele põhimõtteskeemid (Lisa 2. Joonised L2.1; L2.3; L2.5; L2.7) ja seejärel ka asendiplaanid (Lisa 2. Joonised L2.2; L2.4; L2.6; L2.8).

Tööstustarbijale 2 planeeritud alajaamade ligikaudseteks hindadeks kujuneb:

- TT2-AJ1: 38 000 €. Suurimaks kulureaks selle alajaama hinna juures on salvesti, mis moodustab ca pool kogu alajaama hinnast. (Lisa 2. Tabel L2.7);
- TT2-AJ2: 81 500 €. Suurimaks kulureaks selle alajaama hinna juures on salvesti, mis moodustab ca 54 % kogu alajaama hinnast. (Lisa 2. Tabel L2.8);
- TT2-AJ3: 148 500 €. Suurimaks kulureaks selle alajaama hinna juures on salvesti, mis moodustab ca 56 % kogu alajaama hinnast. (Lisa 2. Tabel L2.9);
- TT2-AJ4: 188 500 €. Suurimaks kulureaks selle alajaama hinna juures on salvesti, mis moodustab ca 62 % kogu alajaama hinnast. (Lisa 2. Tabel L2.10).

4.4 Tööstustarbija 3 energiasalvestusalajaama tehniline lahendus

Tööstustarbija 3 maksimaalne elektritarve 2021 aastal vaatluse all olevas liitumispunktis, ühe tunni jooksul, oli 775,23 kWh. Sellest infost lähtuvalt töötatakse sellele tarbijale jaoks välja alajaamalahendused kasuliku mahtuvusega 77,52 kWh; 193,81 kWh; 387,62 kWh ning 581,42 kWh (Lisa 3. Tabel L3.1). Neid lahendusi nimetatakse edaspidi vastavalt projekteeritavateks alajaamadeks TT3-AJ1; TT3-AJ2; TT3-AJ3 ja TT3-AJ4.

Akupanga minimaalse vajamineva mahtuvuse määramiseks kasutatakse valemit 4.1. Lihtsustusena on arvutustes kasutatud muundurite maksimaalset kasutegurit.

Tööstustarbijale 3 projekteeritavate salvestusalajaamade arvutatud akupanga minimaalsed vajalikud mahtuvused on TT3-AJ1: 87,18 kWh; TT3-AJ2: 217,96 kWh; TT3-AJ3: 434,99 kWh ning TT3-AJ4: 652,55 kWh (Lisa 3. Tabel L3.2).

Vastavalt arvatatud minimaalsetele mahtuvustele valitakse välja sobivad akupangad projekteeritavatele alajaamadele.

Tööstustarbijale 3 projekteeritavate alajaamade jaoks valitakse akupangad (Lisa 3. Tabel L3.3):

- TT3-AJ1: Pylontech Powercube M3A-180 mahtuvusega 102,24 kWh;
- TT3-AJ2: Pylontech Powercube M3A-180 (2tk) kogumahtuvusega 227,2 kWh;
- TT3-AJ3: Pylontech Powercube M3A-180 (4tk) kogumahtuvusega 454,4 kWh;
- TT3-AJ4: Pylontech Powercube M3A-180 (5tk) kogumahtuvusega 653,2 kWh.

Inverteri minimaalse vajaliku aktiivvõimsuse määramiseks kasutatakse valemit 4.2 ning minimaalse väljund näivvõimsuse määramiseks kasutatakse valemit 4.3.

Tööstustarbija 3 elektrienergia tarbimise korral on reaktiivenergia kompenseeritud eraldi kondensaatorseadmetega, millest tulenevalt seda inverteriga eraldi lisaks tegema ei pea ning võimsustegur $\cos\phi$ on antud juhul 1.

Tööstustarbijale 3 projekteeritavate salvestusalajaamade inverterite minimaalseks vajalikuks väljundvõimsuseks saadi: TT3-AJ1: 77,5 kVA; TT3-AJ2: 193,8 kVA; TT3-AJ3: 387,6 kVA; TT3-AJ4: 581,4 kVA (Lisa 3. Tabel L3.4)

Vastavalt määratud inverterite minimaalsetele väljundvõimsustele valitakse sobivad muundurid projekteeritavatele alajaamadele.

Tööstustarbijale 3 projekteeritavate alajaamade jaoks valitakse muundurid (Lisa 3. Tabel L3.5):

- TT3-AJ1: KACO blueplanet gridsave 92.0 TL3-S väljundvõimsusega 92 kVA;
- TT3-AJ2: Kehua BCS250K-B väljundvõimsusega 275 kVA;
- TT3-AJ3: Kehua BCS500K-B väljundvõimsusega 550 kVA;
- TT3-AJ4: Kehua BCS630K-B väljundvõimsusega 693 kVA.

Peale muundurite ning salvestusseadmete valikut saab, teades seadmete arvu, tehnilisi parameetreid ning nõudeid paigaldusele, koostada projekteeritavatele alajaamadele põhimõtteskeemid (Lisa 3. Joonised L3.1; L3.3; L3.5; L3.7) ja seejärel ka asendiaanid (Lisa 3. Joonised L3.2; L3.4; L3.6; L3.8).

Tööstustarbijale 3 planeeritud alajaamade ligikaudseteks hindadeks kujuneb:

- TT3-AJ1: 55 500 €. Suurimaks kulureaks selle alajaama hinna juures on salvesti, mis moodustab ca 57 % kogu alajaama hinnast. (Lisa 3. Tabel L3.6);
- TT3-AJ2: 125 500 €. Suurimaks kulureaks selle alajaama hinna juures on salvesti, mis moodustab ca 56 % kogu alajaama hinnast. (Lisa 3. Tabel L3.7);
- TT3-AJ3: 206 000 €. Suurimaks kulureaks selle alajaama hinna juures on salvesti, mis moodustab ca 64 % kogu alajaama hinnast. (Lisa 3. Tabel L3.8);

- TT3-AJ4: 261 500 €. Suurimaks kulureaks selle alajaama hinna juures on salvesti, mis moodustab ca 67 % kogu alajaama hinnast. (Lisa 3. Tabel L3.9).

4.5 Järeldused

Integreeritud energiasalvestiga nutikate madalpingealajaamade valmistamisel suurimat mõju hinnale omavad üldjuhul salvestusseadmed. Mida suurema mahtuvusega on alajaama akupank, seda suurem on salvestusseadmete osakaal alajaama hinnas ning seda väiksema osakaaluga on teised kulukomponendid. Väiksema mahtuvusega alajaamade korral võib aga muunduri hind ulatuda samale tasemele akupanga omaga. Alajaama hinnast väiksema, kuid siiski olulise osa, moodustavad muundurid. Kui suuremaid akupankasid saab tellida, kas rätsepatööna tehtuna või modulaarsetest plokkidest koostatuna, vastavalt vajaminevale mahtuvusele, siis inverterite valik toimub üldjuhul valmistoodete etteantud võimsuste järgi. Sellest lähtuvalt sõltub inverterite suhteline hind (€/kW), kui lähedale soovitud võimsusele on sobivat seadet saada.

Energiasalvestiga alajaamadele seadmete valikul on oluline hankekanalite valik. Sarnaste parameetritega seadmete hinnad võivad erineda kordades olenevalt tootjast/tarnijast.

5 Energiasalvestite juhtimissüsteemid

5.1 Sissejuhatus

Integreeritud energiasalvestitega alajaamu kasutatakse paljudel erinevatel eesmärkidel. Sellest tulenevalt on ka juhtimisalgoritmid, mida kasutatakse, ning sisendinfo, mida vajatakse, salvestite juhtimiseks väga erisugune. Salvestusalajaamade juhtsüsteemid võivad otsuste tegemiseks jälgida näiteks võrgu pinget või sagedust, kellaaega, elektrienergia ja mitmeid teisi parameetreid. Juhtimisotsuseid saab teha vastavalt ühele jälgitud parameetrile või ka mitme parameetri jälgimise kombinatsioonis, vastavalt etteantud juhtprogrammidele.

Energia arbitraaži korral jälgib juhtimissüsteem elektrienergia hindu, koormusgraafikuid ja/või kellaaega, et otsustada ning anda käsklusi alajaama seadmetele, millal salvestada energiat ning millal seda salvestist väljastada.

Sageduse reguleerimise korral jälgib juhtimissüsteem võrgu sagedust, et määrata, millal tarbida võrgust elektrit ning millal seda sinna tagasi anda.

Pinge vahemiku toetuse korral jälgivad alajaama juhtimisseadmed võrgu pinget, et otsustada, millal on vaja võrgust reaktiivenergiat tarbida ning millal seda sinna juurde anda.

Pimekäivituslahenduse korral jälgitakse võrgutoite kättesaadavust/puudumist energia salvestusotsuste tegemisel.

Reservvõimsuse tagamise korral jälgib juhtimissüsteem elektrienergia tarbimise ning tootmise tasakaalu võrgus, et vajaduse korral elektrienergiat võrku juurde anda.

Võrguühendusest mikrovoorkudes jälgib juhtseade energia tarbimise ja tootmise tasakaalu, et tagada võrgutoite kvaliteetne ja pidev olemasolu.

Koormuse nihutamine ning koormustippude vähendamisel jälgivad süsteemi juhtseadmed kellaaegu, mis on määratud vastavalt võrgu varasematele koormusgraafikutele.

Alajaamade juhtseadmed võivad saada salvestite juhtimiseks vajalikku infot mitmetest erinevatest kanalitest. Kasutatakse erinevaid sensoreid (nt pingetraafod, volutrafod), info saatmist kontrollerisse veebi kaudu (nt elektrienergia ning ilma andmed) või infot võib laadida ka otse kontrollerisse kaabelühenduse kaudu (nt koormusgraafikud).

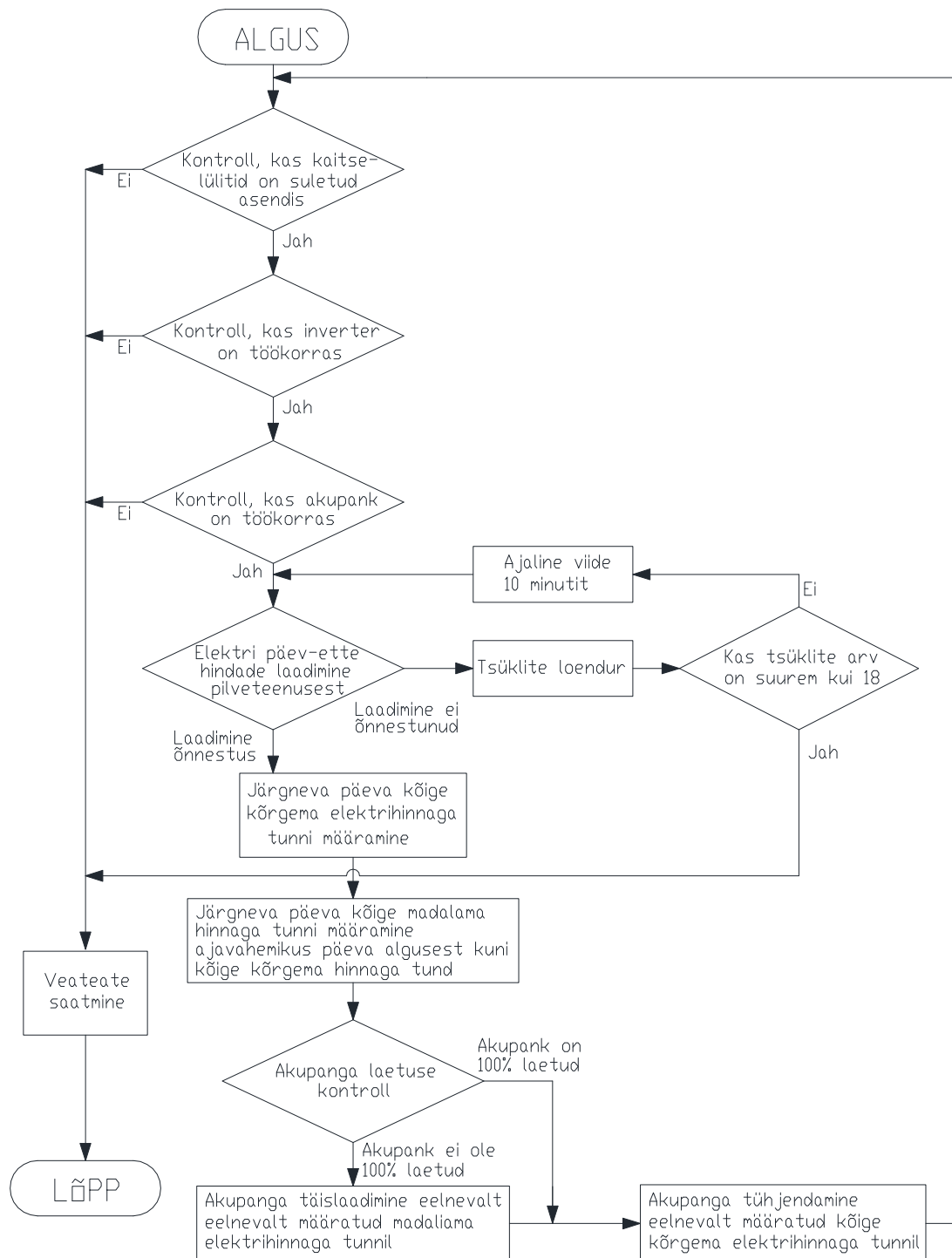
Võimalusi juhtimisinfo saamiseks, selle töötlemiseks ning otsuste tegemiseks on mitmeid.

5.2 Tööstustarbija 1 energiasalvestusalajaama tehniline lahendus

Tööstustarbijale 1 projekteeritud energiasalvestiga alajaama juhtimissüsteemi keskseks elemendiks on programmeeritav kontrolleri koos oma lisamoodulitega, mis võimaldab infot vastu võtta juhtimissüsteemi elementidelt, töödelda saadud infot ning selle põhjal edastada käsklusi määratud süsteemi osadele. Lisaks kuuluvad juhtimissüsteemi elementide hulka:

- Akupanga akuhaldussüsteem, mille kaudu saab lugeda akupanaga olekut (nt laetuse astet, pinget, temperatuuri) ning juhtida akupanka, kasutades Modbus andmeside protokollid;
- Inverteri juhtplokk, mille kaudu on võimalik lugeda inverteri parameetreid ning juhtida inverteri tegevust, kasutades Modbus andmesideprotokollid;
- Võrguanalüsaatorid ning nende sensorid, mis võimaldavad mõõta võrgupinget, liinide voolu, aktiiv- ja reaktiivenergiat koos nende suunaga liinis ning edastada seda infot kontrolleri Modbus andmesideprotokollid kaudu;
- Kaitselülite abikontaktid, mis on jälgitavad kontrollersüsteemi digitaalse sisendmooduli kaudu;
- Kontaktorid, mis on juhitavad kontrollersüsteemi digitaalse väljundmooduli kaudu.

Kontrollersüsteem on lisaks varustatud tarkvaralise veebiserveri ning MQTT vahendusliidesega, mis võimaldab juhtimissüsteemil vahetada infot pilveteenustega. Tööstustarbijale 1 planeeritud energiasalvestiga alajaam toimib energia arbitraaži põhimõttel. Alajaam salvestab elektrit madala elektri hinna korral ning tööstustarbija tarbib elektrit salvestist kõrge elektri hinna korral. Lisaks müüakse ülejäävat salvestatud elektrienergiat sobivuse korral ka tagasi võrku. Salvestite tühjendamine toimub ühe tunni jooksul, 24 tunnise perioodil, tunnil mil elektri hind on kõige kõrgem. Elektrienergia ost ning akupanka salvestamine toimub ühe tunni jooksul perioodil, mis jääb päeva alguse ning kõige kõrgema hinnaga tunni vahele, kui elektri hind on kõige madalam. Salvestussüsteemi juhtimiseks vajaliku elektri hinnainfo võtab juhtimissüsteem Nordpool elektribörsi infosüsteemist läbi pilveteenuste. Info, mida juhtimissüsteem jälgib on päev-ette börsihinnad. Ühe laadimistsükli (akupanga täis ning tühjaks laadimine) vahemikuks on üks ööpäev. Tööstustarbijale 1 planeeritud alajaama juhtimissüsteemi toimimise voodiagramm on näidatud joonisel 5.2.1.



Joonis 5.2.1 Tööstustarbijale 1 planeeritud alajaama juhtimissüsteemi toimimise voodiagramm.

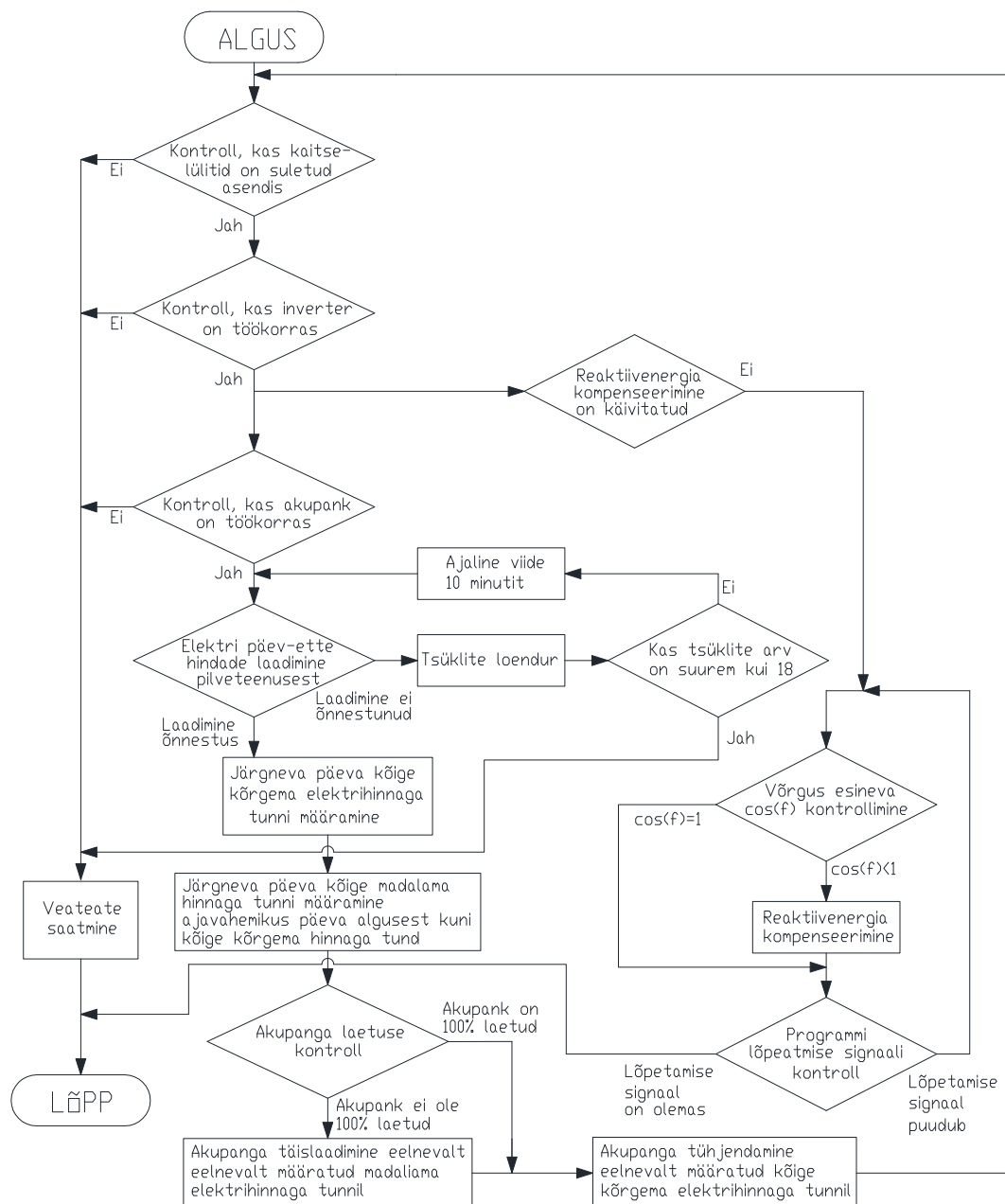
5.3 Tööstustarbija 2 energiasalvestusalajaama tehniline lahendus

Tööstustarbijale 2 projekteeritud energiasalvestiga alajaama juhtimis-süsteemi keskseks elemendiks on programmeeritav kontrolleri koos oma lisamoodulitega, mis võimaldab infot vastu võtta juhtimissüsteemi elementidelt, töödelda saadud infot ning selle põhjal edastada käsklusi määratud süsteemi osadele. Lisaks kuuluvad juhtimissüsteemi elementide hulka:

- Akupanga akuhaldussüsteem, mille kaudu saab lugeda akupanaga olekut (nt laetuse astet, pinget, temperatuuri) ning juhtida akupanka, kasutades Modbus andmeside protokollid;
- Inverteri juhtplokk, mille kaudu on võimalik lugeda inverteri parameetreid ning juhtida inverteri tegevust, kasutades Modbus andmesideprotokollid;
- Võrguanalüsaatorid ning nende sensorid, mis võimaldavad mõõta võrgupinget, liinide voolu, aktiiv- ja reaktiivenergiat koos nende suunaga liinis ning edastada seda infot kontrolleri Modbus andmesideprotokollid kaudu;
- Kaitselülite abikontaktid, mis on jälgitavad kontrollersüsteemi digitaalse sisendmooduli kaudu;
- Kontaktorid, mis on juhitavad kontrollersüsteemi digitaalse väljundmooduli kaudu.

Kontrollersüsteem on lisaks varustatud tarkvaralise veebiserveri ning MQTT vahendusliidesega, mis võimaldab juhtimissüsteemil vahetada infot pilveteenustega.

Tööstustarbijale 2 planeeritud energiasalvestiga alajaam toimib energia arbitraaži põhimõttel. Alajaam salvestab elektrit madalate elektrihindade korral ning tööstustarbija tarbib elektrit salvestist kõrge elektri hinna korral. Lisaks toimub reaktiivenergia reguleerimine alajaama inverteritega, mille eesmärgiks on, et tööstustarbija ei tarbiks, ega annaks võrku reaktiivenergiat. Salvestite tühjendamine toimub ühe tunni jooksul, 24 tunnilisel perioodil, tunnil mil elektri hind on kõige kõrgem. Elektrienergia ost ning akupanka salvestamine toimub ühe tunni jooksul perioodil, mis jääb päeva alguse ning kõige kõrgema hinnaga tunni vahele, kui elektri hind on kõige madalam. Salvestussüsteemi juhtimiseks vajaliku elektri hinnainfo võtab juhtimissüsteem Nordpool elektribörsi infosüsteemist läbi pilveteenuste. Info, mida juhtimissüsteem jälgib on päev-ette börsihinnad. Ühe laadimistsükli (akupanga täis ning tühjaks laadimine) vahemikuks on üks ööpäev. Tööstustarbijale 2 planeeritud alajaama juhtimissüsteemi toimimise voodiagramm on näidatud joonisel 5.3.1.



Joonis 5.3.1 Tööstustarbija 2 planeeritud alajaama juhtimissüsteemi toimimise voodiagramm.

5.4 Tööstustarbija 3 energiasalvestusalajaama tehniline lahendus

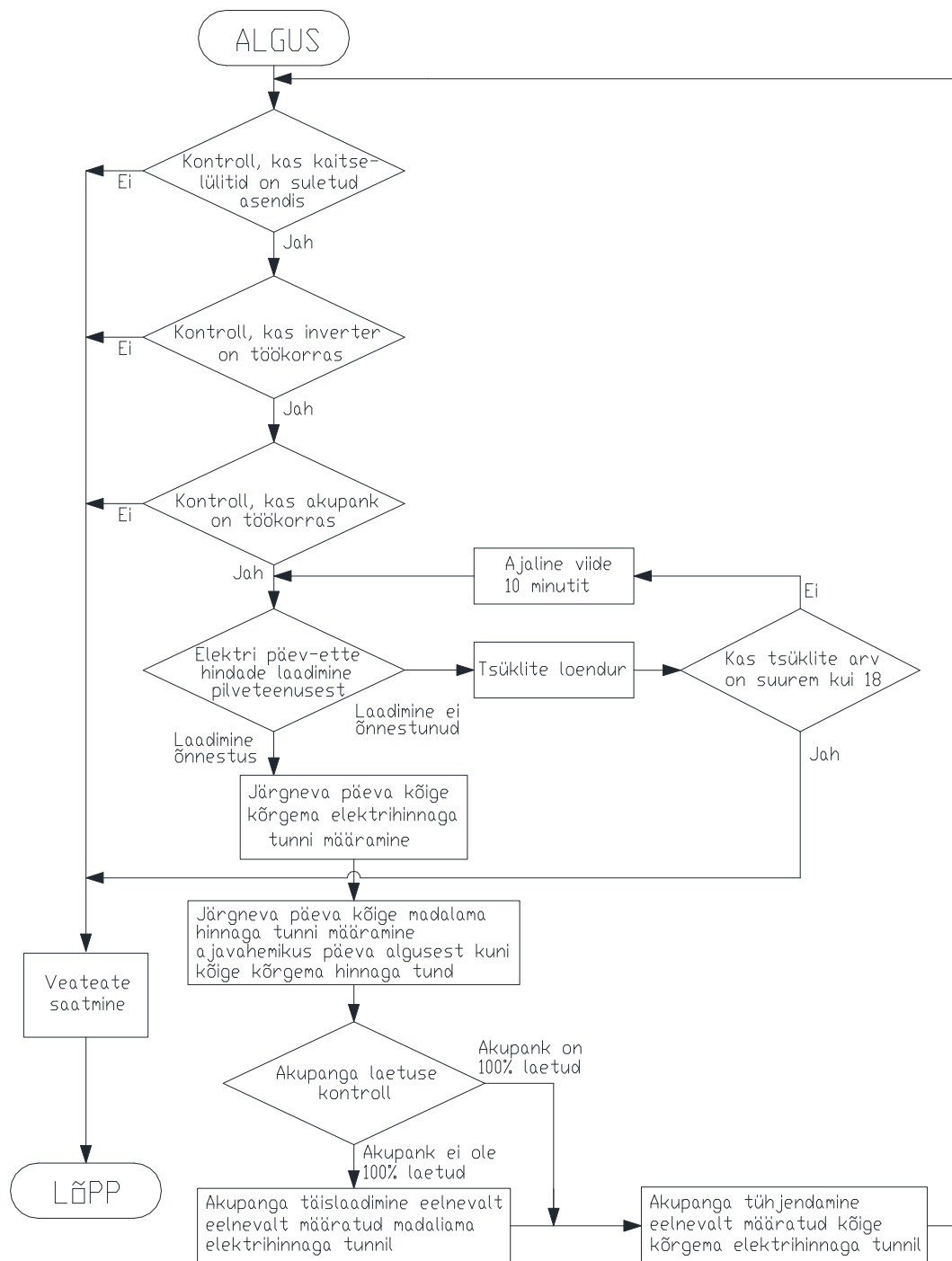
Tööstustarbija 3 projekteeritud energiasalvestiga alajaama juhtimissüsteemi keskseks elemendiks on programmeeritav kontrolleri koos oma lisamoodulitega, mis võimaldab infot vastu võtta juhtimissüsteemi elementidelt, töödelda saadud infot ning selle põhjal

edastada käsklusi määratud süsteemi osadele. Lisaks kuuluvad juhtimissüsteemi elementide hulka:

- Akupanga akuhaldussüsteem, mille kaudu saab lugeda akupanaga olekut (nt laetuse astet, pinget, temperatuuri) ning juhtida akupanka, kasutades Modbus andmeside protokollid;
- Inverteri juhtplokk, mille kaudu on võimalik lugeda inverteri parameetreid ning juhtida inverteri tegevust, kasutades Modbus andmesideprotokollid;
- Võrguanalüsaatorid ning nende sensorid, mis võimaldavad mõõta võrgupinget, liinide voolu, aktiiv- ja reaktiivenergiat koos nende suunaga liinis ning edastada seda infot kontrollerile Modbus andmesideprotokollid kaudu;
- Kaitselülitite abikontaktid, mis on jälgitavad kontrollersüsteemi digitaalse sisendmooduli kaudu;
- Kontaktorid, mis on juhitavad kontrollersüsteemi digitaalse väljundmooduli kaudu.

Kontrollersüsteem on lisaks varustatud tarkvaralise veebiserveri ning MQTT vahendusliidesega, mis võimaldab juhtimissüsteemil vahetada infot pilveteenustega.

Tööstustarbijale 3 planeeritud energiasalvestiga alajaam toimib energia arbitraaži põhimõttel. Alajaam salvestab elektrit madalate elektrihindade korral ning tööstustarbija tarbib elektrit salvestist kõrge elektri hinna korral. Salvestite tühjendamine toimub ühe tunni jooksul, 24 tunnise perioodil, tunnil mil elektri hind on kõige kõrgem. Elektrienergia ost ning akupanka salvestamine toimub ühe tunni jooksul perioodil, mis jääb päeva alguse ning kõige kõrgema hinnaga tunni vahele, kui elektri hind on kõige madalam. Salvestussüsteemi juhtimiseks vajaliku elektri hinnainfo võtab juhtimissüsteem Nordpool elektribörsi infosüsteemist läbi pilveteenuste. Info, mida juhtimissüsteem jälgib on päev-ette börsihinnad. Ühe laadimistsükli (akupanga täis ning tühjaks laadimine) vahemikuks on üks ööpäev. Tööstustarbijale 3 planeeritud alajaama juhtimissüsteemi toimimise voodiagramm on näidatud joonisel 5.4.1.



Joonis 5.4.1 Tööstustarbija 3 planeeritud alajaama juhtimissüsteemi toimimise voodiagramm.

5.5 Järeldused

Kõikidele vaatluse all olevatele tööstustarbijatele on planeeritud energiasalvestiga alajaamad, mis toimivad energia arbitraaži põhimõttel. Tööstustarbija 2 lahenduse jaoks on lisaks energia arbitraaži funktsioonile planeeritud ka reaktiivvõimsuse

kompenseerimise funktsioon. Alajaamadele määratud kasutusfunktsioonist lähtuvalt on valitud neile ka juhtimisseadmed ning kujundatud algoritmid nende juhtimiseks. Peamisteks juhtimissüsteemi komponentideks antud alajaamade korral on programmeeritav kontrolleri koos oma lisamoodulitega, akupanaga akuhaldussüsteem, inverteri juhtplokk, võrguanalüsaatorid koos sensoritega, kaitselülite abikontaktid ja kontaktorid.

Alajaamad salvestavad elektrit madalate elektrihindade korral ning väljastavad elektrienergiat salvestist kõrge elektrihinna korral. Elektrienergia ost ning akupanga salvestamine toimub ühe tunni jooksul perioodil, mis jääb päeva alguse ning kõige kõrgema hinnaga tunni vahele, kui elektri hind on kõige madalam. Salvestite tühjendamine toimub ühe tunni jooksul, 24 tunnise perioodil, tunnil mil elektrihind on kõige kõrgem. Salvestussüsteemi juhtimiseks vajaliku elektrihinnainfo võtab juhtimissüsteem Nordpool elektribörsi infosüsteemist läbi pilveteenuste. Info, mida juhtimissüsteem jälgib on päev-ette börsihinnad. Lisaks võtavad alajaamade juhtimissüsteemid otsuste langetamisel arvesse ka infot, mis saadud teistelt süsteemi komponentidelt: võrguanalüsaatoritelt saadud infot voolude, pingete suuruse ning energia liikumise osas; akupanga akuhaldussüsteemilt saadud infot akupanga seisukorra üle; inverteeri juhtplokkist saadud infot seadme oleku üle; kaitselülite abikontaktidelt saadud signaale lülite oleku osas. Ühe laadimistsükli (akupanga täis ning tühjaks laadimine) vahemikuks on üks ööpäev. Tööstustarbija 2 lahenduse korral toimub ka reaktiivenergia reguleerimine alajaama inverteritega, mille eesmärgiks on, et tööstustarbija ei tarbiks, ega annaks võrku reaktiivenergiat. Reaktiivenergia mõõtmine ning vajadusel selle kompenseerimine toimub pidevalt.

6 Energiasalvestusalajaamade tasuvusanalüüs

6.1 Sissejuhatus

Käesoleva tasuvusanalüüsi käigus selgitatakse välja ajavahemikud, mille jooksul tööstustarbijatele projekteeritud energiasalvestusalajaamad ennast tagasi teenivad ning seejärel hinnatakse, kas nimetatud ajavahemikud jäävad salvestusalajaamade eluea sisse või ületavad seda.

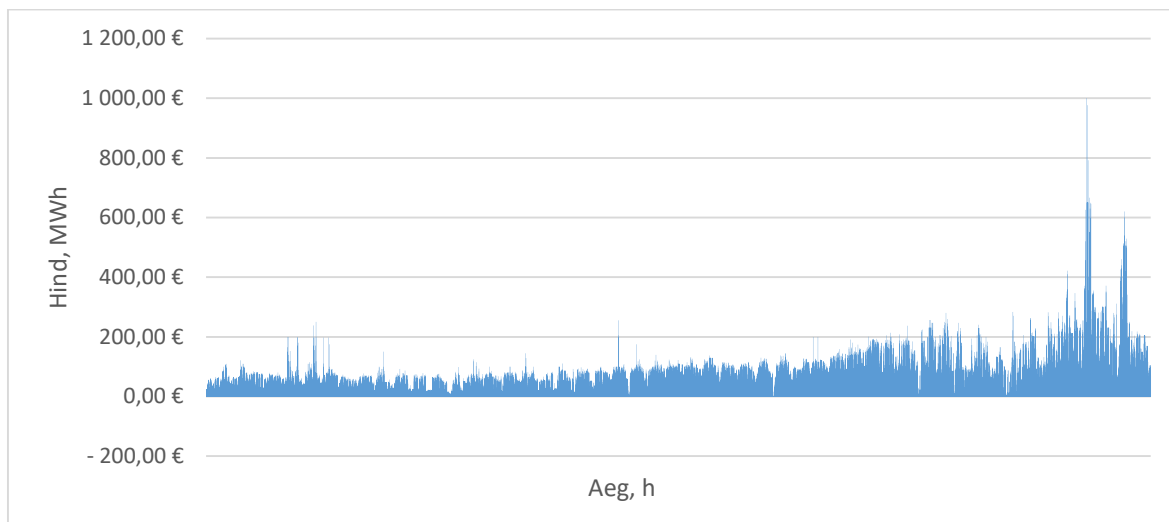
Tasuvusanalüüs viiakse läbi kasutades Microsoft Excel tabelarvutustarkvara.

Energiasalvestusalajaamade tasuvusanalüüsi läbiviimiseks kasutatakse Nordpool elektribörsi 2021 aasta Eesti turu tunnihindu [37], tööstustarbijate tarbimisandmeid sama aasta kohta ning paragrahvis 4 kalkuleeritud hindu tööstustarbijatele planeeritud alajaamadele. Võrgust ostetavate elektrienergiakoguste arvutamisel võetakse lisaks tööstustarbijate tarbimisandmetele arvesse ka energia kadusid inverterite käitamisel, kadusid akupankade laadimisel, akupankade tühjakslaetavuse sügavust ning akude mahtuvuse vähenemist ajas. Võrgust ostetava elektrienergia hinna arvutamisel arvestatakse lisaks Nordpool börsi tunnihindadele (Joonis 6.1.1) ka elektrimüüja marginaaliga, elektrienergia aktsiisiga, taastuenergia tasuga ning võrguteenuse tasuga. Elektrimüüja marginaaliks arvestatakse käesolevas analüüsis 0,6 €/MWh, mis on keskmine marginaal elektrimüüjate hulgas ning arvutatud töö autori poolt talle ametialaselt teatavaks saanud andmete alusel. Elektrienergia aktsiisi suurus on määratud Eesti Vabariigi, Alkoholi-, tubaka-, kütuse- ja elektriaktsiisi seadusega ja on 1 €/MWh [38]. Tegu on riikliku maksuga, millest rahastatakse keskkonnahoidu. Taastuenergia tasu on riigi kehtestatud tasu, mille arvutab igaks aastaks ning avaldab Eesti põhivõrguettevõtja Elering. Taastuenergia tasu on taastuvast energiaallikast või tõhusa koostootmise režiimil toodetud ning võrku antud elektrienergia toetuste rahastamise kulu [39]. Selle tasu suurus lõputöö kirjutamise hetkel on 11,3 €/MWh [40]. Võrguteenuse tasu makstakse võrguteenuse osutajale elektrivõrgu taristu ülalhoidmise ning arendamise eest. Võrguteenuse tasu arvutatakse riiklikult kehtestatud metoodika alusel ning selle kooskõlastab Konkurentsiamet. Antud lõputöös kasutatud võrguteenuse tasu on 28,32 €/MWh [41].

Elektrienergia müügil tagasi võrku arvestatakse peale Nordpool börsihinna lisaks ka elektriostja marginaali. Käesoleva lõputöö arvutustes kasutatakse elektriostja marginaali 1 €/MWh [42].

Reaktiivenergia kompenseerimisega seotud arvutustes kasutatakse tarbitava reaktiivenergia hinnana 5,96 €/MVARh ning võrku antava reaktiivenergia hinnana 9,97 €/MVARh [41].

Tasuvusarvutuste tegemisel on lihtsustusena jäetud arvestamata võrguettevõtja juures liitumistingimuste muutmisega seotud kulud. Lisaks on tehtud eeldus, et elektrienergia hinnatõus on võrdväärne inflatsiooniga elimineerides teineteise mõju, mistõttu ei ole arvutustes arvestatud raha väärtuse muutumisega ajas ning elektrienergia tõusuga tulevikus.



Joonis 6.1.1 Nordpool, Eesti regiooni, elektri tunnihinnad (€/MWh) aastal 2021. [37]

6.2 Tööstustarbija 1 energiasalvestusalajaama tasuvusanalüüs

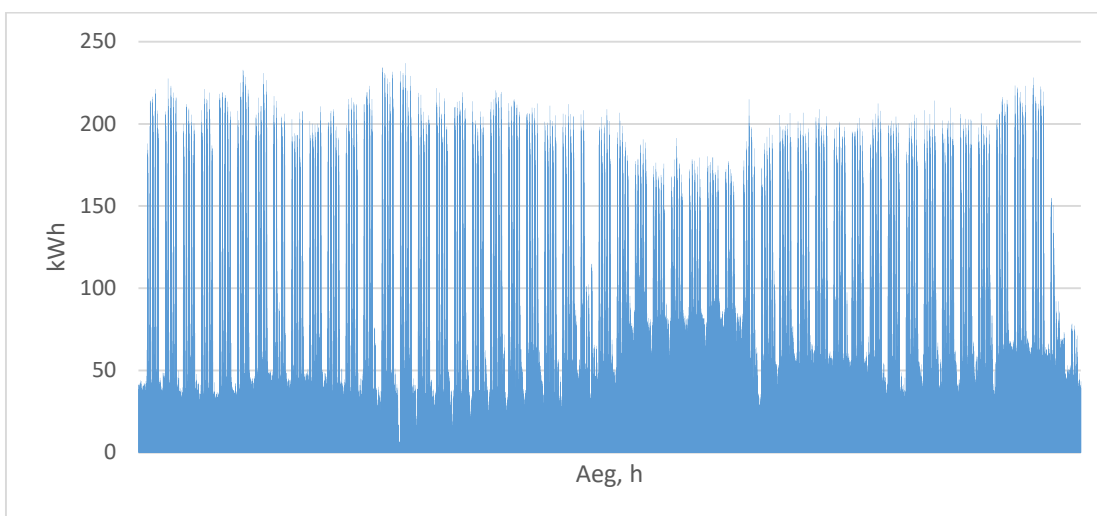
Tööstustarbija 1 planeeritud alajaamade tasuvusanalüüsi läbiviimiseks arvutatakse esmalt elektrienergia hind, mida tööstustarbija maksaks, kui ta salvestist elektri tarbimise asemel ostaks elektrienergiat otse võrgust, Nordpool börsilt, päeva kõige kõrgema hinnaga tunnil. Arvutused tehakse tööstustarbija 2021 tarbimisandmete põhjal (Joonis 6.2.1) ning iga päeva kohta eraldi (Joonised 6.2.2, 6.2.3, 6.2.4, 6.2.5), mis hiljem summeeritakse, et saada aastast kulu, kui tööstustarbija ostaks elektrit otse võrgust (Tabel 6.2.3). Energiakoguse arvutustes võetakse peale tööstustarbija tarbimisandmetele arvesse ka akupanga mahtuvust, akupanga tühjakslaetavuse sügavust ning inverteri kasutegurit (Tabel 6.2.2). Lisaks Nordpool börsi tunnihindadele arvestatakse elektrienergia arutamisel ka elektrimüüja marginaali, elektrienergia aktsiisi, taastuvenergia tasu ning võrguteenuse tasuga (Tabel 6.2.1).

Tabel 6.2.1 Nordpool börsi tunnihinnale lisanduvad tasud elektri ostmisel [38], [39], [40], [41]

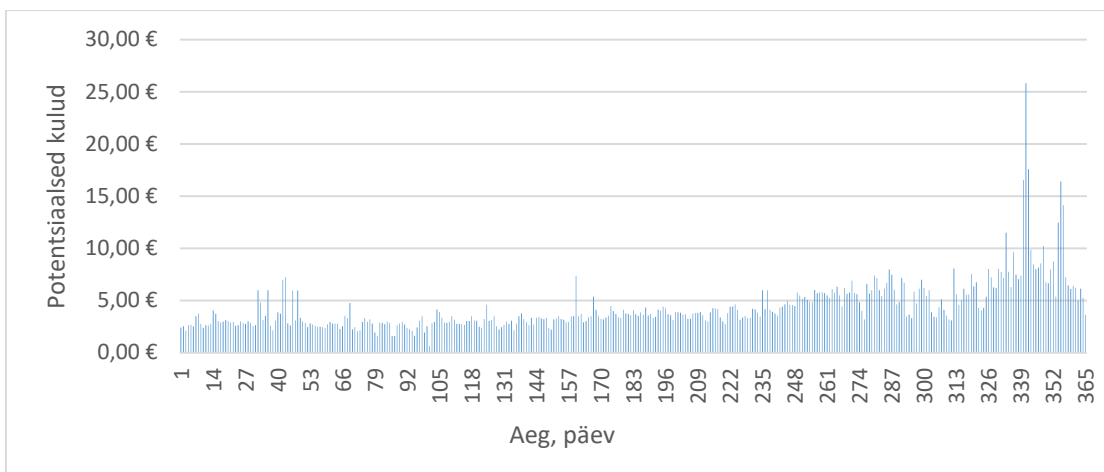
Tasu liik	Tasu suurus [€/MWh]
Elektrimüüja marginaal	0,60
Elektrienergia aktsiis	1,00
Taastuenergia tasu	11,30
Võrguteenuse tasu	28,32
Kokku	41,22

Tabel 6.2.2 Tööstustarbija 1 planeeritud alajaamade tehnilised parameetrid [10], [12], [19], [34]

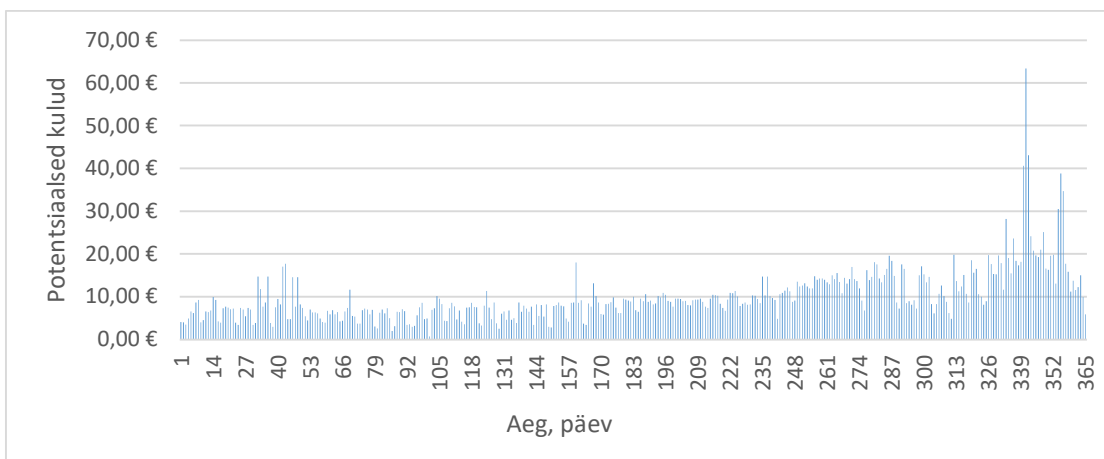
Alajaam	TT1-AJ1	TT1-AJ2	TT1-AJ3	TT1-AJ4
Akupanga mahtuvus [kWh]	28,7	68,4	136,32	204,48
Akupanga tühjakslaetavuse sügavus	90%	90%	90%	90%
Akupanga kasutatav mahtuvus [kWh]	25,83	61,56	122,69	184,03
Akupanga kasutegur	97,1%	97,1%	95,0%	95,0%
Inverteri kasutegur	96,0%	98,8%	98,8%	98,8%
Alajaama kasutatav mahtuvus [kWh]	24,80	60,82	121,22	181,82



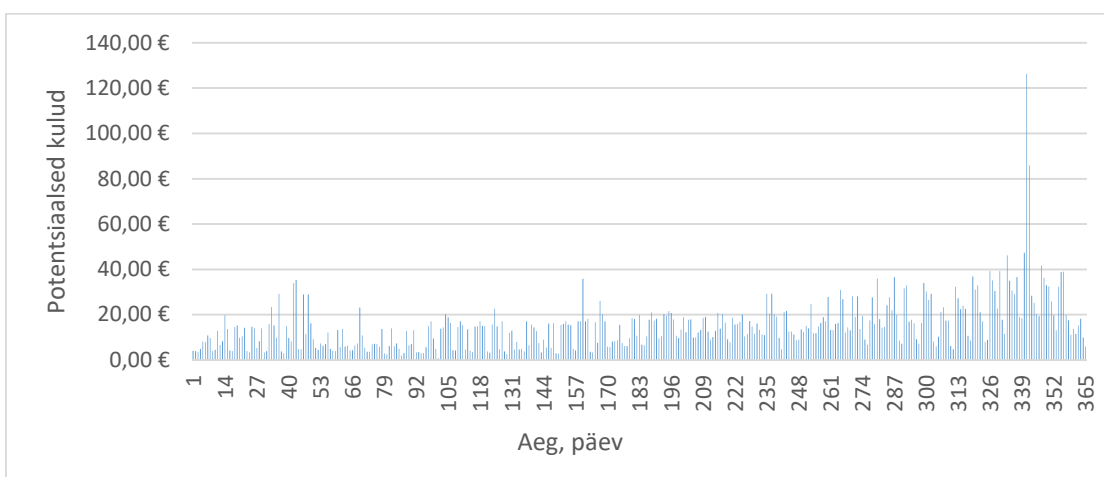
Joonis 6.2.1 Tööstustarbija 1 vaadeldava liitumispunkti elektritarve tundide kaupa aastal 2021.



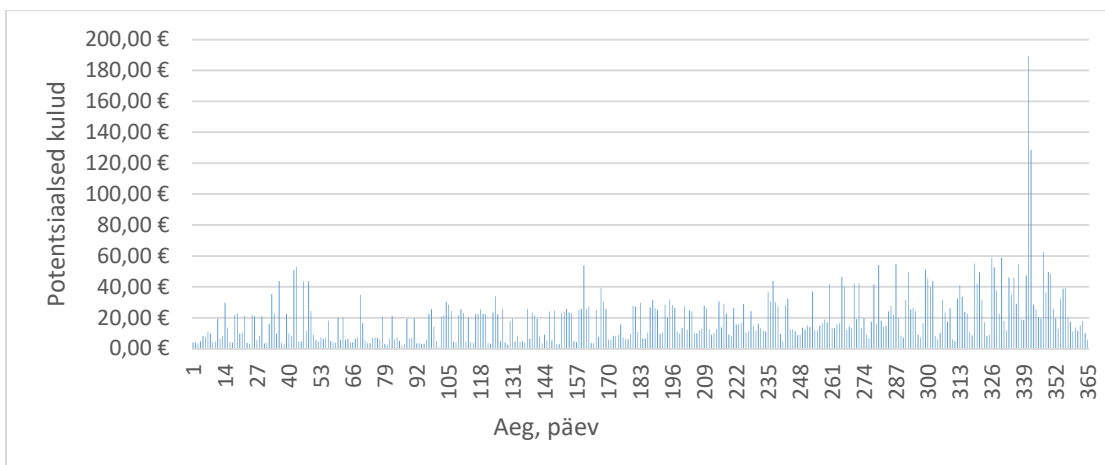
Joonis 6.2.2 Tööstustarbija 1 kulutused elektrienergiale maksimum hinnaga tunnil, kui salvestusalajaama TT1-AJ1 mitte kasutada (2021. a. päevade kaupa).



Joonis 6.2.3 Tööstustarbija 1 kulutused elektrienergiale maksimum hinnaga tunnil, kui salvestusalajaama TT1-AJ2 mitte kasutada (2021. a. päevade kaupa).



Joonis 6.2.4 Tööstustarbija 1 kulutused elektrienergiale maksimum hinnaga tunnil, kui salvestusalajaama TT1-AJ3 mitte kasutada (2021. a. päevade kaupa).

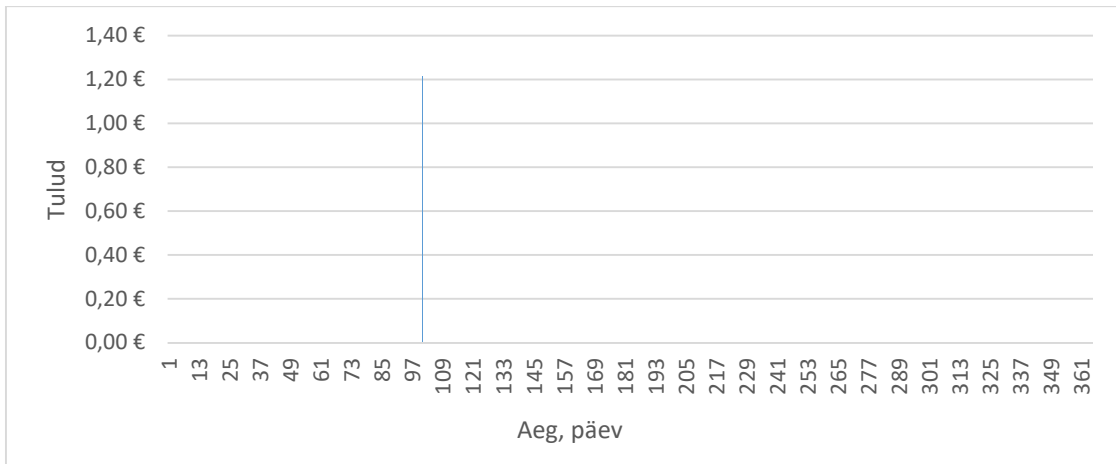


Joonis 6.2.5 Tööstustarbija 1 kulutused elektrienergiALE maksimum hinnaga tunnil, kui salvestusalajaama TT1-AJ4 mitte kasutada (2021. a. päevade kaupa).

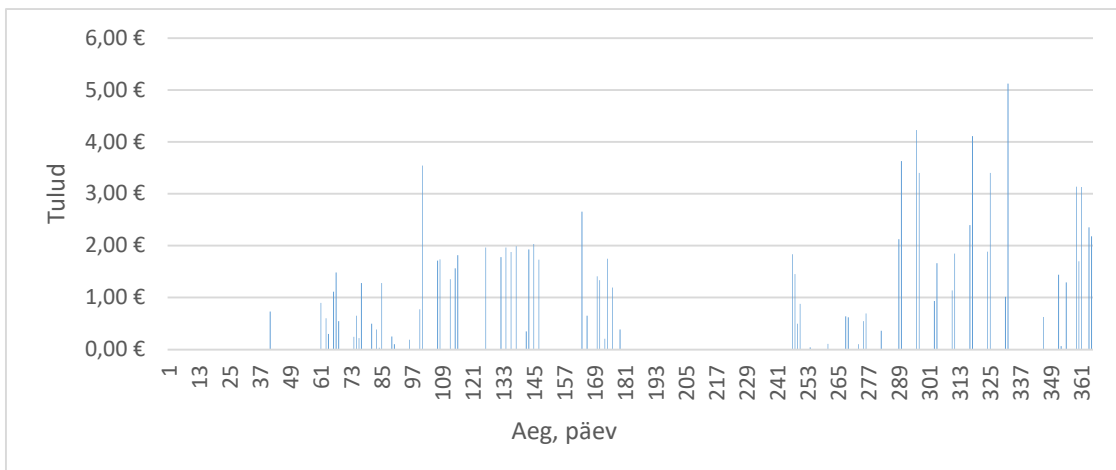
Tabel 6.2.3 Tööstustarbija 1 kulutused elektrienergiALE maksimum hinnaga tunnil, kui energiasalvestus alajaamu mitte kasutada (2021. a.)

Alajaam	TT1-AJ1	TT1-AJ2	TT1-AJ3	TT1-AJ4
Kokku	1 593 €	3 659 €	5 513 €	6 952 €

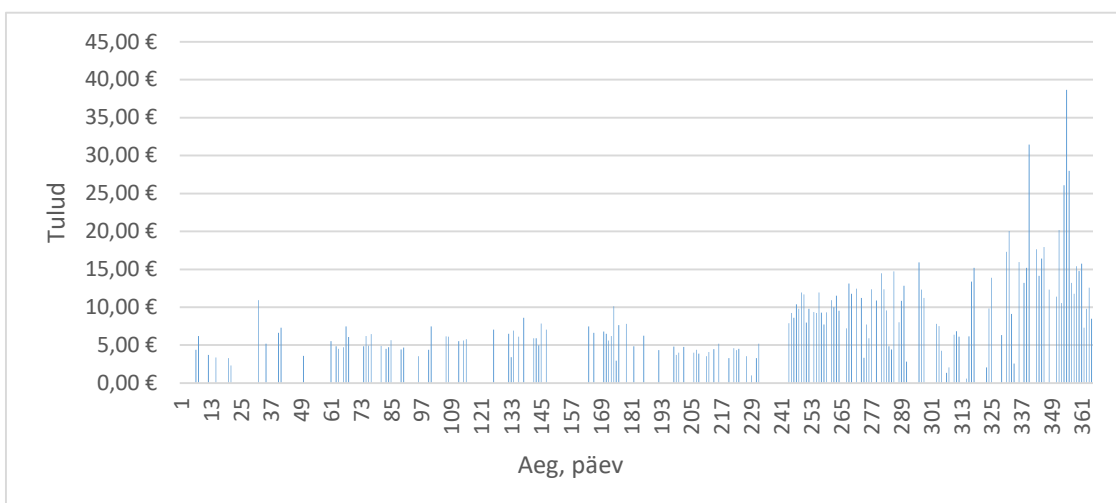
Järgneva sammuna tasuvusanalüüsi läbiviimisel arvutatakse elektrienergia hind, mida tööstustarbija teeniks oma vajadustest järele jääva elektrienergia müügiga salvestitest tagasi elektrivõrku. Antud kalkulatsioonis võetakse eelduseks, et müük toimub, kui tööstustarbija enda elektritarve päeva maksimaalse hinnaga tunnil on väiksem alajaama kasutatavast mahtuvusest ning ostetava elektri hind koos kõikide maksude ning tasudega on madalam, kui elektrimüügilt saadav tulu peale lisanduvate tasude mahaarvamist. Elektrienergia ostul lisanduvad börsihinnale elektrimüüja marginaal, elektrienergia aktsiis, taastuenergia tasu ning võrguteenuse tasu. Elektrienergia müügil aga lahutatakse börsihinnast elektriostja marginaal. Arvutused tehakse iga päeva kohta eraldi (Joonised 6.2.6, 6.2.7, 6.2.8, 6.8.9), mis hiljem summeritakse, et saada aastast tulu ülejääva elektrienergia müügist, salvestitest tagasi elektrivõrku (Tabel 6.2.4).



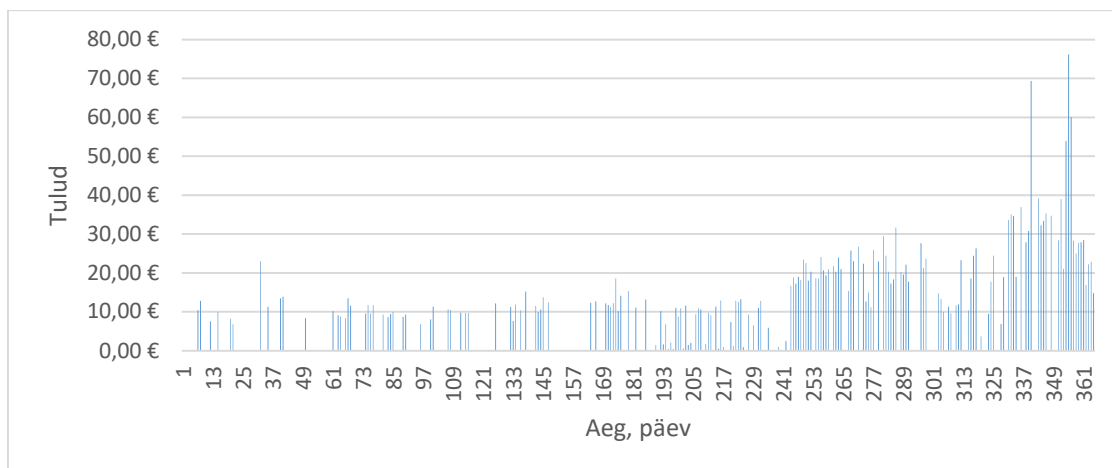
Joonis 6.2.6 Tulud alajaamas TT1-AJ1 üle jääva elektrienergia müügist tagasi võrku (2021. a. päevade kaupa).



Joonis 6.2.7 Tulud alajaamas TT1-AJ2 üle jääva elektrienergia müügist tagasi võrku (2021. a. päevade kaupa).



Joonis 6.2.8 Tulud alajaamas TT1-AJ3 üle jääva elektrienergia müügist tagasi võrku (2021. a. päevade kaupa).

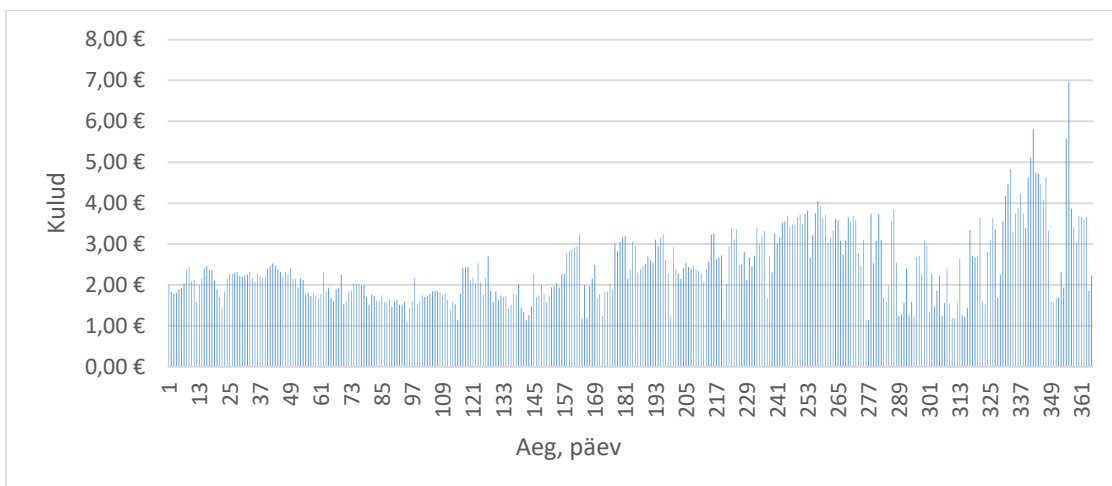


Joonis 6.2.9 Tulud alajaamas TT1-AJ4 üle jääva elektrienergia müügist tagasi võrku (2021. a. päevade kaupa).

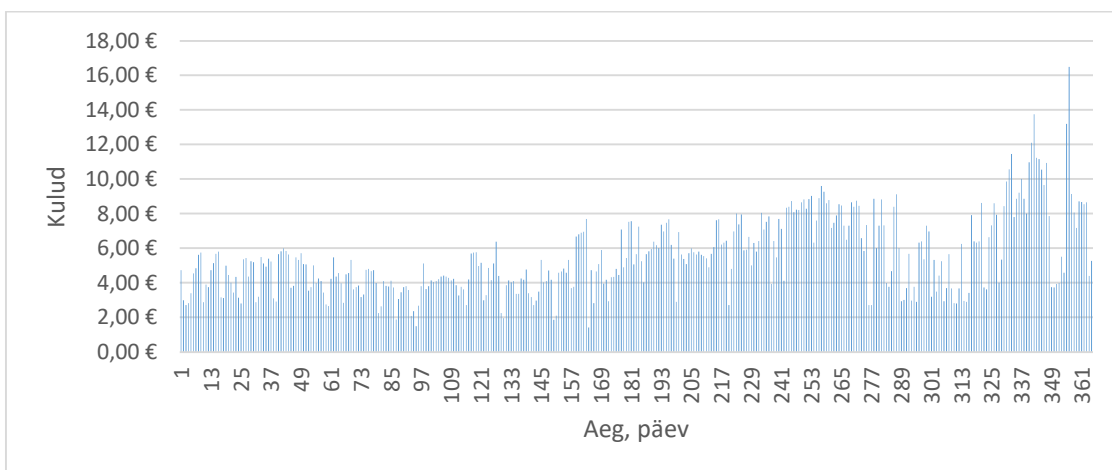
Tabel 6.2.4 Tulud alajaamades üle jääva elektrienergia müügist tagasi võrku (2021. a.)

Alajaam	TT1-AJ1	TT1-AJ2	TT1-AJ3	TT1-AJ4
Kokku	1 €	109 €	1389 €	2984 €

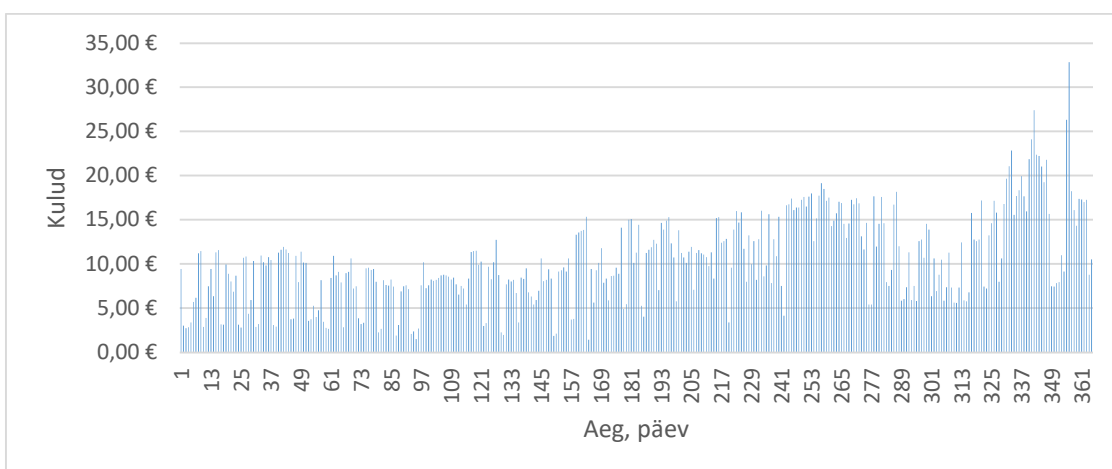
Järgmine etapp tasuvusanalüüsi koostamisel on alajaamade salvestite täitmiseks vajamineva elektrienergia hinna leidmine. Selleks kasutatakse Nordpool Eesti regiooni madalaimat päeva tunnihinda, mis jääb vahemikku päeva algusest kuni päeva maksimum hinnaga tund, millele lisanduvad elektrimüüja marginaal, elektrienergia aktsiis, taastuvenergia tasu ning võrguteenuse tasu. Ostetavate elektrikoguste arvutamisel võetakse arvesse salvestist eelneval päeval kulutatud energiakogust. Nii tööstustarbija enda poolt tarbitut, kui ka elektrivõrku tagasi müüdit. Lisaks võetakse ostetava elektrikoguse arvutamisel arvesse inverteri ning akupanga efektiivsusest tulenevaid kadusid. Arvutused tehakse tööstustarbija 2021 tarbimisandmete põhjal ning iga päeva kohta eraldi (Joonised 6.2.10, 6.2.11, 6.2.12, 6.2.13), mis hiljem summeritakse, et saada aastast kulu elektrienergia ostmiseks (Tabel 6.2.5).



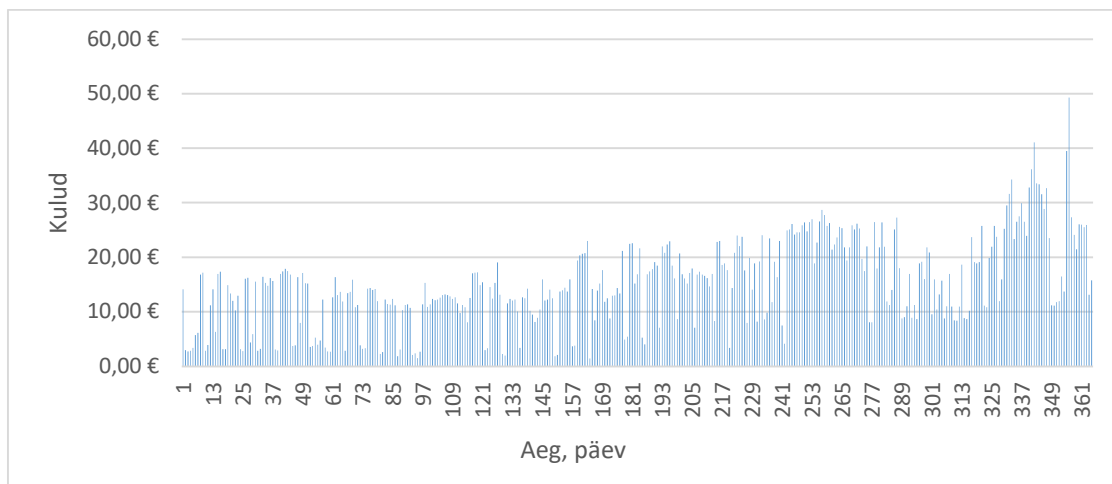
Joonis 6.2.10 Alajaama TT1-AJ1 akupanga täitmiseks vajamineva elektri hind (2021. a. päevade kaupa).



Joonis 6.2.11 Alajaama TT1-AJ2 akupanga täitmiseks vajamineva elektri hind (2021. a. päevade kaupa).



Joonis 6.2.12 Alajaama TT1-AJ3 akupanga täitmiseks vajamineva elektri hind (2021. a. päevade kaupa).



Joonis 6.2.13 Alajaama TT1-AJ4 akupanga täitmiseks vajamineva elektri hind (2021. a. päevade kaupa).

Tabel 6.2.5 Alajaamade akupankade täitmiseks vajamineva elektri hind (2021. a.)

Alajaam	TT1-AJ1	TT1-AJ2	TT1-AJ3	TT1-AJ4
Kokku	881 €	2006 €	3776 €	5527 €

Järgneva sammuna energiasalvestusalajaamade tasuvusanalüüsi läbiviimisel liidetakse omavahel potentsiaalne kulu elektrienergiale, kui energiasalvestusalajaamu ei rakendataks ning elektrienergia tagasimüügist elektrivõrku tulu ei saada ning lahutatakse alajaama akupanga täitmiseks ostetava elektrienergia kulu, et saada energiasalvestusalajaama kasutamisest saadav tulu. Arvutused tehakse varem kalkuleeritud 2021 aasta summaarsete andmetega. Edasi arvutatakse alajaamade tasuvusaeg aastates. Selleks kasutatakse lõputöö paragrahvis 4 arvutatud planeeritud salvestusalajaamade hindu, mis jagatakse eelnevalt kalkuleeritud energiasalvestusalajaamade kasutamisest saadava aastase tuluga. Järgnevalt leitakse energiasalvestusalajaamade tasuvusaeg laadimistsükklites. Selleks korrutatakse energiasalvestusalajaamade tasuvusaeg aastates päevade arvuga aastas, kuna planeeritud alajaamade töötssükklis on arvestatud 1 ööpäev. Edasi kõrvutatakse salvestusalajaamade tasuvusajad tsükklites ning akupankade eluiga tsükklites, et hinnata, kas energiasalvestusalajaama tasuvusaeg on väiksem, suurem või võrdne salvesti elueaga. Ehk siis kas, energiasalvestusalajaama kasutamine etteantud olukorras on majanduslikult kasumlik või kahjumlik (Tabel 6.2.6).

Tabel 6.2.6 Tööstustarbija 1 planeeritud energiasalvestusalajaamade tasuvus [19], [34]

Alajaam	TT1-AJ1	TT1-AJ2	TT1-AJ3	TT1-AJ4
Potentsiaalne kulu elektrienergiale aastas, kui energiasalvestusalajaamu ei kasutataks	1 593 €	3 659 €	5 513 €	6 952 €
Elektrienergia tagasimüügist elektrivõrku saadav tulu aastas	1 €	109 €	1 389 €	2 984 €
Alajaama akupanga täitmiseks ostetava elektrienergia kulu aastas	881 €	2 006 €	3 776 €	5 527 €
Energiasalvestusalajaama kasutamisest saadav tulu aastas	713 €	1 762 €	3 126 €	4 408 €
Planeeritud salvestusalajaama hind	29 000 €	38 000 €	71 500 €	101 000 €
Salvestusalajaama tasuvusaeg aastates	40,7	21,6	22,9	22,9
Salvestusalajaama tasuvusaeg tsüklites	14 841	7 873	8 350	8 363
Salvesti eluiga tsüklites	6000	6000	5000	5000
Hinnang salvestusalajaama tasuvusele	kahjumlik	kahjumlik	kahjumlik	kahjumlik

6.3 Tööstustarbija 2 energiasalvestusalajaama tasuvusanalüüs

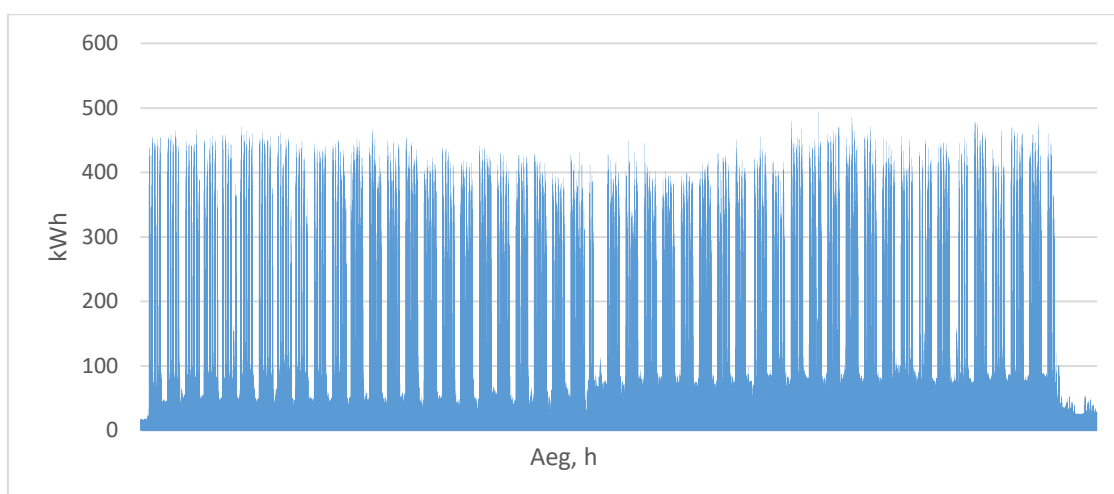
Tööstustarbija 2 planeeritud alajaamade tasuvusanalüüsi läbiviimiseks arvutatakse esmalt elektrienergia hind, mida tööstustarbija maksaks, kui ta salvestist elektri tarbimise asemel ostaks elektrienergiat otse võrgust, Nordpool börsilt, päeva kõige kõrgema hinnaga tunnil. Arvutused tehakse tööstustarbija 2021 tarbimisandmete põhjal (Joonis 6.3.1) ning iga päeva kohta eraldi (Joonised 6.3.2, 6.3.3, 6.3.4, 6.3.5), mis hiljem summeeritakse, et saada aastas kulu, kui tööstustarbija ostaks elektrit otse võrgust (Tabel 6.3.3). Energiakoguse arvutustes võetakse peale tööstustarbija tarbimisandmetele arvesse ka akupanga mahtuvust, akupanga tühjakslaetavuse sügavust ning inverteri kasutegurit (Tabel 6.3.2). Lisaks Nordpool börsi tunnihindadele arvestatakse elektriinna arvutamisel ka elektrimüüja marginaali, elektrienergia aktsiisi, taastuvenergia tasu ning võrguteenuse tasuga (Tabel 6.3.1).

Tabel 6.3.1 Nordpool börsi tunnihinnale lisanduvad tasud elektri ostmisel [38], [39], [40], [41]

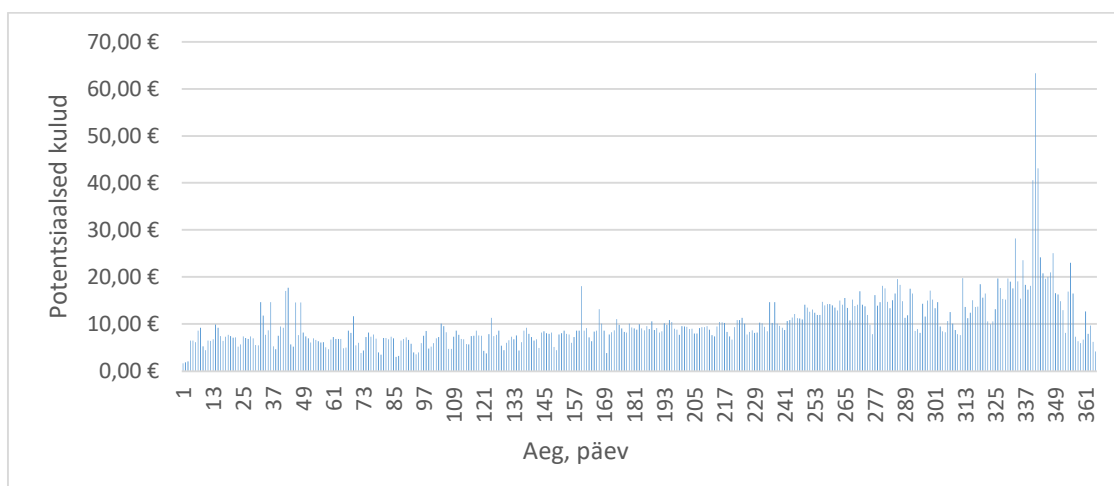
Tasu liik	Tasu suurus [€/MWh]
Elektrimüüja marginaal	0,60
Elektrienergia aktsiis	1,00
Taastuvenergia tasu	11,30
Võrguteenuse tasu	28,32
Kokku	41,22

Tabel 6.3.2 Tööstustarbija 2 planeeritud alajaamade tehnilised parameetrid [10], [12], [13], [19], [34]

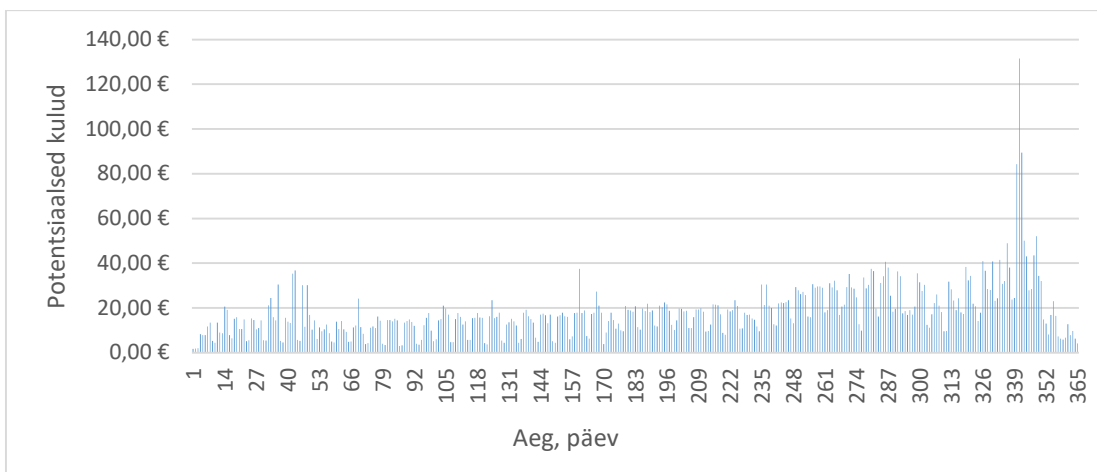
Alajaam	TT2-AJ1	TT2-AJ2	TT2-AJ3	TT2-AJ4
Akupanga mahtuvus [kWh]	68,4	142,0	289,68	431,68
Akupanga tühjakslaetavuse sügavus	90%	90%	90%	90%
Akupanga kasutatav mahtuvus [kWh]	61,56	127,8	260,71	388,51
Akupanga kasutegur	97,1%	95,0%	95,0%	95,0%
Inverteri kasutegur	98,8%	98,8%	99,01%	99,01%
Alajaama kasutatav mahtuvus [kWh]	60,82	126,27	258,13	384,67



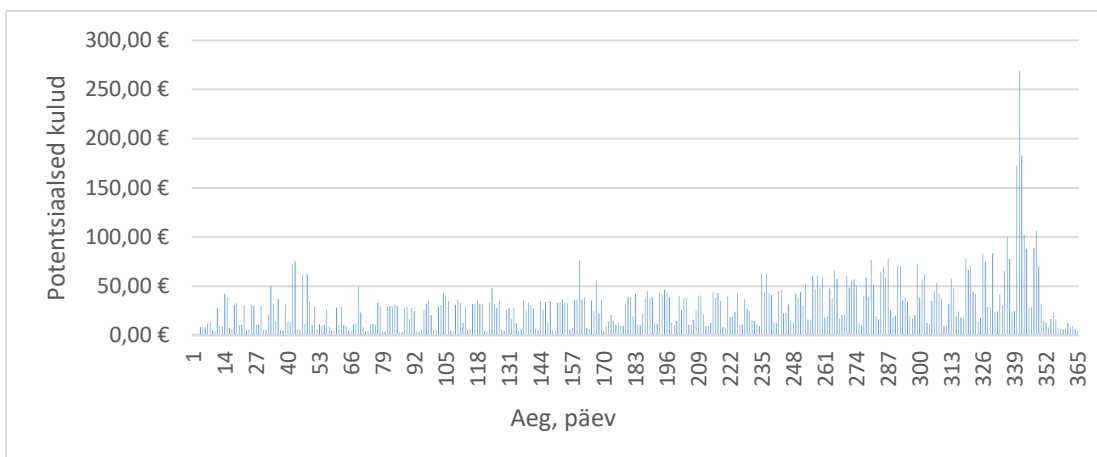
Joonis 6.3.1 Tööstustarbija 2 vaadeldava liitumispunkti elektritarve tundide kaupa aastal 2021.



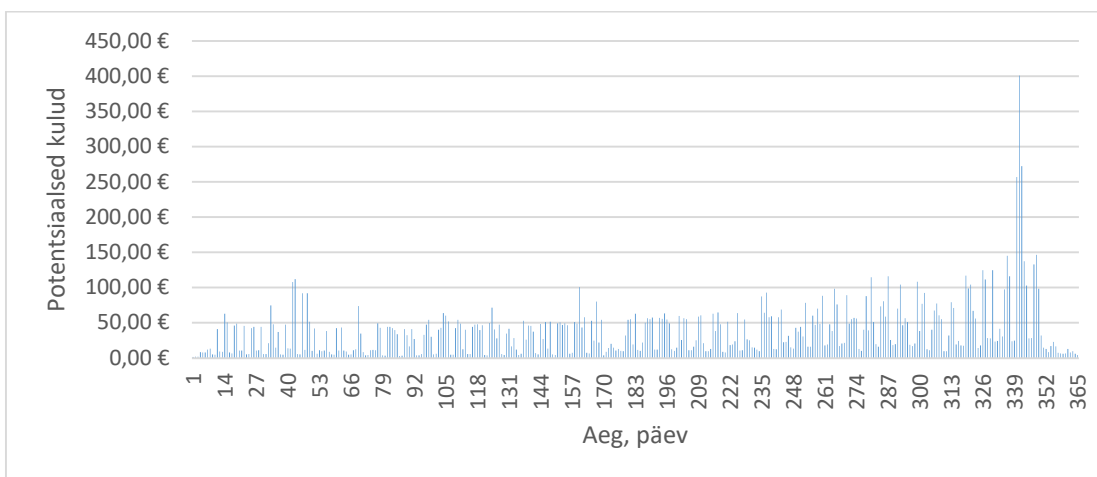
Joonis 6.3.2 Tööstustarbija 2 kulutused elektrienergiale maksimum hinnaga tunnil, kui salvestusalajaama TT2-AJ1 mitte kasutada (2021. a. päevade kaupa).



Joonis 6.3.3 Tööstustarbija 2 kulutused elektrienergiale maksimum hinnaga tunnil, kui salvestusalajaama TT2-AJ2 mitte kasutada (2021. a. päevade kaupa).



Joonis 6.3.4 Tööstustarbija 2 kulutused elektrienergiale maksimum hinnaga tunnil, kui salvestusalajaama TT2-AJ3 mitte kasutada (2021. a. päevade kaupa).

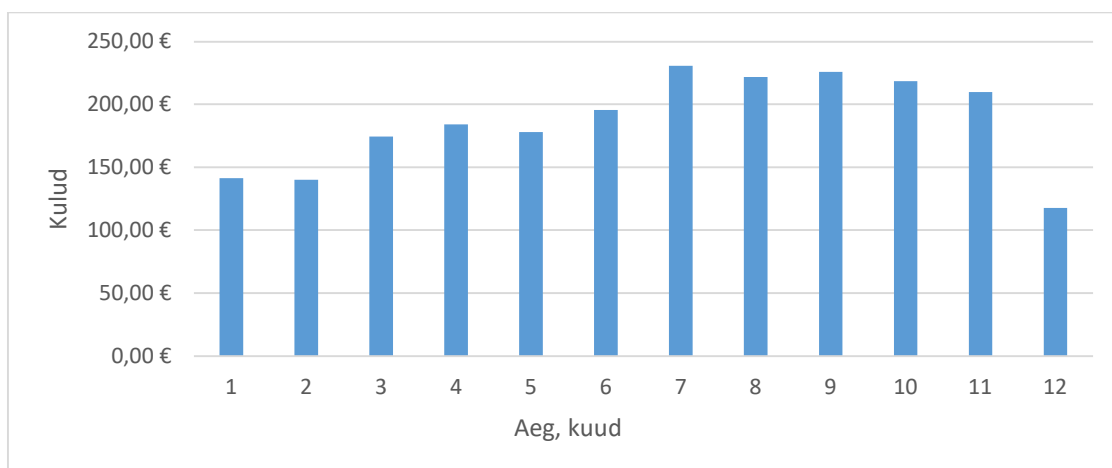


Joonis 6.3.5 Tööstustarbija 2 kulutused elektrienergiale maksimum hinnaga tunnil, kui salvestusalajaama TT2-AJ4 mitte kasutada (2021. a. päevade kaupa).

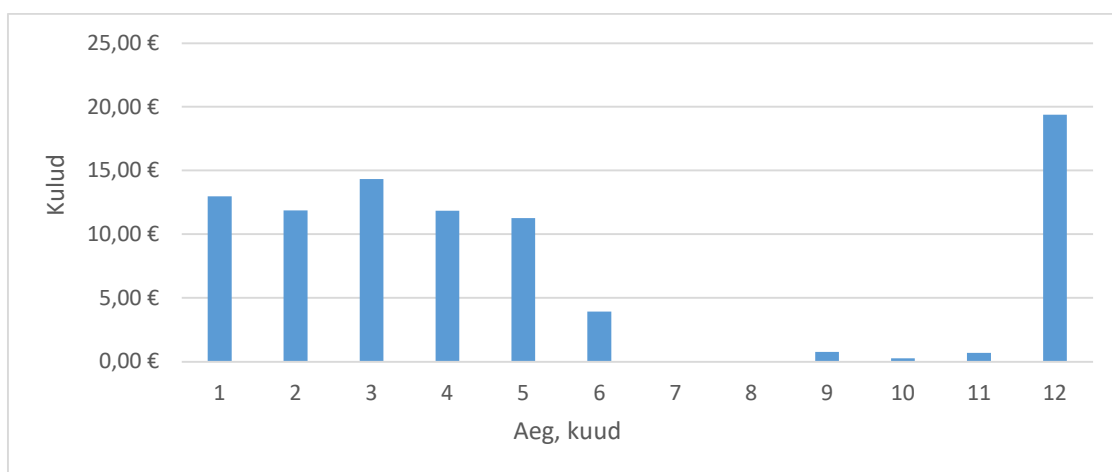
Tabel 6.3.3 Tööstustarbija 2 kulutused elektrienergiALE maksimum hinnaga tunnil, kui energiasalvestus alajaamu mitte kasutada (2021. a.)

Alajaam	TT2-AJ1	TT2-AJ2	TT2-AJ3	TT2-AJ4
Kokku	3723 €	6587 €	10760 €	13883 €

Järgneva sammuna tasuvusanalüüsi läbiviimisel arvutatakse tööstustarbija kulud reaktiivenergiALE, mida saaks kokku hoida inverteriga vastavalt reaktiivenergiat tootes või tarbides. Eraldiseisvalt arvutatakse kulud nii võrku antava kui ka võrgust tarbitava reaktiivenergia kohta, mis seejärel summeeritakse, et saada kogukulu. Arvutused tehakse vastavalt tööstustarbija 2021 aasta reaktiivenergia andmetele iga kuu kohta eraldi (Joonised 6.3.6, 6.3.7) ning seejärel summeritakse, et saada kulud aasta kohta (Tabel 6.3.4). Tarbitava reaktiivenergia hinnaks kasutatakse kalkulatsioonides 5,96 €/MVARh [41] ning võrku antava reaktiivenergia hinnaks 9,97 €/VARh [41].



Joonis 6.3.6 Tööstustarbija 2 kulud võrgust tarbitavale reaktiivenergiALE (2021. a. kuude kaupa).

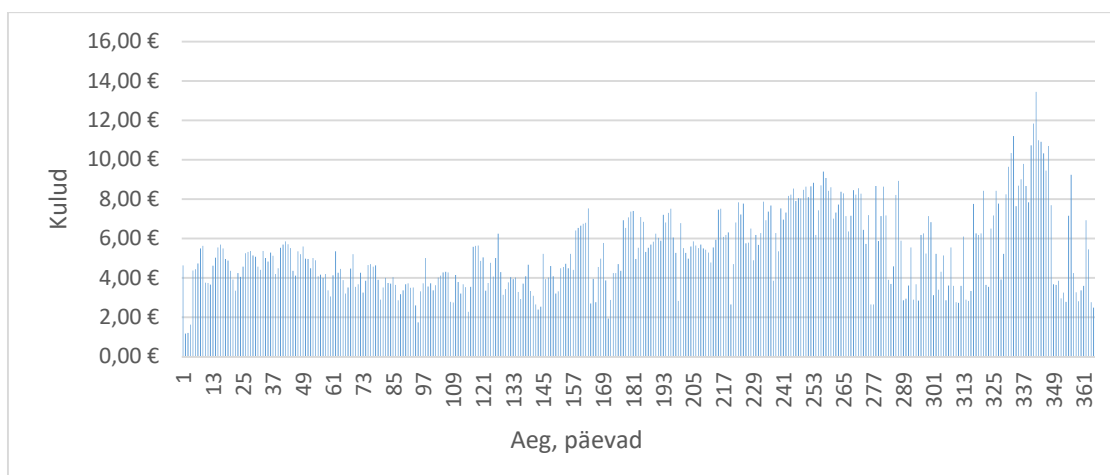


Joonis 6.3.7 Tööstustarbija 2 kulud võrku antavale reaktiivenergiALE (2021. a. kuude kaupa).

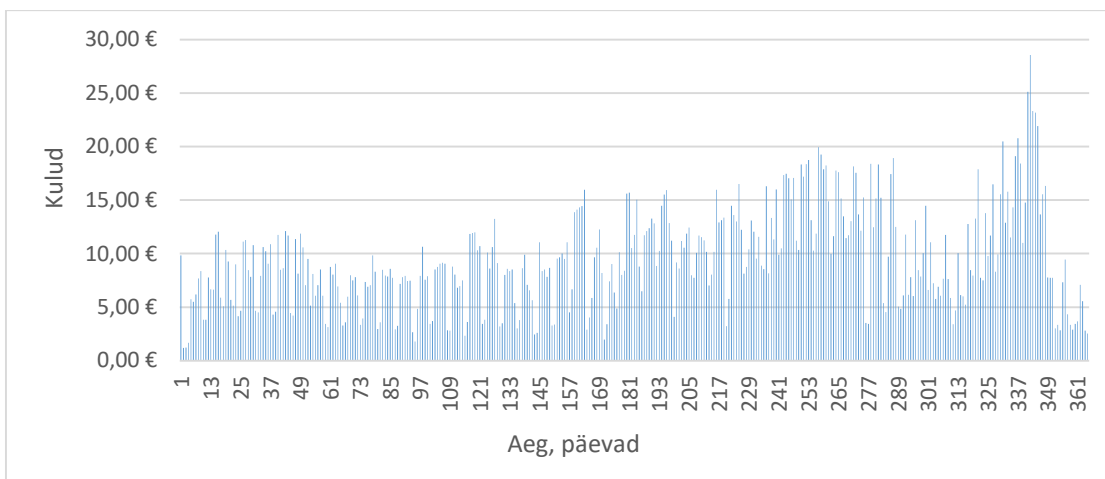
Tabel 6.3.4 Tööstustarbija 2 kulutused reaktiivenergiele (2021. a.)

Alajaam	TT2-AJ1	TT2-AJ2	TT2-AJ3	TT2-AJ4
Kulud võrgust tarbitavale reaktiivenergiele	2238 €	2238 €	2238 €	2238 €
Kulud võrku antavale reaktiivenergiele	87 €	87 €	87 €	87 €
Kokku	2325 €	2325 €	2325 €	2325 €

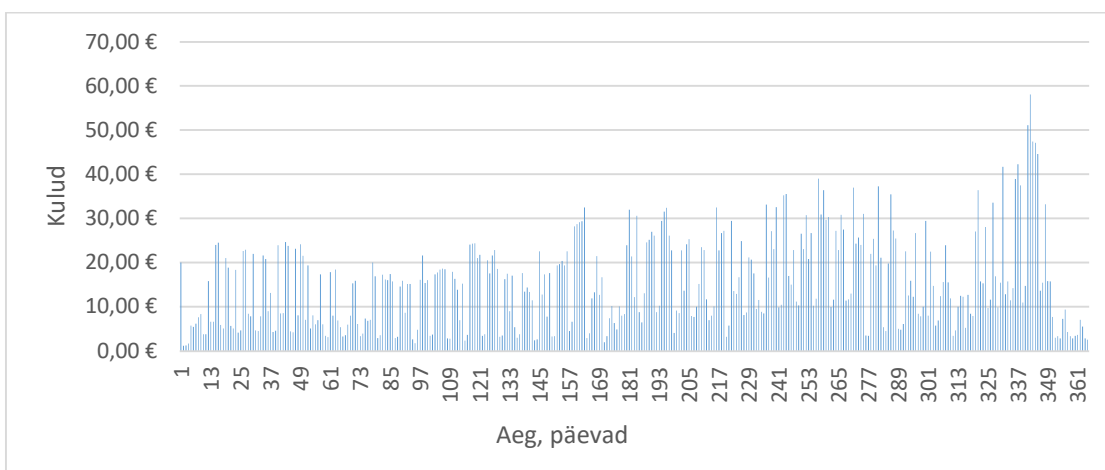
Järgmine etapp tasuvusanalüüsi koostamisel on alajaamade salvestite täitmiseks vajamineva elektrienergia hinna leidmine. Selleks kasutatakse Nordpool Eesti regiooni madalaimat päeva tunnihinda, mis jääb vahemikku päeva algusest kuni päeva maksimum hinnaga tund, millele lisanduvad elektrimüüja marginaal, elektrienergia aktsiis, taastuvenergia tasu ning võrguteenuse tasu. Ostetavate elektrikoguste arvutamisel võetakse arvesse salvestist eelneval päeval tööstustarbija poolt kulutatud energiakogust. Lisaks võetakse ostetava elektrikoguse arvutamisel arvesse inverteri ning akupanga efektiivsusest tulenevaid kadusid. Arvutused tehakse tööstustarbija 2021 tarbimisandmete põhjal ning iga päeva kohta eraldi (Joonised 6.3.8, 6.3.9, 6.3.10, 6.3.11), mis hiljem summeritakse, et saada aastast kulu elektrienergia ostmiseks (Tabel 6.3.5).



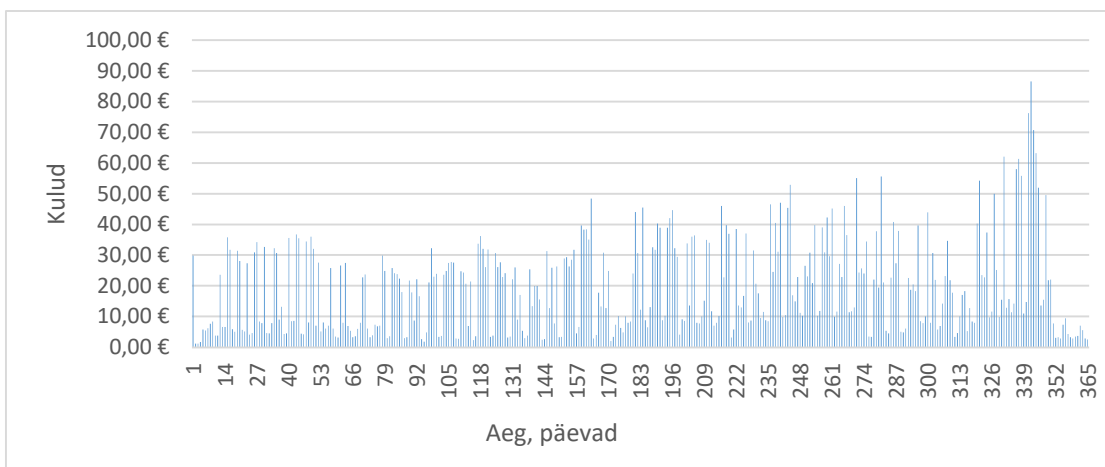
Joonis 6.3.8 Alajaama TT2-AJ1 akupanga täitmiseks vajamineva elektri hind (2021. a. päevade kaupa).



Joonis 6.3.9 Alajaama TT2-AJ2 akupanga täitmiseks vajamineva elektri hind (2021. a. päevade kaupa).



Joonis 6.3.10 Alajaama TT2-AJ3 akupanga täitmiseks vajamineva elektri hind (2021. a. päevade kaupa).



Joonis 6.3.11 Alajaama TT2-AJ4 akupanga täitmiseks vajamineva elektri hind (2021. a. päevade kaupa).

Tabel 6.3.5 Alajaamade akupankade täitmiseks vajamineva elektri hind (2021. a.)

Alajaam	TT2-AJ1	TT2-AJ2	TT2-AJ3	TT2-AJ4
Kokku	1948 €	3467 €	5528 €	7036 €

Järgneva sammuna energiasalvestusalajaamade tasuvusanalüüsi läbiviimisel liidetakse omavahel potentsiaalne kulu elektrienergiale ning potentsiaalne kulu reaktiivenergia eest, kui energiasalvestusalajaamu ei kasutataks ning lahutatakse alajaama akupanga täitmiseks ostetava elektrienergia kulu, et saada energiasalvestusalajaama kasutamisest saadav tulu. Arvutused tehakse varem kalkuleeritud 2021 aasta summaarsete andmetega. Edasi arvutatakse alajaamade tasuvusaeg aastates. Selleks kasutatakse lõputöö paragrahvis 4 arvatud planeeritud salvestusalajaamade hindu, mis jagatakse eelnevalt kalkuleeritud energiasalvestusalajaamade kasutamisest saadava aastase tuluga. Järgnevalt leitakse energiasalvestusalajaamade tasuvusaeg laadimistsüklites. Selleks korrutatakse energiasalvestusalajaamade tasuvusaeg aastates päevade arvuga aastas, kuna planeeritud alajaamade töötssüklis on arvestatud 1 ööpäev. Edasi kõrvutatakse salvestusalajaamade tasuvusajad tsüklites ning akupankade eluiga tsüklites, et hinnata, kas energiasalvestusalajaama tasuvusaeg on väiksem, suurem või võrdne salvesti elueaga. Ehk siis, kas energiasalvestusalajaama kasutamine etteantud olukorras on majanduslikult kasumlik või kahjumlik (Tabel 6.3.6).

Tabel 6.3.6 Tööstustarbijale 2 planeeritud energiasalvestusalajaamade tasuvus [34], [19]

Alajaam	TT2-AJ1	TT2-AJ2	TT2-AJ3	TT2-AJ4
Potentsiaalne kulu elektrienergiale aastas, kui energiasalvestusalajaamu ei kasutataks	3 722 €	6 587 €	10 760 €	13 883 €
Potentsiaalne kulu reaktiivenergiale aastas, kui energiasalvestusalajaamu ei kasutataks	2 325 €	2 325 €	2 325 €	2 325 €
Alajaama akupanga täitmiseks ostetava elektrienergia kulu aastas	1 948 €	3 467 €	5 528 €	7 036 €
Energiasalvestusalajaama kasutamisest saadav tulu aastas	4 099 €	5 445 €	7 557 €	9 172 €
Planeeritud salvestusalajaama hind	38 000 €	81 500 €	148 500 €	188 500 €
Salvestusalajaama tasuvusaeg aastates	9,3	15,0	19,6	20,6
Salvestusalajaama tasuvusaeg tsüklites	3383	5463	7172	7501
Salvesti eluiga tsüklites	6000	5000	5000	5000
Hinnang salvestusalajaama tasuvusele	kasumlik	kahjumlik	kahjumlik	kahjumlik

6.4 Tööstustarbija 3 energiasalvestusalajaama tasuvusanalüüs

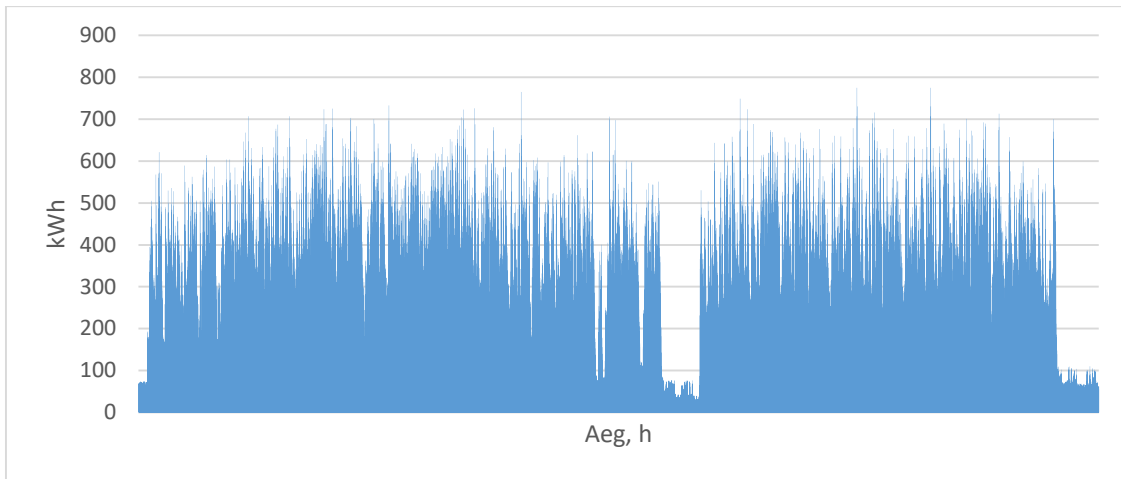
Tööstustarbijale 3 planeeritud alajaamade tasuvusanalüüsi läbiviimiseks arvutatakse esmalt elektrienergia hind, mida tööstustarbija maksaks, kui ta salvestist elektri tarbimise asemel ostaks elektrienergiat otse võrgust, Nordpool börsilt, päeva kõige kõrgema hinnaga tunnil. Arvutused tehakse tööstustarbija 2021 tarbimisandmete põhjal (Joonis 6.4.1) ning iga päeva kohta eraldi (Joonised 6.4.2, 6.4.3, 6.4.4, 6.4.5), mis hiljem summeritakse, et saada aastast kulu, kui tööstustarbija ostaks elektrit otse võrgust (Tabel 6.4.3). Energiakoguse arvutustes võetakse peale tööstustarbija tarbimisandmetele arvesse ka akupanga mahtuvust, akupanga tühjakslaetavuse sügavust ning inverteri kasutegurit (Tabel 6.4.2). Lisaks Nordpool börsi tunnihindadele arvestatakse elektrihinna arvutamisel ka elektrimüüja marginaali, elektrienergia aktsiisi, taastuenergia tasu ning võrguteenuse tasuga (Tabel 6.4.1).

Tabel 6.4.1 Nordpool börsi tunnihinnale lisanduvad tasud elektri ostmisel [38], [39], [40], [41]

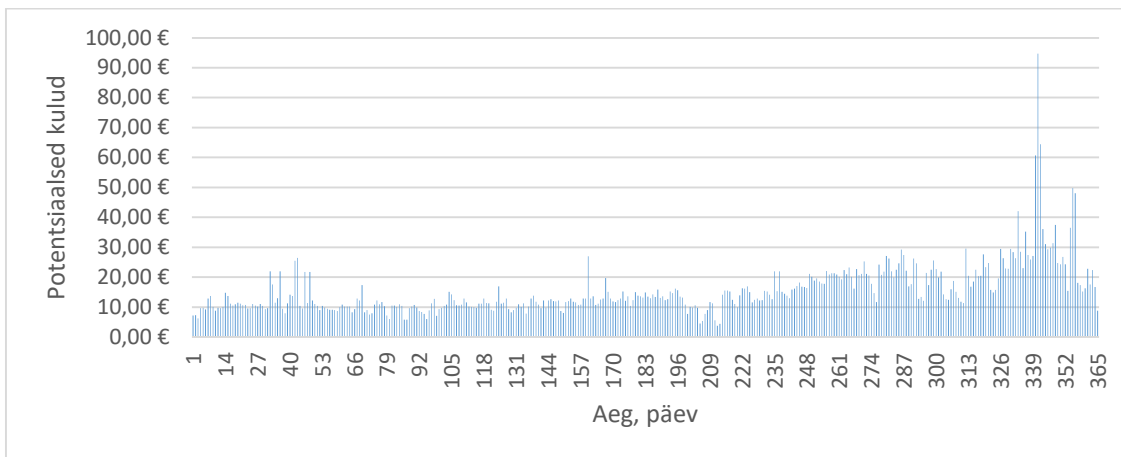
Tasu liik	Tasu suurus [€/MWh]
Elektrimüüja marginaal	0,60
Elektrienergia aktsiis	1,00
Taastuenergia tasu	11,30
Võrguteenuse tasu	28,32
Kokku	41,22

Tabel 6.4.2 Tööstustarbijale 3 planeeritud alajaamade tehnilised parameetrid [12], [13], [19]

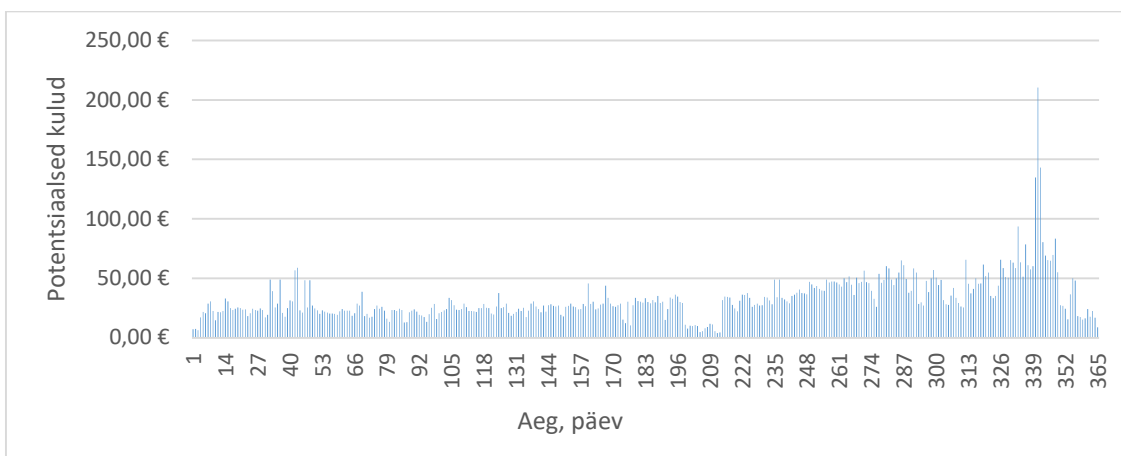
Alajaam	TT3-AJ1	TT3-AJ2	TT3-AJ3	TT3-AJ4
Akupanga mahtuvus [kWh]	102,24	227,2	454,4	653,2
Akupanga tühjakslaetavuse sügavus	90%	90%	90%	90%
Akupanga kasutatav mahtuvus [kWh]	92,02	204,48	408,96	587,88
Akupanga kasutegur	95,0%	95,0%	95,0%	95,0%
Inverteri kasutegur	98,8%	98,8%	99,01%	98,8%
Alajaama kasutatav mahtuvus [kWh]	90,91	202,03	404,91	582,18



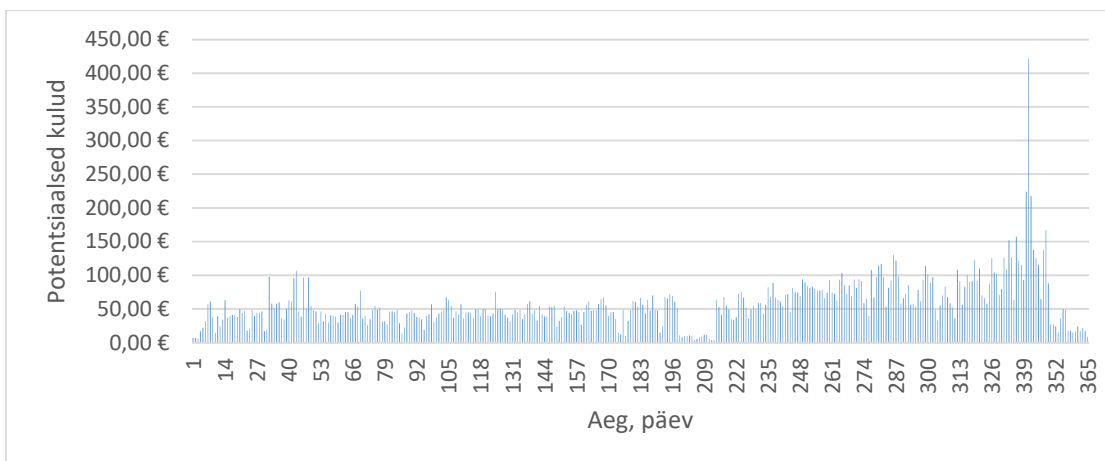
Joonis 6.4.1 Tööstustarbija 3 vaadeldava liitumispunkti elektritarve tundide kaupa aastal 2021.



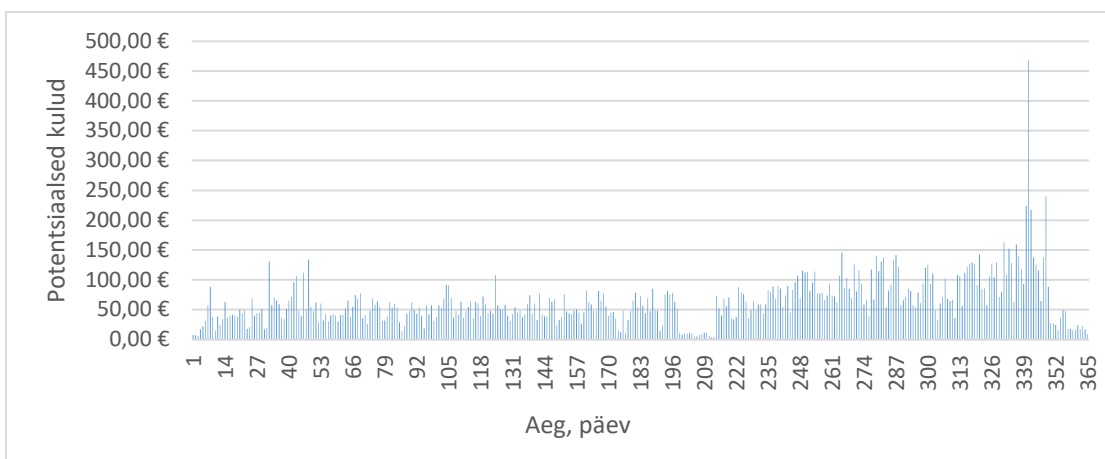
Joonis 6.4.2 Tööstustarbija 2 kulutused elektrienergiale maksimum hinnaga tunnil, kui salvestusalaajama TT3-AJ1 mitte kasutada (2021. a. päevade kaupa).



Joonis 6.4.3 Tööstustarbija 3 kulutused elektrienergiale maksimum hinnaga tunnil, kui salvestusalaajama TT3-AJ2 mitte kasutada (2021. a. päevade kaupa).



Joonis 6.4.4 Tööstustarbija 3 kulutused elektrienergiale maksimum hinnaga tunnil, kui salvestusalajaama TT3-AJ3 mitte kasutada (2021. a. päevade kaupa).



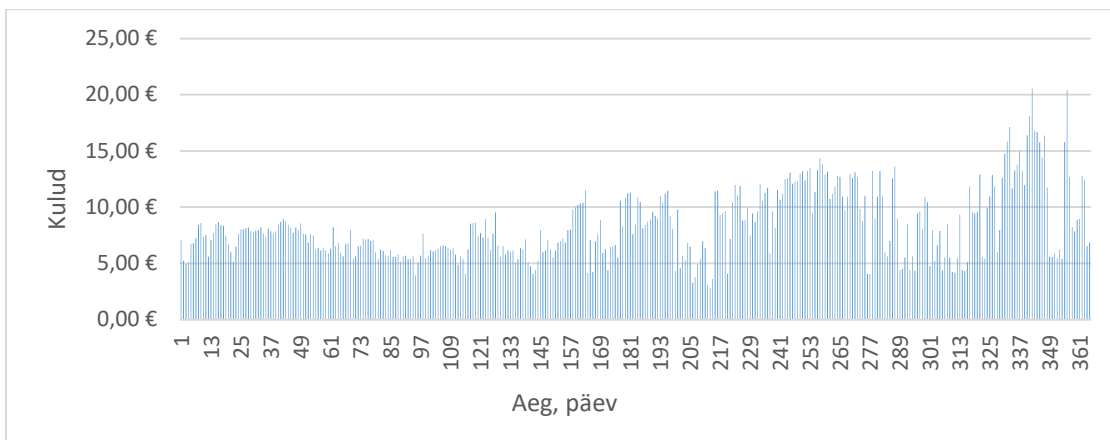
Joonis 6.4.5 Tööstustarbija 3 kulutused elektrienergiale maksimum hinnaga tunnil, kui salvestusalajaama TT3-AJ4 mitte kasutada (2021. a. päevade kaupa).

Tabel 6.4.3 Tööstustarbija 3 kulutused elektrienergiale maksimum hinnaga tunnil, kui energiasalvestus alajaamu mitte kasutada (2021. a.)

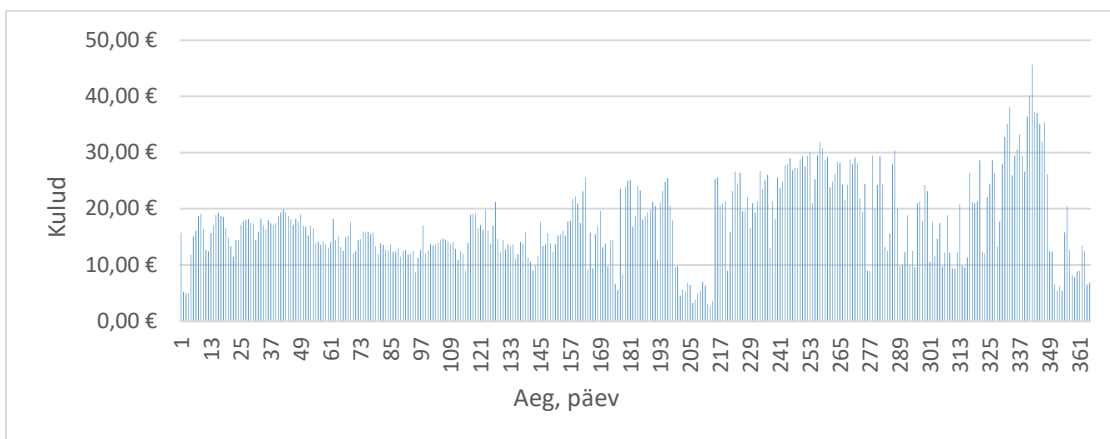
Alajaam	TT3-AJ1	TT3-AJ2	TT3-AJ3	TT3-AJ4
Kokku	5689 €	11909 €	20940 €	23165 €

Järgmine etapp tasuvusanalüüsi koostamisel on alajaamade salvestite täitmiseks vajamineva elektrienergia hinna leidmine. Selleks kasutatakse Nordpool Eesti regiooni madalaimat päeva tunnihinda, mis jääb vahemikku päeva algusest kuni päeva maksimum hinnaga tund, millele lisanduvad elektrimüüja marginaal, elektrienergia aktsiis, taastuvenergia tasu ning võrguteenuse tasu. Ostetavate elektrikoguste arvutamisel võetakse arvesse salvestist eelneval päeval kulutatud energiakogust. Nii tööstustarbija enda poolt tarbitut, kui ka elektrivõrku tagasi müüdit. Lisaks võetakse ostetava elektrikoguse arvutamisel arvesse inverteri ning akupanga efektiivsusest

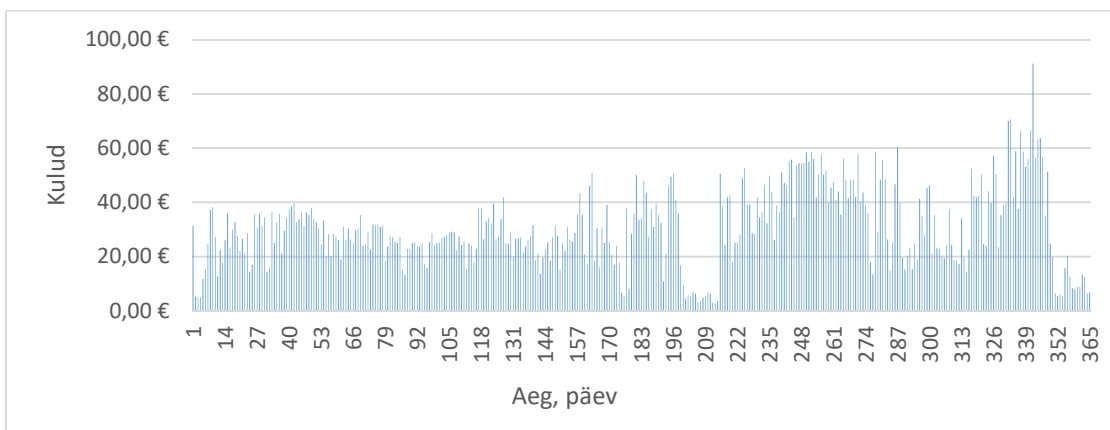
tulenevaid kadusid. Arvutused tehakse tööstustarbija 2021 tarbimisandmete põhjal ning iga päeva kohta eraldi (Joonised 6.4.6, 6.4.7, 6.4.8, 6.4.9) , mis hiljem summeritakse, et saada aastast kulu elektrienergia ostmiseks (Tabel 6.4.4).



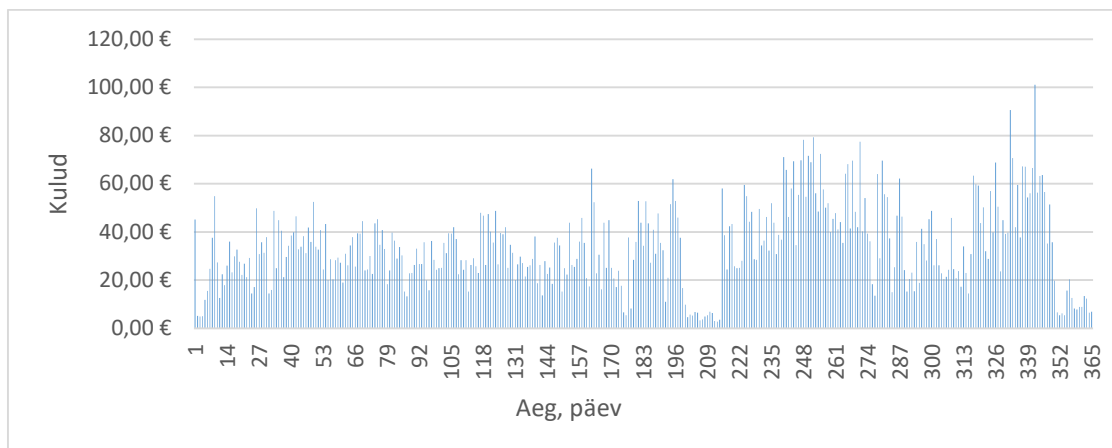
Joonis 6.4.6 Alajaama TT3-AJ1 akupanga täitmiseks vajamineva elektri hind (2021. a. päevade kaupa).



Joonis 6.4.7 Alajaama TT3-AJ2 akupanga täitmiseks vajamineva elektri hind (2021. a. päevade kaupa).



Joonis 6.4.8 Alajaama TT3-AJ3 akupanga täitmiseks vajamineva elektri hind (2021. a. päevade kaupa).



Joonis 6.4.9 Alajaama TT3-AJ4 akupanga täitmiseks vajamineva elektri hind (2021. a. päevade kaupa).

Tabel 6.4.4 Alajaamade akupankade täitmiseks vajamineva elektri hind (2021. a.)

Alajaam	TT3-AJ1	TT3-AJ2	TT3-AJ3	TT3-AJ4
Kokku	3033 €	6389 €	11178 €	12353 €

Järgneva sammuna energiasalvestusalajaamade tasuvusanalüüsi läbiviimisel lahutatakse alajaama akupanga täitmiseks ostetava elektrienergia kulu, potentsiaalsest kulust elektrienergiale, kui energiasalvestusalajaamu ei kasutataks, et saada energiasalvestusalajaama kasutamisest saadav tulu. Arvutused tehakse varem kalkuleeritud 2021 aasta summaarsete andmetega. Edasi arvutatakse alajaamade tasuvusaeg aastates. Selleks kasutatakse lõputöö paragrahvis 4 arvutatud planeeritud salvestusalajaamade hindu, mis jagatakse eelnevalt kalkuleeritud energiasalvestusalajaamade kasutamisest saadava aastase tuluga. Järgnevalt leitakse energiasalvestusalajaamade tasuvusaeg laadimistsüklites. Selleks korrutatakse energiasalvestusalajaamade tasuvusaeg aastates päevade arvuga aastas, kuna planeeritud alajaamade töotsükliks on arvestatud 1 ööpäev. Edasi kõrvutatakse salvestusalajaamade tasuvusajad tsüklites ning akupankade eluiga tsüklites, et hinnata, kas energiasalvestusalajaama tasuvusaeg on väiksem, suurem või võrdne salvesti elueaga. Ehk siis kas energiasalvestusalajaama kasutamine etteantud olukorras on majanduslikult kasumlik või kahjumlik (Tabel 6.4.5).

Tabel 6.4.5 Tööstustarbijale 3 planeeritud energiasalvestusalajaamade tasuvus [19]

Alajaam	TT3-AJ1	TT3-AJ2	TT3-AJ3	TT3-AJ4
Potentsiaalne kulu elektrienergiale aastas, kui energiasalvestusalajaamu ei kasutataks	5 689 €	11 909 €	20 940 €	23 165 €
Alajaama akupanga täitmiseks ostetava elektrienergia kulu aastas	3 033 €	6 389 €	11 178 €	12 353 €
Energiasalvestusalajaama kasutamisest saadav tulu aastas	2 656 €	5 520 €	9 762 €	10 812 €
Planeeritud salvestusalajaama hind	55 500 €	125 500 €	206 000 €	261 500 €
Salvestusalajaama tasuvusaeg aastates	20,9	22,7	21,1	24,2
Salvestusalajaama tasuvusaeg tsüklites	7 626	8 298	7 702	8 828
Salvesti eluiga tsüklites	5000	5000	5000	5000
Hinnang salvestusalajaama tasuvusele	kahjumlik	kahjumlik	kahjumlik	kahjumlik

6.5 Analüüs tasuvuspunkti leidmiseks

Eelnevates punktides läbiviidud energiasalvestusalajaamade tasuvusanalüüsi tulemusel selgus, et enamike ettenähtud stsenaariumite korral ei tasu planeeritud alajaamad ennast tööstustarbijate jaoks majanduslikult ära. Antud punkti eesmärk on selgitada välja, millised muutused peaksid toimuma, et salvestusalajaamade kasutamine ennast ära tasuma hakkaks. Analüüsis keskendutakse kahele suunale: a) kui palju peaks elektrihind Nordpooli Eesti regioonis tõusma, et tööstustarbijatele planeeritud energiasalvestusalajaamad end tagasi suudaksid teenida; b) kui palju peaks akupankade hind langema, et tööstustarbijatele planeeritud energiasalvestusalajaamad end tagasi suudaksid teenida.

Esimeses analüüsi punktis, kui palju peaks elektri hind Nordpooli Eesti regioonis tõusma, et tööstustarbijatele planeeritud energiasalvestusalajaamad end tagasi suudaksid teenida, arvestatakse ainult elektri börsihinna muutusega. Börsihinnale lisanduvad maksud ning tasud ei muutu ning jäävad samaks, kui välja toodud eelnevates lõputöö punktides. Ka tasud võrgust tarbitavale ning võrku antavale reaktiivenergiale jäävad samaks. Analüüs viiakse läbi kasutades Microsoft Excel tabelarvutustarkvara, kus varasemalt koostatud arvutusmudelisse suurendatakse 2021 Nordpool elektribörsi Eesti regiooni tunnihindu kuni saavutatakse energiasalvestusalajaamade aastane tulusus, millega alajaam ennast eluea jooksul tagasi teenib. Analüüs koostatakse ainult energiasalvestusalajaamade kohta, mille kohta leiti tasuvusanalüüsi käigus, et nad

ennast oma eluea jooksul tagasi ei teeni. Analüüsi tulemused on väljatoodud tabelietes 6.5.1, 6.5.2 ning 6.5.3.

Tabel 6.5.1 Vajaliku elektrihinna tõusu määramine, saavutamaks tööstustarbijale 1 planeeritud alajaamade tasuvuspunkt

Alajaam	TT1-AJ1	TT1-AJ2	TT1-AJ3	TT1-AJ4
Planeeritud salvestusalajaama hind	29 000€	38 000€	71 500€	101 000€
Salvesti eluiga laadimistsüklites	6000	6000	5000	5000
Salvesti eluiga aastates	17,1	17,1	14,3	14,3
Vajalik energiasalvestusalajaama kasutamisest saadav tulu aastas, et alajaam ennast ära tasuks	1 692€	2 217€	5 005€	7 070€
Vajalik elektrienergia hinnatõus, et alajaam ennast ära tasuks	+129,2%	+24,4%	+51,3%	+48,9%

Tabel 6.5.2 Vajaliku elektrihinna tõusu määramine, saavutamaks tööstustarbijale 2 planeeritud alajaamade tasuvuspunkt

Alajaam	TT2-AJ2	TT2-AJ3	TT2-AJ4
Planeeritud salvestusalajaama hind	81 500€	148 500€	188 500€
Salvesti eluiga laadimistsüklites	5000	5000	5000
Salvesti eluiga aastates	14,3	14,3	14,3
Energiasalvestusalajaama kasutamisest saadav tulu aastas, et alajaam ennast ära tasuks	5 705€	10 395€	13 195€
Tulud reaktiivenergia kompenseerimisest	2 325€	2 325€	2 325€
Vajalik energiasalvestusalajaama kasutamisest saadav tulu aastas, et alajaam ennast ära tasuks (ilma reaktiivenergia reguleerimisest saadava tuluta)	3 380€	8 070€	10 870€
Vajalik elektrienergia hinnatõus, et alajaam ennast ära tasuks	+8,10%	+52,40%	+56,80%

Tabel 6.5.3 Vajaliku elektrihinna tõusu määramine, saavutamaks tööstustarbijale 3 planeeritud alajaamade tasuvuspunkt

Alajaam	TT3-AJ1	TT3-AJ2	TT3-AJ3	TT3-AJ4
Planeeritud salvestusalajaama hind	55 500€	125 500€	206 000€	261 500€
Salvesti eluiga laadimistsüklites	5000	5000	5000	5000
Salvesti eluiga aastates	14,3	14,3	14,3	14,3
Vajalik energiasalvestusalajaama kasutamisest saadav tulu aastas, et alajaam ennast ära tasuks	3 885€	8 785€	14 420€	18 305€
Vajalik elektrienergia hinnatõus, et alajaam ennast ära tasuks	+44,5%	+56,8%	+45,9%	+66,7%

Teises analüüsi punktis kalkuleeritakse, kui palju peaks akupankade hind langema, et tööstustarbijatele planeeritud energiasalvestusalajaamad end tagasi suudaksid teenida. Selles punktis arvutatakse esmalt, kui palju alajaamad oma eluea jooksul tulu suudavad teenida. Seejärel võrreldakse saadud tulemusi planeeritud salvestusalajaamade hindadega ning leitakse, vahe, kui palju peaksid alajaamad odavamad olema, et tasuvuspunkti jõuda. Järgmise sammuna lahutatakse saadud väärtus akupanga hinnast ning kõrvutatakse saadud tulemust akupanga hinnaga, et leida kui palju peab akupanga hinda vähendama protsentuaalselt, et alajaamad suudaks ennast tasa teenida. Analüüsist jäetakse välja stsenaariumid, kus akupank on kasumlik ilma akupanga hinda vähendamata. Analüüsi tulemused on väljatoodud tabelietes 6.5.4, 6.5.5 ning 6.5.6.

Tabel 6.5.4 Akupankade vajaliku hinnalanguse määra leidmine, et saavutada tööstustarbijale 1 planeeritud alajaamade tasuvuspunkt

Alajaam	TT1-AJ1	TT1-AJ2	TT1-AJ3	TT1-AJ4
Salvesti eluiga tsüklites	6000	6000	5000	5000
Salvesti eluiga aastates	16,4	16,4	13,7	13,7
Alajaama teenitav tulu aastas	713€	1 762€	3 126€	4 408€
Alajaama teenitav tulu eluea jooksul	11 721€	28 964€	42 822€	60 384€
Planeeritud salvestusalajaama hind	29 000€	38 000€	71 500€	101 000€
Alajaama hinna ning eluea jooksul teenitava summa vahe	-17 279€	-9 036€	-28 678€	-40 616€
Alajaama akupanga planeeritud hind	8 120€	19 000€	42 185€	59 590€
Akupanga vajalik hind, et alajaam eluea jooksul ennast tasa teeniks	0 >	9 964€	13 507€	18 974€
Kui palju peaks akupanga hind vähenema, et alajaam ennast oma eluajal tagasi suudaks teenida	(x)	-47,6%	-68,0%	-68,2%

(x) – hinnalangust ei ole võimalik määrata

Tabel 6.5.5 Akupankade vajaliku hinnalanguse määra leidmine, et saavutada tööstustarbijale 2 planeeritud alajaamade tasuvuspunkt

Alajaam	TT2-AJ2	TT2-AJ3	TT2-AJ4
Salvesti eluiga tsüklites	5000	5000	5000
Salvesti eluiga aastates	13,7	13,7	13,7
Alajaama teenitav tulu aastas	5 445€	7 557€	9 172€
Alajaama teenitav tulu eluea jooksul	74 589€	103 521€	125 644€
Planeeritud salvestusalajaama hind	81 500€	148 500€	188 500€

Tabel 6.5.5 järg

Tabel 6.5.5 Akupankade vajaliku hinnalanguse määra leidmine, et saavutada tööstustarbijale 2 planeeritud alajaamade tasuvuspunkt

Alajaama hinna ning eluea jooksul teenitava summa vahe	-6 911€	-44 979€	-62 856€
Alajaama akupanga planeeritud hind	44 010€	83 160€	116 870€
Akupanga vajalik hind, et alajaam eluea jooksul ennast tasa teeniks	37 099€	38 181€	54 014€
Kui palju peaks akupanga hind vähenema, et alajaam ennast oma eluajal tagasi suudaks teenida	-15,7%	-54,1%	-53,8%

Tabel 6.5.6 Akupankade vajaliku hinnalanguse määra leidmine, et saavutada tööstustarbijale 3 planeeritud alajaamade tasuvuspunkt

Alajaam	TT3-AJ1	TT3-AJ2	TT3-AJ3	TT3-AJ4
Salvesti eluiga tsüklites	5000	5000	5000	5000
Salvesti eluiga aastates	13,7	13,7	13,7	13,7
Alajaama teenitav tulu aastas	2 656€	5 520€	9 762€	10 812€
Alajaama teenitav tulu eluea jooksul	36 384€	75 616€	133 726€	148 110€
Planeeritud salvestusalajaama hind	55 000 €	125 500€	206 000€	261 500€
Alajaama hinna ning eluea jooksul teenitava summa vahe	-18 616€	-49 884€	-72 274€	-113 390€
Alajaama akupanga planeeritud hind	31 350€	70 280€	131 840€	175 205€
Akupanga vajalik hind, et alajaam eluea jooksul ennast tasa teeniks	12 734€	20 396€	59 566€	61 815€
Kui palju peaks akupanga hind vähenema, et alajaam ennast oma eluajal tagasi suudaks teenida	-59,4%	-71,0%	-54,8%	-64,7%

6.6 Järeldused

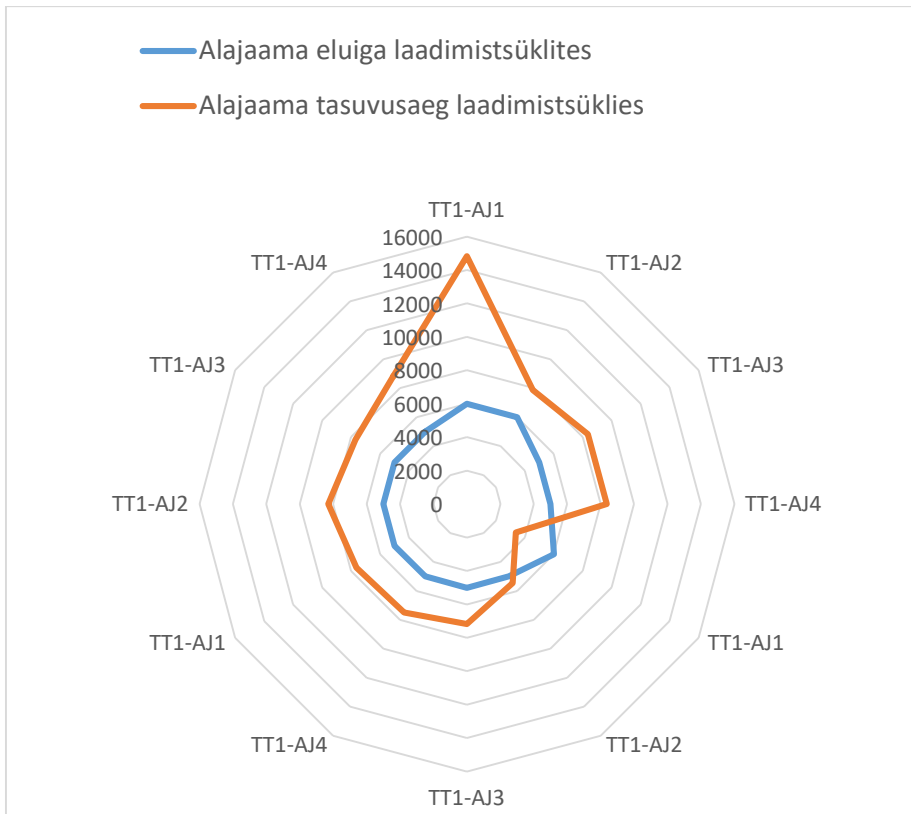
Tööstustarbijatele planeeritud integreeritud energiasalvestiga nutikate madalpinge alajaamade tasuvusanalüüsi käigus selgus, et antud lõputöös vaadeldud stsenaariumide korral, elektrienergia arbitraaži põhimõttel töötades, salvestusseadmetega alajaamad ennast üldjuhul ära ei tasu v.a. ühe erandiga. Erandiks on väikese mahtuvusega akupangaga alajaam TT2-AJ1, kus suur osa tulust tuleneb inverteriga reaktiivenergia reguleerimisest. Salvestusalajaamade tasuvusaega saab parendada kasutades alajaamu mitte ainult tarbija enda tarbeks vaid müües ülejäävat elektrienergiat nendest

lisaks tagasi ka elektrivõrku. Selle lähenemise kasutegurit aga vähendab oluliselt Nordpool börsihinnaga ostetavale energiahinnale lisanduvad erinevad tasud (elektrienergia aktsiis, taastuvenergia tasu, võrguteenuse tasu, elektrimüüja marginaal) ning elektrimüügil lisanduv elektriostja marginaal. Seetõttu ei võimalda antu lahendus suurendada salvestusalajaamast saadavat kasu nõnda palju, et alajaama kasutamine kasumlikuks muutuks. Lisaks saab salvestusalajaamade tasuvust suurendada kasutades nende invertereid tööstustarbivate reaktiivenergia reguleerimiseks. Väikese mahtuvusega salvestusalajaamade korral, kus akupanga hind ei ole väga kõrge võib antud lahenduse kasutamine muuta energiasalvestiga alajaama soetamise kasumlikuks projektiks.

Järgnenud analüüsil selgitati välja, et mitte kasumlikeks osutunud energiasalvestiga madalpinge alajaamade korral peaks elektrienergia hind Nordpool elektribörsil Eesti regioonis tõusma vahemikus +8,1%...+129,2% või alajaamade akupankade muutuma -15,7%...-71,0%, et need alajaamad jõuaksid oma tasuvuspunkti. Tasuvusanalüüsi tulemused on välja toodud järgnevas tabelis 6.6.1 ning joonisel 6.6.1.

Tabel 6.6.1 Integreeritud energiasalvestiga nutikate madalpinge alajaamade tasuvusanalüüsi tulemused

Alajaam	Alajaama eluiga laadimis-tsüklites	Alajaama tasuvusaeg laadimis-tsüklites	Hinnang salvestus-alajaama tasuvusele	Vajalik elektrienergia hinnatõus, et salvestus-alajaam jõuaks tasuvuspunkti	Vajalik akupanga hinnalangus, et salvestus-alajaam jõuaks tasuvuspunkti
TT1-AJ1	6000	14841	kahjumlik	129,2%	-
TT1-AJ2	6000	7873	kahjumlik	24,4%	-47,6%
TT1-AJ3	5000	8350	kahjumlik	51,3%	-68,0%
TT1-AJ4	5000	8363	kahjumlik	48,9%	-68,2%
TT1-AJ1	6000	3383	kasumlik	-	-
TT1-AJ2	5000	5463	kahjumlik	8,1%	-15,7%
TT1-AJ3	5000	7172	kahjumlik	52,4%	-54,1%
TT1-AJ4	5000	7501	kahjumlik	56,8%	-53,8%
TT1-AJ1	5000	7626	kahjumlik	44,5%	-59,4%
TT1-AJ2	5000	8298	kahjumlik	56,8%	-71,0%
TT1-AJ3	5000	7702	kahjumlik	45,9%	-54,8%
TT1-AJ4	5000	8828	kahjumlik	66,7%	-64,7%



Joonis 6.6.1 Alajaamade eluiga vs. alajaamade tasuvusaeg laadimistsüklites

7 Kokkuvõte

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli töötada välja kolmele tööstusettevõttele sobilikud integreeritud energiasalvestiga nutikad madalpinge alajaamad ning seejärel hinnata nende majanduslikku tasuvust. Eesmärgiks oli uurida, kas hetke olukorras oleks majanduslikult otstarbekas töötada välja ning pakkuda turule energiasalvestustehnoloogiaga madalpinge alajaamu.

Lõputöö esimene peatükk annab ülevaate energiasalvestus lahendustest. Selles peatükis kirjeldatakse arenguid energiasalvestite valdkonnas, energiasalvestamise jaoks kasutatavaid tehnilisi lahendusi ning tutvustatakse täna turul pakutavaid nutikaid energiasalvestiga madalpinge alajaamu.

Lõputöö teine peatükk keskendub tööstustarbijate vajaduste määratlemisele salvestusalajaamade osas. Esmalt kirjeldatakse tööstustarbijate üldist elektrikasutuse profiili ning seejärel keskendutakse konkreetsetele lõputöös vaadeldavate tööstustarbijate elektrikasutusele. Järgnevalt formuleeriti lähteülesanded lõputöös käsitletavatele tööstustarbijatele sobivate energiasalvestiga alajaamadele vastavalt:

- Tööstustarbija 1 – energia arbitraaži põhimõttel töötav energiasalvestiga alajaam, kus esmalt tarbib salvestist elektrienergiat tööstustarbija omavajaduste katteks ning omavajadustest ülejäävat elektrienergiat müüakse ka tagasi elektrivõrku;
- Tööstustarbija 2 – energia arbitraaži põhimõttel töötav energiasalvestiga alajaam, millega lisaks reguleeritakse ka reaktiivenergiat;
- Tööstustarbija 3 – energia arbitraaži põhimõttel töötav energiasalvestiga alajaam, puhtalt tööstustarbija omavajaduse katteks.

Peatüki viimases osas loetletakse standardid, millest lähtutakse energiasalvestiga alajaamade planeerimisel.

Lõputöö kolmas peatükk käsitleb energiasalvestiga madalpinge alajaamade koostamiseks sobivate seadmete valikut. Esmalt kirjeldatakse kriteeriume, mille alusel sobilikke seadmeid valida ning seejärel kirjeldatakse olulisemaid konkreetseid sobilikke seadmeid: muundureid, salvesteid, juhtimisseadmeid.

Lõputöö neljas peatükk keskendub valitud tööstustarbijatele sobilike energiasalvestus-alajaamade lahenduste välja töötamisele. Esmalt tuuakse välja põhimõtted/parameetrid konkreetsete salvestusalajaamade tehniliste lahenduste väljatöötamisele. Järgnevalt töötatakse igale vaadeldavale tööstustarbijale välja sobiv salvestusalajaama tehniline lahendus, määratakse sobivad seadmed, alajaama ehitus ning seejärel ka alajaama maksumus. Välja töötatud alajaamade parameetrid on järgmised:

- Alajaam TT1-AJ1 akupanga mahtuvusega 28,7 kWh ja inverterite koguväljundvõimsusega 30kVA, mille planeeritud hinnaks kujunes 29000€
- Alajaam TT1-AJ2 akupanga mahtuvusega 68,4 kWh ja inverterite koguväljundvõimsusega 75kVA, mille planeeritud hinnaks kujunes 38000€
- Alajaam TT1-AJ3 akupanga mahtuvusega 136,32 kWh ja inverterite koguväljundvõimsusega 150kVA, mille planeeritud hinnaks kujunes 71500€
- Alajaam TT1-AJ4 akupanga mahtuvusega 204,48 kWh ja inverterite koguväljundvõimsusega 184kVA, mille planeeritud hinnaks kujunes 101000€
- Alajaam TT2-AJ1 akupanga mahtuvusega 68,4 kWh ja inverterite koguväljundvõimsusega 75kVA, mille planeeritud hinnaks kujunes 38000€
- Alajaam TT2-AJ2 akupanga mahtuvusega 142,00 kWh ja inverterite koguväljundvõimsusega 184kVA, mille planeeritud hinnaks kujunes 81500€
- Alajaam TT2-AJ3 akupanga mahtuvusega 289,68 kWh ja inverterite koguväljundvõimsusega 550kVA, mille planeeritud hinnaks kujunes 148500€
- Alajaam TT2-AJ4 akupanga mahtuvusega 431,68 kWh ja inverterite koguväljundvõimsusega 550kVA, mille planeeritud hinnaks kujunes 188500€
- Alajaam TT3-AJ1 akupanga mahtuvusega 102,24 kWh ja inverterite koguväljundvõimsusega 92kVA, mille planeeritud hinnaks kujunes 55000€
- Alajaam TT3-AJ2 akupanga mahtuvusega 227,20 kWh ja inverterite koguväljundvõimsusega 275kVA, mille planeeritud hinnaks kujunes 125500€
- Alajaam TT1-AJ3 akupanga mahtuvusega 454,40 kWh ja inverterite koguväljundvõimsusega 550kVA, mille planeeritud hinnaks kujunes 206000€
- Alajaam TT1-AJ4 akupanga mahtuvusega 653,20 kWh ja inverterite koguväljundvõimsusega 693kVA, mille planeeritud hinnaks kujunes 261500€

Lõputöö viies peatükk vaatleb energiasalvestusalajaamade juhtimissüsteeme. Esmalt käsitletakse võimalike juhtimisühikute üldiselt. Sellele järgnevalt kirjeldatakse konkreetsemalt vaadeldavate tööstustarbijate jaoks planeeritud salvestusalajaamade jaoks valitud juhtimissüsteemi komponente ning kirjeldatakse nende alajaamade juhtalgoritme.

Lõputöö kuues peatükk keskendub planeeritud salvestusalajaamade tasuvuse määramisele. Esmalt kirjeldatakse põhimõtteid, kuidas tasuvusanalüüs läbi viiakse ning parameetreid, mida arvestatakse. Sellele järgnevad konkreetsete arvutused ning analüüs tööstustarbijatele planeeritud salvestusalajaamade tasuvuse osas.

Integreeritud energiasalvestiga nutikate madalpinge alajaamade tasuvusanalüüsi tulemused on välja toodud tabelis 6.6.1.

Tasuvusanalüüs näitab, et tööstustarbijatele valitud stsenaariumide korral puhtalt energia arbitraažil põhinevad energiasalvestusalajaamad ennast täna ära ei tasu. Sellest tulenevalt lõputöö autor selliste alajaamade väljatöötamist ning turule pakkumist hetkel ei soovita.

Energiasalvestusalajaamade kasutamine koos reaktiivenergia reguleerimisega võib mõningates olukordades kasumlikuks osutuda ning selle suuna edasi uurimist võiks kaaluda.

Kasutatud kirjanduse loetelu

1. UCS, „Energy Storage. How It Works and Its Role in an Equitable Clean Energy Future“ 2021 [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ucsusa.org/resources/how-energy-storage-works>. [Kasutatud: 12.02.2022].
2. DOE Global Energy Storage Database, „Projects“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://sandia.gov/ess-ssl/gesdb/public/projects.html>. [Kasutatud: 12.02.2022].
3. F.S. Barnes, J. G. Levine, et al., "Large Energy Storage Systems Handbook". Boca Raton: CRC Print, 2011.
4. A.G. Ter-Gazarian, "Energy Storage for Power Systems 2nd Edition". London: The Institution of Engineering and Technology, 2011
5. International Energy Agency, "Technology Roadmap Energy storage". Pariis, 2014
6. Environmental and Energy Study Institute, "Fact Sheet | Energy Storage (2019)" 2019 [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.eesi.org/papers/view/energy-storage-2019#:~:text=Thermal%20energy%20storage%20can%20also,type%20of%20thermal%20energy%20used>. [Kasutatud: 14.02.2022].
7. Merus Power, "MERUS ENERGY STORAGE SYSTEM" [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.meruspower.fi/wp-content/uploads/2018/04/MP_Brochure_ESS_EN.pdf. [Kasutatud: 14.02.2022]
8. ABB, "Energy Storage Solutions (ESS)" [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://new.abb.com/medium-voltage/packaging-and-solutions/energy-storage-solutions>. [Kasutatud: 14.02.2022]
9. Statistikaamet, "KE061: KÜTUSE TARBIMINE | Aasta, Majandusharu ning Kütuse liik" [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://andmed.stat.ee/et/stat/Lepetatud_tabelid__Majandus.%20Arhiiv__Energeetika.%20Arhiiv/KE061/table/tableViewLayout2. [Kasutatud: 14.02.2022]
10. SMA Solar Technology, "Sunny Tripower Storage 60" [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.sma.de/en/products/battery-inverters/sunny-tripower-storage-60.html>. [Kasutatud: 19.02.2022]
11. SMA Solar Technology, "SMA Sunny Tripower Storage 60 battery inverter" [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.sma.de/en/business/store-solar-power-use-it-fle-xibly.html>. [Kasutatud: 19.02.2022].

12. KACO new energy, "blueplanet gridsave 92.0 TL3-S" [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://kaco-newenergy.com/products/blueplanet-gridsave-92-TL3-S/>. [Kasutatud: 19.02.2022].
13. Kehua Hengsheng, "Three-phase Energy Storage Converter (Non-iso lated Type) BCS250~630K-B" [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.kehua.com/SdwlUploads/Do/5fe98166009fa.pdf> [Kasutatud: 19.02.2022].
14. TESVOLT GmbH, "LITHIUM STORAGE SYSTEM TS HV" [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.tesvolt.com/_media/05%20SERVICE/03%20Downloads/Produkte/A-Serie/TS_HV_70/RD.TI.004.E.ENG_Datasheet_TSHV_v.F.01.pdf [Kasutatud: 12.10.2022].
15. TESVOLT GmbH, "TS HV 70" [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.tesvolt.com/en/products/a-series/ts-hv-70.html> [Kasutatud:12.10.2022].
16. Commeo GmbH, "Commeo HV-L Longlife System | 776 V | 66.8 kWh" [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.commeo-service.de/doku/download.php?file=113> [Kasutatud: 12.10.2022].
17. Commeo GmbH, "Commeo energy storage block Longlife esbL44E FOR HIGH VOLTAGE SYSTEMS" [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.commeo-service.de/doku/download.php?file=70> [Kasutatud:23.02.2022].
18. Commeo GmbH, "Commeo - energy storage solutions." [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.commeo.com/en/> [Kasutatud:23.02.2022].
19. Pylon Technologies Co., Ltd., "Powercube M3A-180" [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://en.pylontech.com.cn/pro_detail.aspx?id=131&cid=24 [Kasutatud: 25.02.2022].
20. Siemens, "Data sheet 6ES7511-1AK02-0AB0" [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/ww/Catalog/DatasheetDownload?downloadUrl=teddatsheet%2F%3Fformat%3DPDF%26caller%3DMall%26mlfbs%3D6ES7511-1AK02-0AB0%26language%3Den> [Kasutatud:25.02.2022].
21. Siemens, "6ES7511-1AK02-0AB0" [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6ES7511-1AK02-0AB0> [Kasutatud:25.02.2022].
22. Siemens, "Data sheet 6ES7521-1BH00-0AB0" [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/in/Catalog/DatasheetDownload?downloadUrl=teddatsheet%2F%3Fformat%3DPDF%26caller%3DMall%26mlfbs%3D6ES7521-1BH00-0AB0%26language%3Den> [Kasutatud:25.02.2022].

23. Siemens, "6ES7521-1BH00-0AB0" [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/in/Catalog/Product/6ES7521-1BH00-0AB0> [Kasutatud: 25.02.2022].
24. Siemens, "Data sheet 6ES7522-1BH01-0AB0" [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/cn/Catalog/DatasheetDownload?downloadUrl=teddatasheet%2F%3Fformat%3DPDF%26caller%3DMall%26mlfbs%3D6ES7522-1BH01-0AB0%26language%3Den> [Kasutatud: 25.02.2022].
25. Siemens, "6ES7522-1BH01-0AB0" [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/cn/Catalog/Product/6ES7522-1BH01-0AB0> [Kasutatud: 25.02.2022].
26. Siemens, "Data sheet 6GK5876-4AA00-2BA2" [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/cn/Catalog/DatasheetDownload?downloadUrl=teddatasheet%2F%3Fformat%3DPDF%26caller%3DMall%26mlfbs%3D6GK5876-4AA00-2BA2%26language%3Den> [Kasutatud: 25.02.2022].
27. Siemens, "6GK5876-4AA00-2BA2" [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/cn/Catalog/Product/6GK5876-4AA00-2BA2> [Kasutatud: 25.02.2022].
28. Siemens, "Data sheet 6GK5005-0BA00-1AB2" [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/cn/Catalog/DatasheetDownload?downloadUrl=teddatasheet%2F%3Fformat%3DPDF%26caller%3DMall%26mlfbs%3D6GK5005-0BA00-1AB2%26language%3Den> [Kasutatud: 25.02.2022].
29. Siemens, "6GK5005-0BA00-1AB2" [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/cn/Catalog/Product/6GK5005-0BA00-1AB2> [Kasutatud: 25.02.2022].
30. Siemens, "Data sheet 6EP1332-4BA00" [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/ww/Catalog/DatasheetDownload?downloadUrl=teddatasheet%2F%3Fformat%3DPDF%26caller%3DMall%26mlfbs%3D6EP1332-4BA00%26language%3Den> [Kasutatud: 25.02.2022].
31. Siemens, "6EP1332-4BA00" [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/ww/Catalog/Product/6EP1332-4BA00> [Kasutatud: 25.02.2022].
32. Siemens, „Data Sheet 7KM2200-2EA30-1EA1“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/ww/Catalog/DatasheetDownload?downloadUrl=teddatasheet%2F%3Fformat%3DPDF%26caller%3DMall%26mlfbs%3D7KM2200-2EA30-1EA1%26language%3Den> [Kasutatud: 25.02.2022].

33. Siemens, „7KM2200-2EA30-1EA1“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/7KM2200-2EA30-1EA1> [Kasutatud: 25.02.2022].
34. Alpha ESS, „STORION T30“ [Spetsifikatsioon]. Versioon V07, 04.03.2021
35. R. Lahtmets, „ELEKTROTEHNIKA ALUSED“. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2001.
36. SMA, „SMA shifts the phase. Why reactive power is important - and no problem with SMA technology“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.sma.de/en/partners/knowledgebase/sma-shifts-the-phase.html> [Kasutatud: 08.03.2021]
37. Nordpool, „Day-ahead prices“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/EE/Hourly/?view=table> [Kasutatud: 22.11.2023]
38. „Alkoholi-, tubaka-, kütuse- ja elektriaktsiisi seadus“ [Eesti Vabariigi Seadus]. Saadaval: <https://www.riigiteataja.ee/akt/122052022003> [Kasutatud: 23.11.2022].
39. Elering, „Taastuenergia tasu“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://elering.ee/taastuenergia-tasu> [Kasutatud: 14.11.2022]
40. Elering, „Taastuenergia tasu“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://elering.ee/taastuenergia-tasu> [Kasutatud: 23.11.2022]
41. Entek, „Elektriteenuste hinnakiri“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.entek.ee/elekt/> [Kasutatud: 24.11.2022]
42. Sunly, „Su päikesejaam on valmis, mis edasi?“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://sunly.ee/et/su-paikesejaam-on-valmis-mis-edasi/> [Kasutatud: 24.11.2022]

Lisad

Lisa 1. Tööstustarbija 1 energiasalvestusalajaama tehnilise lahendusega seotud tabelid ning joonised

Tabel L1.1 Tööstustarbija 1 projekteeritavate salvestusalajaamade kasuliku mahtuvuse määramine

Tööstustarbija 1 maksimaalne tarbimine ühes tunnis [kWh]	236,94
Projekteeritava alajaama TT1-AJ1 kasulik mahtuvus (10% tööstustarbija 1 maksimaalsest tarbimisest ühes tunnis) [kWh]	23,69
Projekteeritava alajaama TT1-AJ2 kasulik mahtuvus (25% tööstustarbija 1 maksimaalsest tarbimisest ühes tunnis) [kWh]	59,24
Projekteeritava alajaama TT1-AJ3 kasulik mahtuvus (50% tööstustarbija 1 maksimaalsest tarbimisest ühes tunnis) [kWh]	118,47
Projekteeritava alajaama TT1-AJ4 kasulik mahtuvus (75% tööstustarbija 1 maksimaalsest tarbimisest ühes tunnis) [kWh]	177,71

Tabel L1.2 Tööstustarbija 1 projekteeritavate salvestusalajaamade akupanga minimaalse vajaliku mahtuvuse määramine [10], [12], [19], [34]

Projekteeritav alajaam	Projekteeritava alajaama kasulik mahtvus [kWh]	Inverteri kasutegur [%]	Akupanga tühjakslaetavuse sügavus [%]	Akupanga minimaalne mahtuvus [kWh]
TT1-AJ1	23,69	98,80	90	26,65
TT1-AJ2	59,24	98,80	90	66,62
TT1-AJ3	118,47	98,80	90	133,23
TT1-AJ4	177,71	98,80	90	199,85

Tabel L1.3 Tööstustarbija 1 projekteeritavate alajaamade jaoks valitud akupangad [19], [34]

Projekteeritav alajaam	TT1-AJ1	TT1-AJ2	TT1-AJ3	TT1-AJ4
Valitud seade	Storion T30	Storion T30	Powercube M3A-180	Powercube M3A-180 (2x)
Tootja	Alpha ESS	Alpha ESS	Pylontech	Pylontech
Akud	M48112-S (5,7 kWh; 51,2V)	M48112-S (5,7 kWh; 51,2V)	HM3A180 (5,68 kWh; 38,4 V)	HM3A180 (5,68 kWh; 38,4 V)
Akude arv	5	12	24	2 x 18
Akupanga mahtuvus [kWh]	28,70	68,40	136,32	204,48
Tühjaks-laetavuse sügavus [%]	90	90	90	90
Akupanga kasutegur [%]	97,1	97,1	95	95

Tabel L1.3 järg

Tabel L1.3 Tööstustarbijale 1 projekteeritavate alajaamade jaoks valitud akupangad [19], [34]

Akupanga pinge [V]	256,0	614,4	921,6	691,2
C-suhtarv	1C	1C	1C	1C
Eeldatav eluiga tsüklitena	6000	6000	5000	5000

Tabel L1.4 Tööstustarbijale 1 projekteeritavate salvestusalajaamade inverterite minimaalse väljundvõimsuse määramine

Projekteeritav alajaam	Projekteeritava alajaama kasulik mahtuvus [kWh]	Alajaama akupanga tühjakslaadimise aeg [h]	Inverteri minimaalne väljud aktiivvõimsus [kWh]	cosφ	Inverteri minimaalne väljund näivvõimsus [kVAR]
TT1-AJ1	23,69	1	23,7	1	23,7
TT1-AJ2	59,24	1	59,2	1	59,2
TT1-AJ3	118,47	1	118,5	1	118,5
TT1-AJ4	177,71	1	177,7	1	177,7

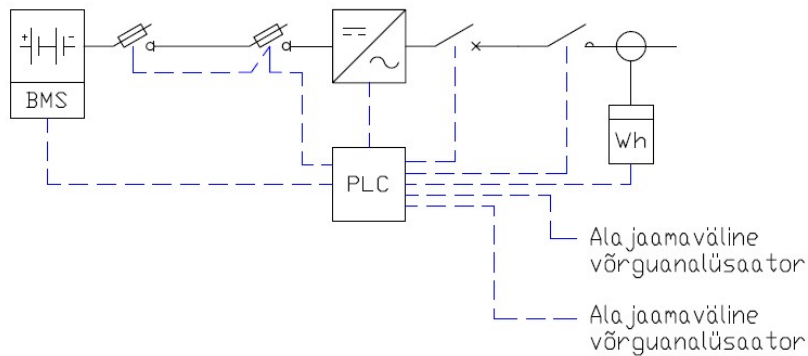
Tabel L1.5 Tööstustarbijale 1 projekteeritavate alajaamade jaoks valitud muundurid [10], [12], [34]

Projekteeritav alajaam	TT1-AJ1	TT1-AJ2	TT1-AJ3	TT1-AJ4
Valitud seade	Storion T30 Inverter	SUNNY TRIPOWER STORAGE 60	SUNNY TRIPOWER STORAGE 60	blueplanet gridsave 92.0 TL3-S
Tootja	Alpha ESS	SMA	SMA	KACO
Seadmete arv	1	1	2	2
Seadme väljund aktiivvõimsus [kW]	30	75	2 x 75 (150)	2 x 92 (184)
Seadme laadimisvõimsus [kW]	30	60	2 x 60 (120)	2 x 92 (184)
Reaktiivenergia regul. võimekus	Jah	Jah	Jah	Jah
Seadme väljund reaktiivvõimsus [kVA]	30	75	2 x 75 (150)	2 x 92 (184)
Seadme väljund nimipinge [V]	400	400	400	400
Seadme väljundpinge vahemik [V]	360...440	360...530	360...530	300...580
Seadme kasutegur [%]	96	98,8	98,8	98,8
Võrgu ühenduse konfiguratsioon	3L+N+PE	3L+PE	3L+PE	3L+PE

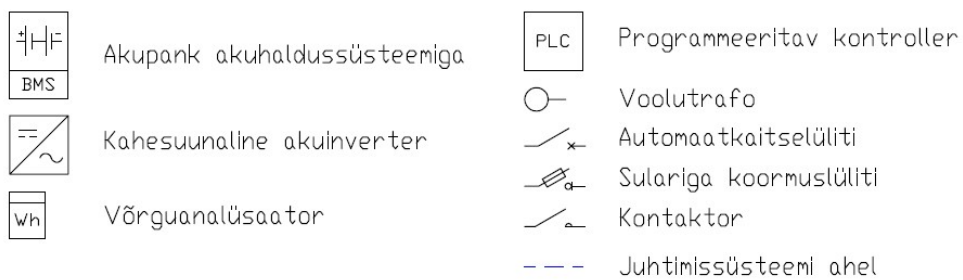
Tabel L1.5 järg

Tabel L1.5 Tööstustarbijale 1 projekteeritavate alajaamade jaoks valitud muundurid [10], [12], [34]

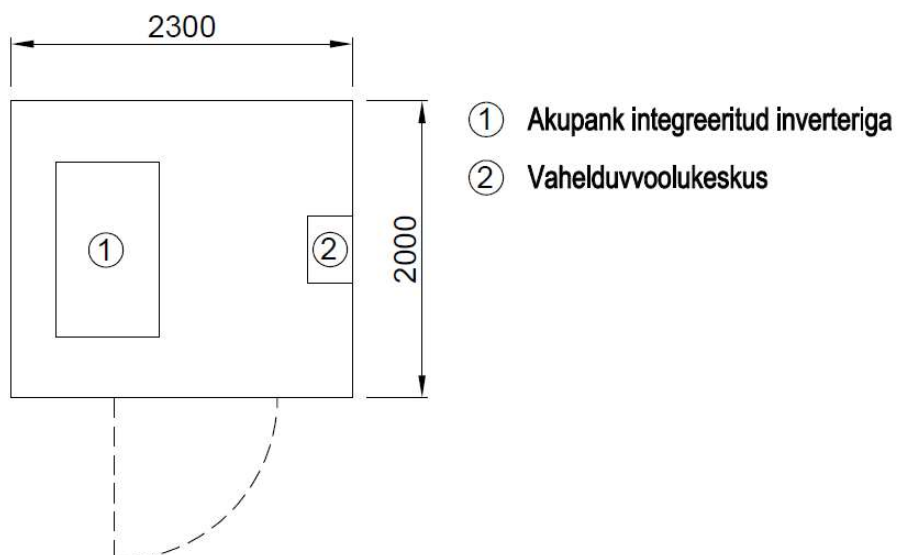
Sobiv akupanga pingevahemik [V]	200...750	575...1000	575...1000	668...1100 V
---------------------------------	-----------	------------	------------	--------------



TINGMÄRGID:



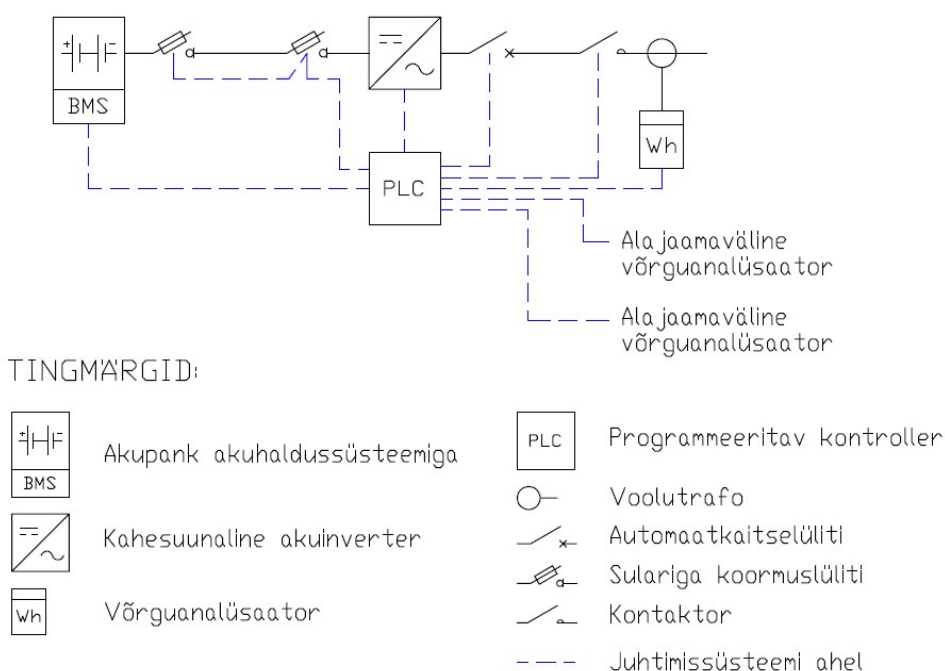
Joonis L1.1 Projekteeritava alajaama TT1-AJ1 põhimõtteskeem



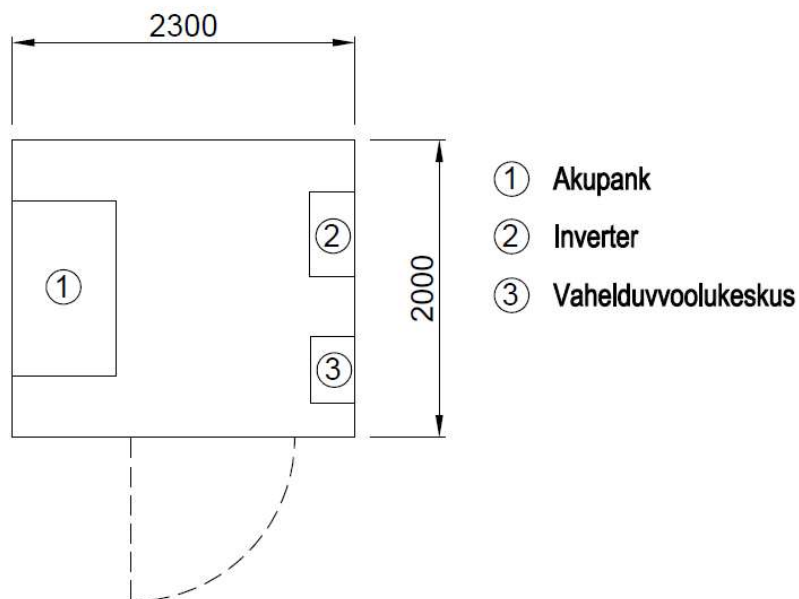
Joonis L1.2 Projekteeritava alajaama TT1-AJ1 asendiplaan

Tabel L1.6 Tööstustarbijale 1 planeeritud alajaama TT1-AJ1 kuluridade jaotus

Projekteeritava alajaama TT1-AJ1 kuluread	Osa alajaama hinnast
Muundur	29%
Salvesti	28%
Juhtimisseade	7%
Väliskest	16%
Muud materjalid	2%
Tootearendus ja koostamine	6%
Arendaja üldkulud ning kasum	13%



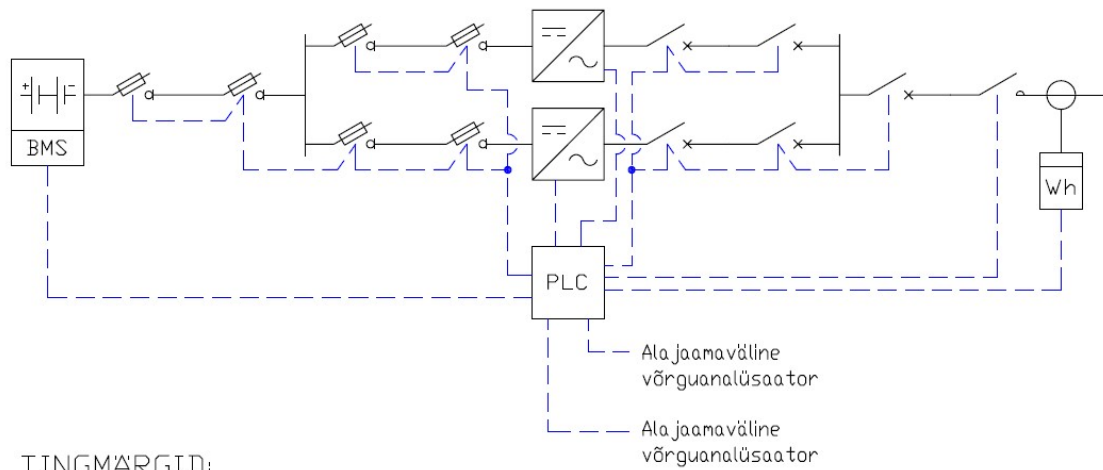
Joonis L1.3 Projekteeritava alajaama TT1-AJ2 põhimõtteskeem



Joonis L1.4 Projekteeritava alajaama TT1-AJ2 asendiplan

Tabel L1.7 Tööstustarbijale 1 planeeritud alajaama TT1-AJ2 kuluridade jaotus

Projekteeritava alajaama TT1-AJ2 kuluread	Osa alajaama hinnast
Muundur	11%
Salvesti	50%
Juhtimisseade	5%
Väliskest	12%
Muud materjalid	2%
Tootearendus ja koostamine	6%
Arendaja üldkulud ning kasum	13%



TINGMÄRGID:



Akupank akuhaldussüsteemiga



Kahesuunaline akuinverter



Võrguanalüsaator



Programmeeritav kontrolleri



Voolutrafo



Automaatkaitseülili



Sulariga koormusülili

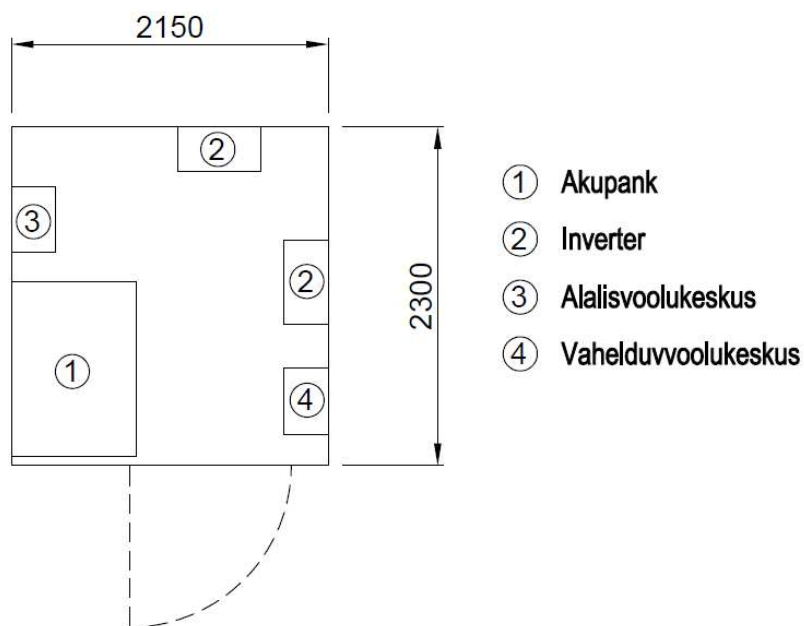


Kontaktor



Juhtimissüsteemi ahel

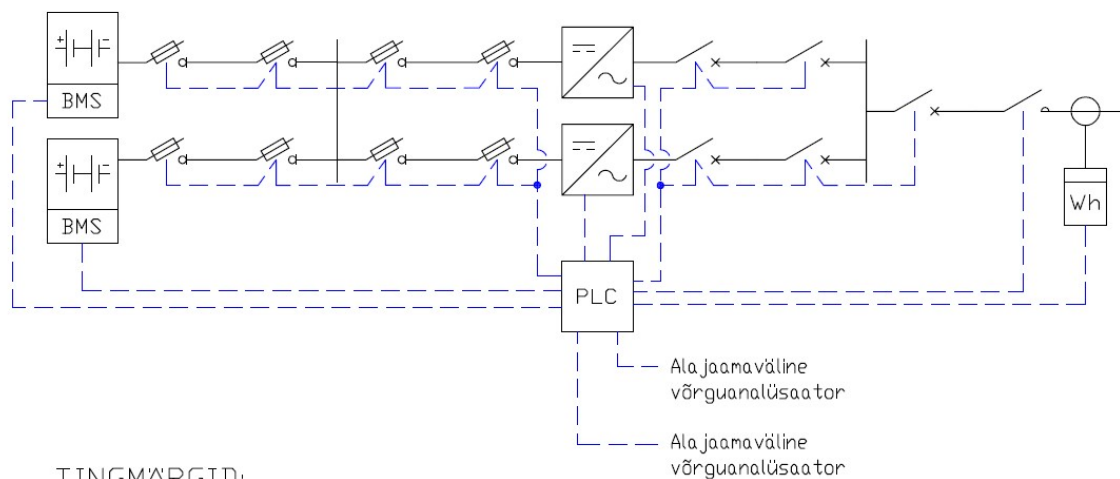
Joonis L1.5 Projekteeritava alajaama TT1-AJ3 põhimõtteskeem








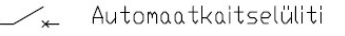



Joonis L1.6 Projekteeritava alajaama TT1-AJ3 asendiplaan

Tabel L1.8 Tööstustarbijale 1 planeeritud alajaama TT1-AJ3 kuluridade jaotus

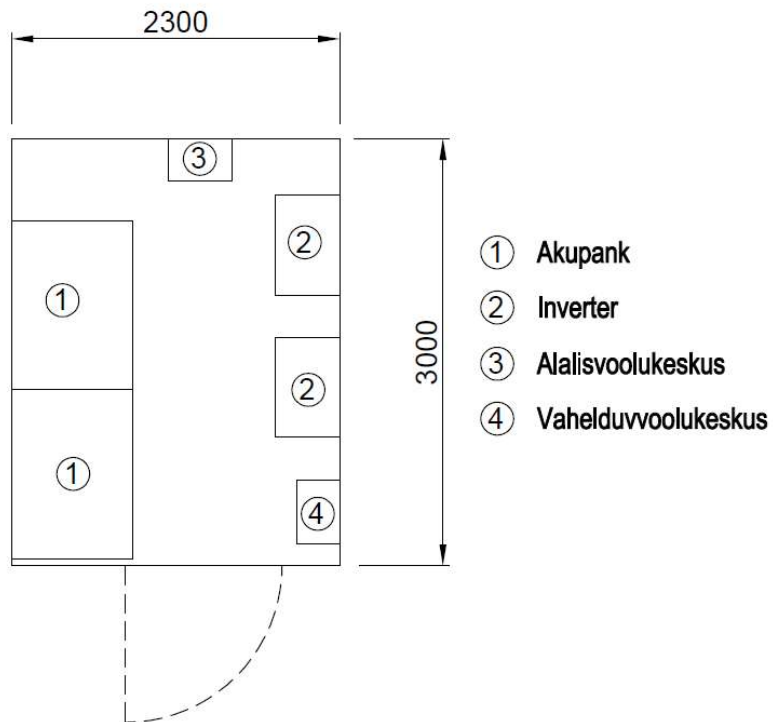
Projekteeritava alajaama TT1-AJ3 kuluread	Osa alajaama hinnast
Muundur	12%
Salvesti	59%
Juhtimisseade	3%
Väliskest	7%
Muud materjalid	3%
Tootearendus ja koostamine	4%
Arendaja üldkulud ning kasum	13%



TINGMÄRGID:

- | | | | |
|---|-----------------------------|--|----------------------------|
|  | Akupank akuhaldussüsteemiga |  | Programmeeritav kontrollor |
|  | Kahesuunaline akuinverter |  | Voolutrafo |
|  | Võrguanalüsaator |  | Automaatkaitseülili |
| | |  | Sulariga koormusülili |
| | |  | Kontaktor |
| | |  | Juhtimissüsteemi ahel |

Joonis L1.7 Projekteeritava alajaama TT1-AJ4 põhimõtteskeem



Joonis L1.8 Projekteeritava alajaama TT1-AJ4 asendiplaan

Tabel L1.9 Tööstustarbijale 1 planeeritud alajaama TT1-AJ4 kuluridade jaotus

Projekteeritava alajaama TT1-AJ4 kuluread	Osa alajaama hinnast
Muundur	14%
Salvesti	59%
Juhtimisseade	2%
Väliskest	7%
Muud materjalid	2%
Tootearendus ja koostamine	3%
Arendaja üldkulud ning kasum	13%

Lisa 2. Tööstustarbija 2 energiasalvestusalajaama tehnilise lahendusega seotud tabelid ning joonised

Tabel L2.1 Tööstustarbija 2 projekteeritavate salvestusalajaamade kasuliku mahtuvuse määramine

Tööstustarbija 2 maksimaalne tarbimine ühes tunnis [kWh]	495,13
Projekteeritava alajaama TT2-AJ1 (10% tööstustarbija 2 maksimaalsest tarbimisest ühes tunnis) [kWh]	49,51
Projekteeritava alajaama TT2-AJ2 (25% tööstustarbija 2 maksimaalsest tarbimisest ühes tunnis) [kWh]	123,78
Projekteeritava alajaama TT2-AJ3 (50% tööstustarbija 2 maksimaalsest tarbimisest ühes tunnis) [kWh]	247,57
Projekteeritava alajaama TT2-AJ4 (75% tööstustarbija 2 maksimaalsest tarbimisest ühes tunnis) [kWh]	371,35

Tabel L2.2 Tööstustarbija 2 projekteeritavate salvestusalajaamade akupanga minimaalse vajaliku mahtuvuse määramine [10], [12], [13] [19], [34]

Projekteeritav alajaam	Projekteeritava alajaama kasulik mahtuvus [kWh]	Inverteri kasutegur [%]	Akupanga tühjakslaetavuse sügavus [%]	Akupanga minimaalne mahtuvus [kWh]
TT2-AJ1	49,51	98,80	90	55,68
TT2-AJ2	123,78	98,80	90	139,21
TT2-AJ3	247,57	99,01	90	277,82
TT2-AJ4	371,35	99,01	90	416,73

Tabel L2.3 Tööstustarbija 2 projekteeritavate alajaamade jaoks valitud akupangad [19], [34]

Projekteeritav alajaam	TT2-AJ1	TT2-AJ2	TT2-AJ3	TT2-AJ4
Valitud seade	ESS Storion T30	Powercube M3A-180	Powercube M3A-180 (3x)	Powercube M3A-180 (4x)
Tootja	Alpha ESS	Pylontech	Pylontech	Pylontech
Akud	M48112-S (5,7 kWh; 51,2V)	HM3A180 (5,68 kWh; 38,4 V)	HM3A180 (5,68 kWh; 38,4 V)	HM3A180 (5,68 kWh; 38,4 V)
Akude arv	12	25	3 x 17	4 x 19
Akupanga mahtuvus [kWh]	68,4	142,00	289,68	431,68
Tühjaks-laetavuse sügavus [%]	90	90	90	90
Akupanga kasutegur [%]	97,1	95	95	95
Akupanga pingeline [V]	614,4	960,0	652,8	729,6
C-suhtarv	1C	1C	1C	1C

Tabel L2.3 järg

Tabel L2.3 Tööstustarbijale 2 projekteeritavate alajaamade jaoks valitud akupangad [19], [34]

Eeldatav eluiga tsüklitena	6000	5000	5000	5000
----------------------------	------	------	------	------

Tabel L2.4 Tööstustarbijale 2 kuu keskmise võimsusteguri määramine

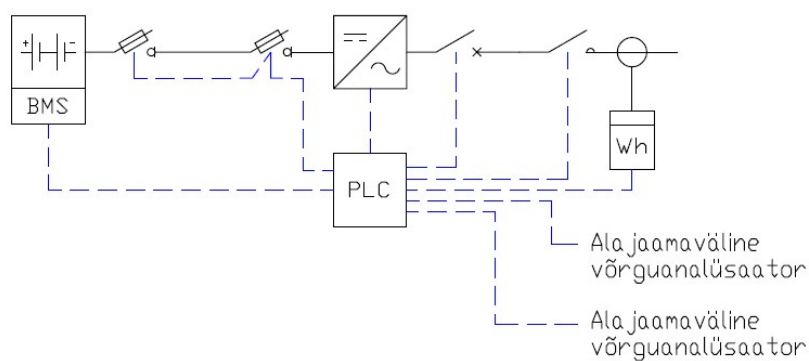
Kuu	Tunde kuus	Tarbitud aktiivenergia [MWh]	Keskmine aktiivenergia tarbimine [MW]	Tarbitud reaktiivenergia [MVARh]	Keskmine reaktiivenergia tarbimine [MVAR]	Keskmine näivvõimsuse tarbimine [MVA]	Keskmine $\cos\phi$
Jaanuar	744	125,04	0,168	23,71	0,032	0,17	0,98
Veebruar	672	125,61	0,187	23,52	0,035	0,19	0,98
Märts	744	152,74	0,205	29,27	0,039	0,21	0,98
Aprill	720	155,53	0,216	30,89	0,043	0,22	0,98
Mai	744	146,96	0,198	29,87	0,040	0,20	0,98
Juuni	720	137,25	0,191	32,8	0,046	0,20	0,97
Juuli	744	154,99	0,208	38,71	0,052	0,21	0,97
August	744	156,8	0,211	37,22	0,050	0,22	0,97
September	720	163,97	0,228	37,9	0,053	0,23	0,97
Oktoober	744	149,22	0,201	36,67	0,049	0,21	0,97
November	720	146,35	0,203	35,2	0,049	0,21	0,97
Detsember	744	98,25	0,132	19,73	0,027	0,13	0,98

Tabel L2.5 Tööstustarbijale 2 projekteeritavate salvestusalajaamade inverterite minimaalse väljundvõimsuse määramine

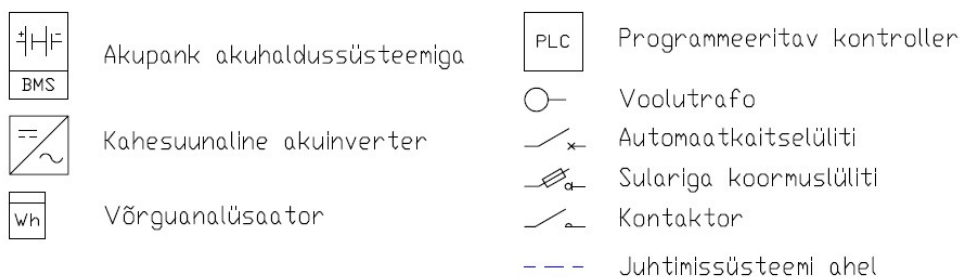
Projekteeritav alajaam	Projekteeritava alajaama kasulik mahtuvus [kWh]	Alajaama akupanga tühjaklaadimise aeg [h]	Inverteri minimaalne väljud aktiivvõimsus [kWh]	$\cos\phi$	Inverteri minimaalne väljund näivvõimsus [kVAR]
TT2-AJ1	49,51	1	49,5	0,97	51,0
TT2-AJ2	123,78	1	123,8	0,97	127,6
TT2-AJ3	247,57	1	247,6	0,97	255,2
TT2-AJ4	371,35	1	371,3	0,97	382,8

Tabel L2.6 Tööstustarbijale 2 projekteeritavate alajaamade jaoks valitud muundurid
[10], [12], [13]

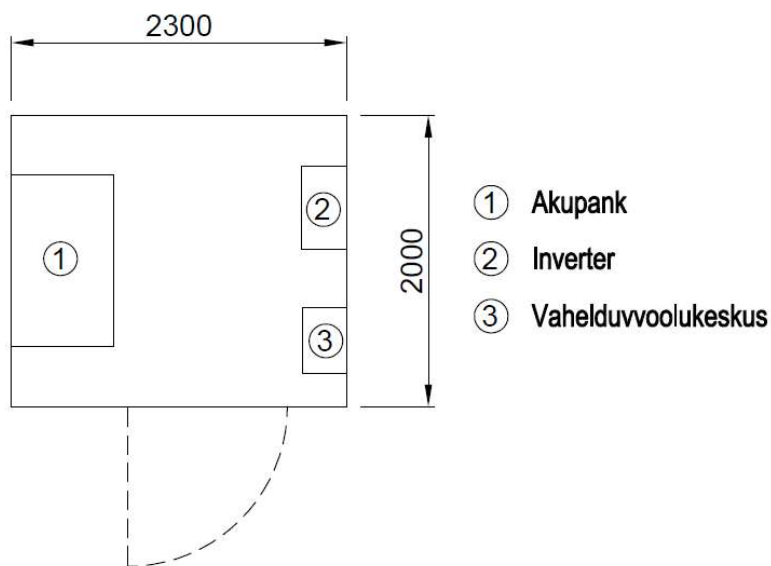
Projekteeritav alajaam	TT1-AJ1	TT1-AJ2	TT1-AJ3	TT1-AJ4
Valitud seade	SUNNY TRIPOWER STORAGE 60	blueplanet gridsave 92.0 TL3-S	BCS500K-B	BCS500K-B
Tootja	SMA	KACO	Kehua	Kehua
Seadmete arv	1	2	1	1
Seadme väljund aktiivvõimsus [kW]	75	2 x 92 (184)	500	500
Seadme laadimisvõimsus [kW]	60	2 x 92 (184)	500	500
Reaktiivenergia regul. võimekus	Jah	Jah	Jah	Jah
Seadme väljund reaktiivvõimsus [kVA]	75	2 x 92 (184)	550	550
Seadme väljund nimipinge [V]	400	400	400	400
Seadme väljundpinge vahemik [V]	360...530	300...580	340...440	340...440
Seadme kasutegur [%]	98,8	98,8	99,01	99,01
Võrgu ühenduse konfiguratsioon	3L+PE	3L+PE	3L+PE	3L+PE
Sobiv akupanga pingevahemik [V]	575...1000	668...1100	500...900	500...900



TINGMÄRGID:



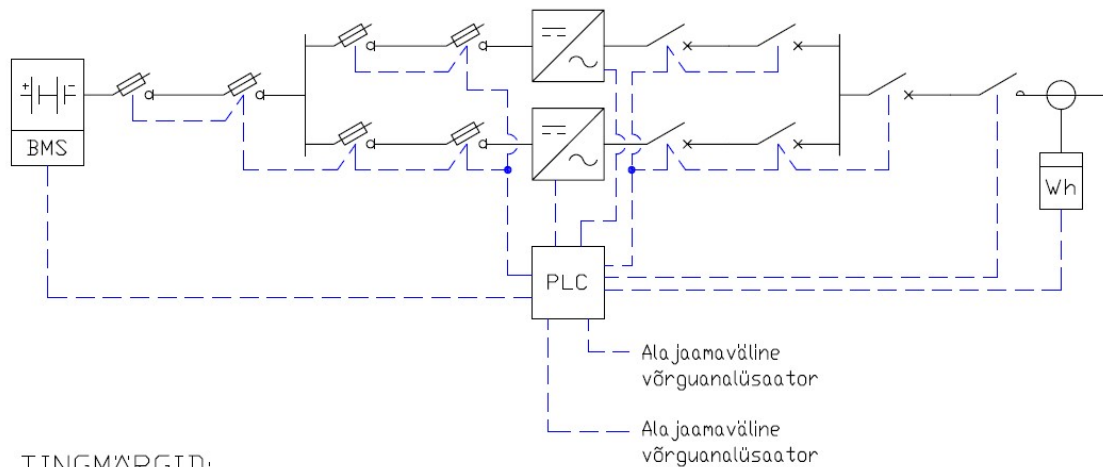
Joonis L2.1 Projekteeritava alajaama TT2-AJ1 põhimõtteskeem



Joonis L2.2 Projekteeritava alajaama TT2-AJ1 asendiplaan

Tabel L2.7 Tööstustarbijale 2 planeeritud alajaama TT2-AJ1 kuluridade jaotus

Projekteeritava alajaama TT2-AJ1 kuluread	Osa alajaama hinnast
Muundur	11%
Salvesti	50%
Juhtimisseade	5%
Väliskest	12%
Muud materjalid	2%
Tootearendus ja koostamine	6%
Arendaja üldkulud ning kasum	13%



TINGMÄRGID:



Akupank akuhaldussüsteemiga



Kahesuunaline akuinverter



Võrguanalüsaator



Programmeeritav kontrolleri



Voolutrafo



Automaatkaitseülili



Sulariga koormusülili

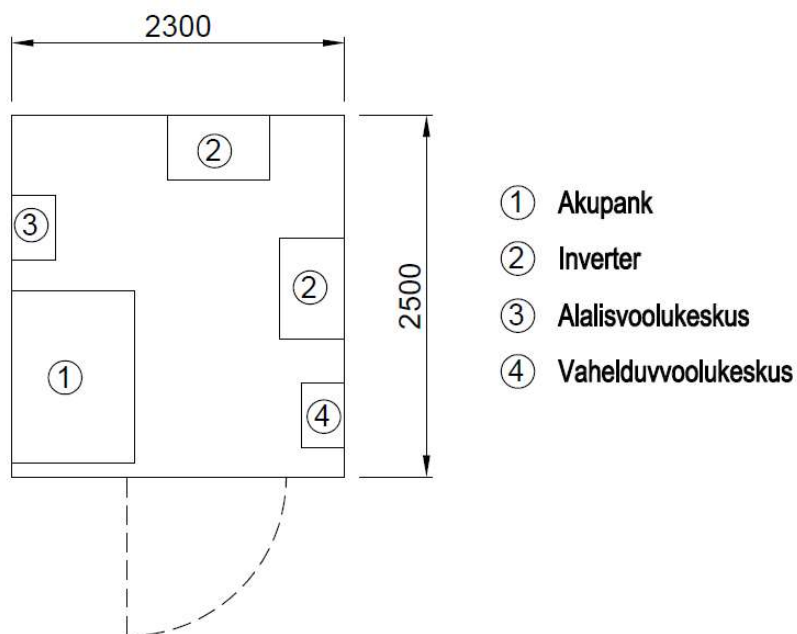


Kontaktor



Juhtimissüsteemi ahel

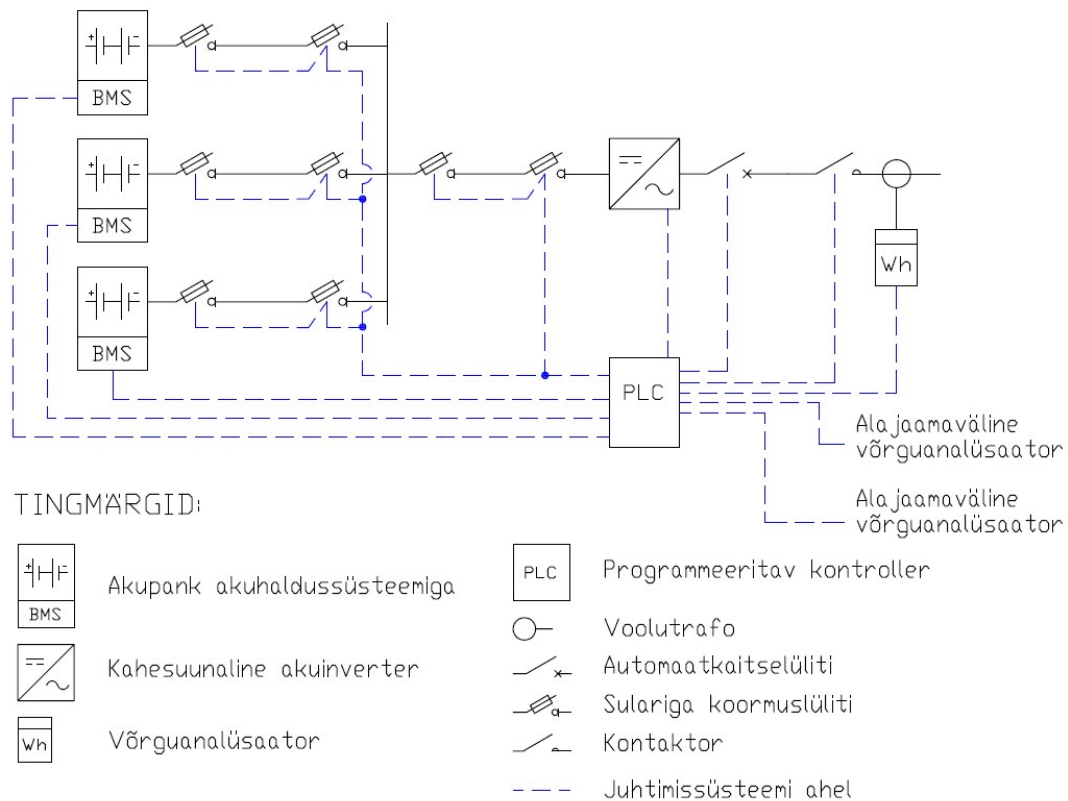
Joonis L2.3 Projekteeritava alajaama TT2-AJ2 põhimõtteskeem



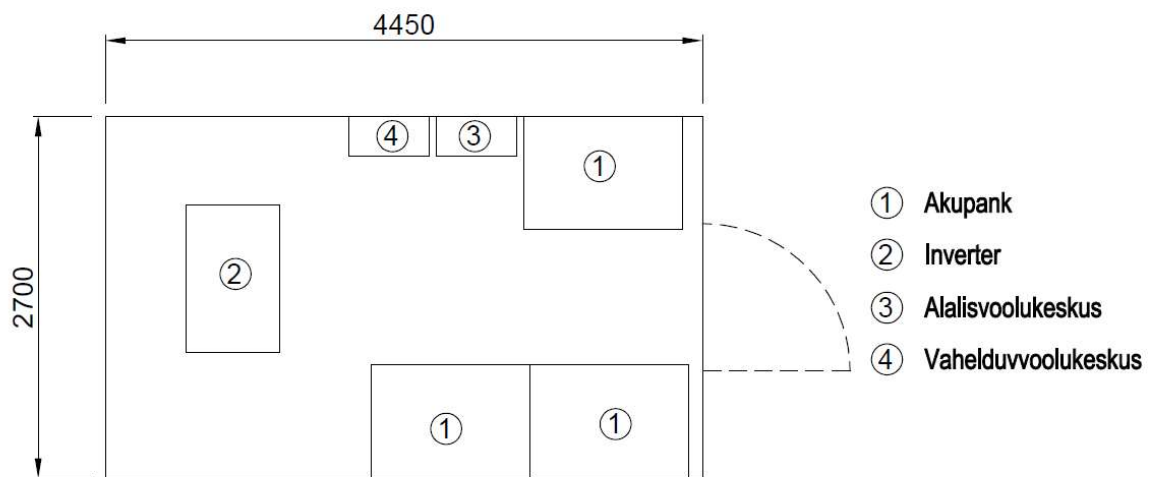
Joonis L2.4 Projekteeritava alajaama TT2-AJ2 asendiplaan

Tabel L2.8 Tööstustarbijale 2 planeeritud alajaama TT2-AJ2 kuluridade jaotus

Projekteeritava alajaama TT2-AJ2 kuluread	Osa alajaama hinnast
Muundur	17%
Salvesti	54%
Juhtimisseade	2%
Väliskest	7%
Muud materjalid	3%
Tootearendus ja koostamine	4%
Arendaja üldkulud ning kasum	13%



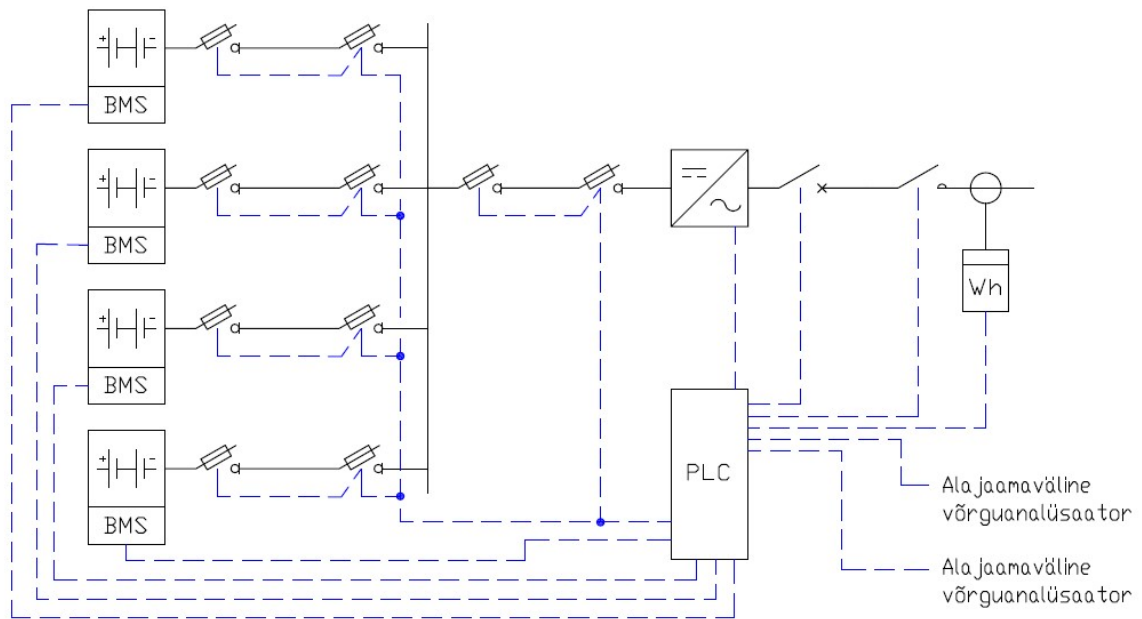
Joonis L2.5 Projekteeritava alajaama TT2-AJ3 põhimõtteskeem



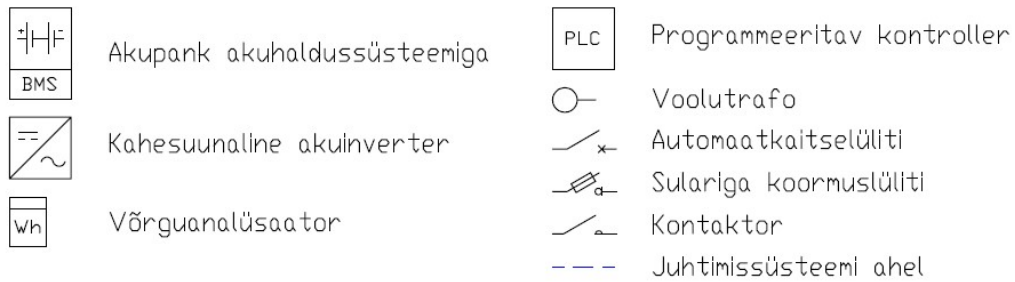
Joonis L2.6 Projekteeritava alajaama TT2-AJ3 asendiplaan

Tabel L2.9 Tööstustarbijale 2 planeeritud alajaama TT2-AJ3 kuluridade jaotus

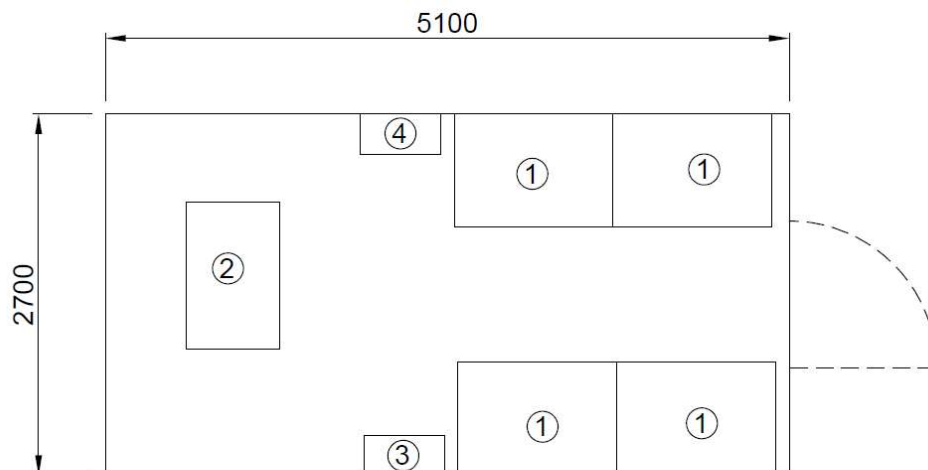
Projekteeritava alajaama TT2-AJ3 kuluread	Osa alajaama hinnast
Muundur	16%
Salvesti	56%
Juhtimisseade	1%
Väliskest	8%
Muud materjalid	2%
Tootearendus ja koostamine	3%
Arendaja üldkulud ning kasum	13%



TINGMÄRGID:



Joonis L2.7 Projekteeritava alajaama TT2-AJ4 põhimõtteskeem



- ① Akupank
- ② Inverter
- ③ Alalisvoolukeskus
- ④ Vahelduvvoolukeskus

Joonis L2.8 Projekteeritava alajaama TT2-AJ4 asendi plaan

Tabel L2.10 Tööstustarbija 2 planeeritud alajaama TT2-AJ4 kuluridade jaotus

Projekteeritava alajaama TT2-AJ4 kuluread	Osa alajaama hinnast
Muundur	13%
Salvesti	62%
Juhtimisseade	1%
Väliskest	7%
Muud materjalid	1%
Tootearendus ja koostamine	3%
Arendaja üldkulud ning kasum	13%

Lisa 3. Tööstustarbija 3 energiasalvestusalajaama tehnilise lahendusega seotud tabelid ning joonised

Tabel L3.1 Tööstustarbijale 3 projekteeritavate salvestusalajaamade kasuliku mahtuvuse määramine

Tööstustarbija 3 maksimaalne tarbimine ühes tunnis [kWh]	775,23
Projekteeritava alajaama TT3-AJ1 (10% tööstustarbija 3 maksimaalsest tarbimisest ühes tunnis) [kWh]	77,52
Projekteeritava alajaama TT3-A2 (25% tööstustarbija 3 maksimaalsest tarbimisest ühes tunnis) [kWh]	193,81
Projekteeritava alajaama TT3-AJ3 (50% tööstustarbija 3 maksimaalsest tarbimisest ühes tunnis) [kWh]	387,62
Projekteeritava alajaama TT2-AJ4 (75% tööstustarbija 3 maksimaalsest tarbimisest ühes tunnis) [kWh]	581,42

Tabel L3.2 Tööstustarbijale 3 projekteeritavate salvestusalajaamade akupanga minimaalse vajaliku mahtuvuse määramine [12], [13] [19]

Projekteeritav alajaam	Projekteeritava alajaama kasulik mahtvus [kWh]	Inverteri kasutegur [%]	Akupanga tühjaks-laetavuse sügavus [%]	Akupanga minimaalne mahtvus [kWh]
TT3-AJ1	77,52	98,80	90	87,18
TT3-AJ2	193,81	98,80	90	217,96
TT3-AJ3	387,62	99,01	90	434,99
TT3-AJ4	581,42	99,00	90	652,55

Tabel L3.3 Tööstustarbijale 3 projekteeritavate alajaamade jaoks valitud akupangad [19]

Projekteeritav alajaam	TT3-AJ1	TT3-AJ2	TT3-AJ3	TT3-AJ4
Valitud seade	Powercube M3A-180	Powercube M3A-180 (2x)	Powercube M3A-180 (4x)	Powercube M3A-180 (5x)
Tootja	Pylontech	Pylontech	Pylontech	Pylontech
Akud	HM3A180 (5,68 kWh; 38,4 V)	HM3A180 (5,68 kWh; 38,4 V)	HM3A180 (5,68 kWh; 38,4 V)	HM3A180 (5,68 kWh; 38,4 V)
Akude arv	18	2 x 20	4 x 20	5 x 23
Akupanga mahtvus [kWh]	102,24	227,20	454,40	653,20
Tühjaks-laetavuse sügavus [%]	90	90	90	90
Akupanga kasutegur [%]	95	95	95	95
Akupanga pinge [V]	691,2	768,0	768,0	883,2
C-suhtarv	1C	1C	1C	1C

Tabel L3.3 järg

Tabel L3.3 Tööstustarbijale 3 projekteeritavate alajaamade jaoks valitud akupangad [19]

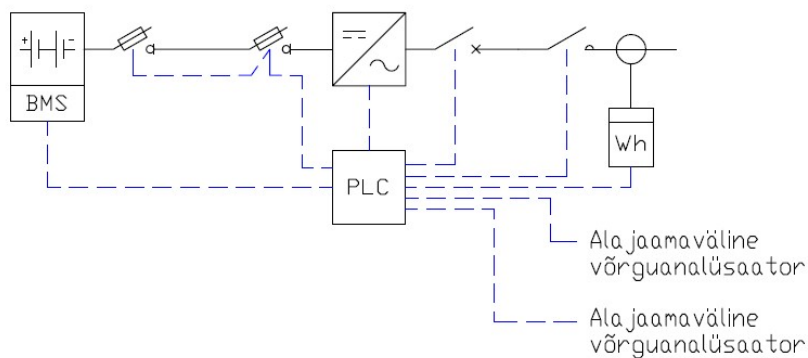
Eeldatav eluiga tsüklikena	5000	5000	5000	5000
----------------------------	------	------	------	------

Tabel L3.4 Tööstustarbijale 3 projekteeritavate salvestusalajaamade inverterite minimaalse väljundvõimsuse määramine

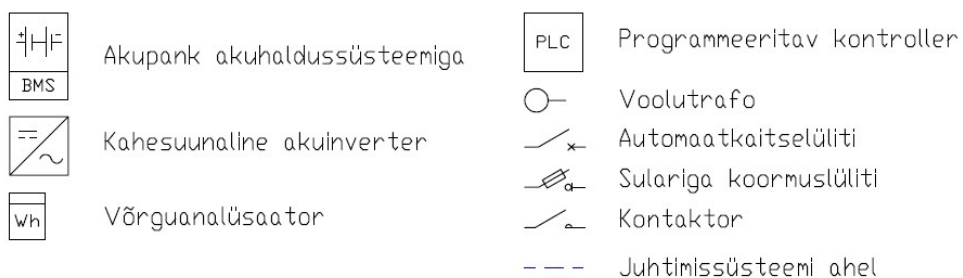
Projekteeritav alajaam	Projekteeritava alajaama kasulik mahtuvus [kWh]	Alajaama akupanga tühjakslaadimise aeg [h]	Inverteri minimaalne väljud aktiivvõimsus [kWh]	cosφ	Inverteri minimaalne väljund näivvõimsus [kVAR]
TT3-AJ1	77,52	1	77,5	1	77,5
TT3-AJ2	193,81	1	193,8	1	193,8
TT3-AJ3	387,62	1	387,6	1	387,6
TT3-AJ4	581,42	1	581,4	1	581,4

Tabel L3.5 Tööstustarbijale 3 projekteeritavate alajaamade jaoks valitud muundurid [12], [13]

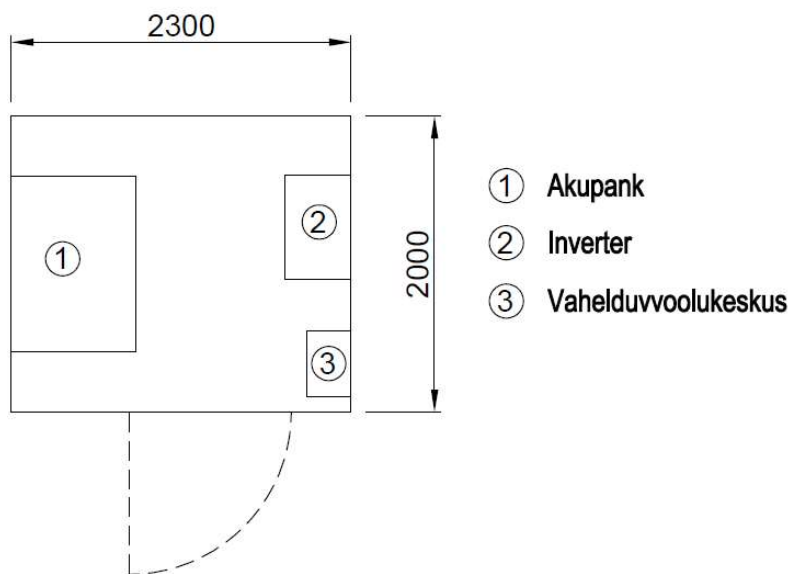
Projekteeritav alajaam	TT3-AJ1	TT3-AJ2	TT3-AJ3	TT3-AJ4
Valitud seade	blueplanet gridsave 92.0 TL3-S	BCS250K-B	BCS500K-B	BCS630K-B
Tootja	KACO	Kehua	Kehua	Kehua
Sedamete arv	1	1	1	1
Seadme väljund aktiivvõimsus [kW]	92	250	500	630
Seadme laadimisvõimsus [kW]	92	250	500	630
Reaktiivenergia regul. Võimekus	Jah	Jah	Jah	Jah
Seadme väljund reaktiivvõimsus [kVA]	92	275	550	693
Seadme väljund nimipinge [V]	400	400	400	400
Seadme väljundpinge vahemik [V]	300...580	340...440	340...440	340...440
Seadme kasutegur [%]	98,8	98,8	99,01	99,0
Võrgu ühenduse konfiguratsioon	3L+PE	3L+PE	3L+PE	3L+PE
Sobiv akupanga pingevahemik [V]	668...1100	600...900	600...900	600...900



TINGMÄRGID:



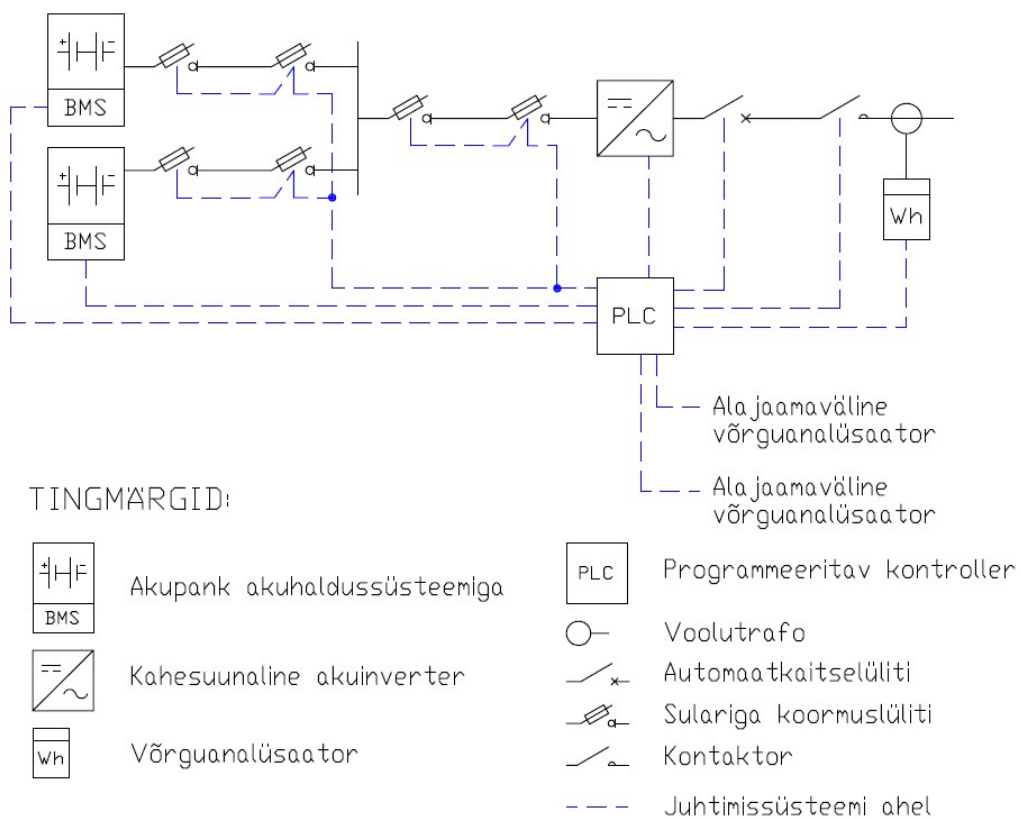
Joonis L3.1 Projekteeritava alajaama TT3-AJ1 põhimõtteskeem



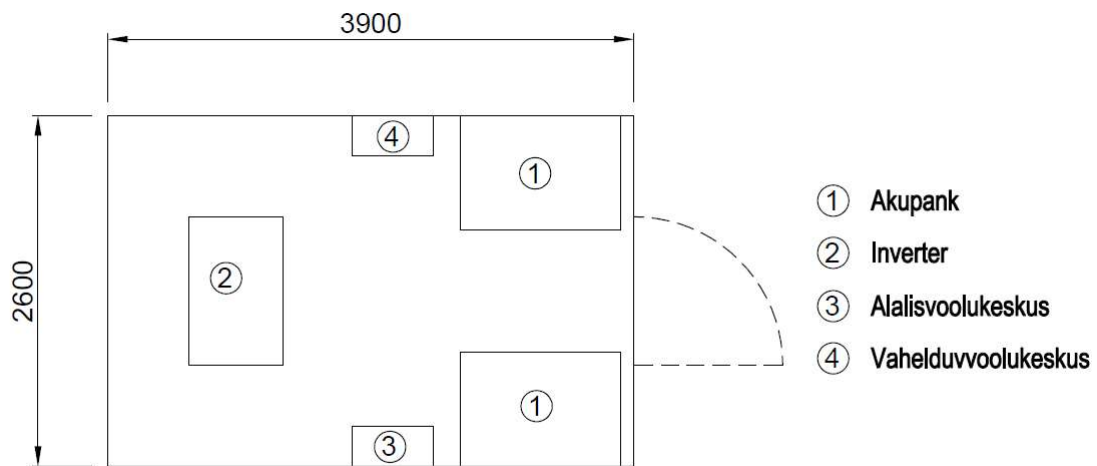
Joonis L3.2 Projekteeritava alajaama TT3-AJ1 asendi plaan

Tabel L3.6 Tööstustarbijale 3 planeeritud alajaama TT3-AJ1 kuluridade jaotus

Projekteeritava alajaama TT3-AJ1 kuluread	Osa alajaama hinnast
Muundur	13%
Salvesti	57%
Juhtimisseade	4%
Väliskest	8%
Muud materjalid	2%
Tootearendus ja koostamine	4%
Arendaja üldkulud ning kasum	13%



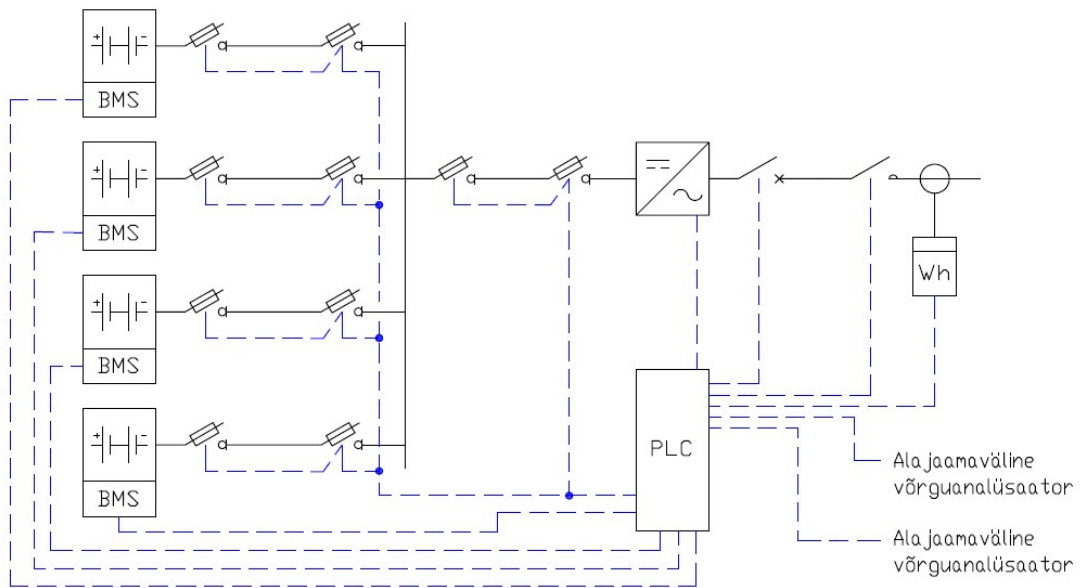
Joonis L3.3 Projekteeritava alajaama TT3-AJ2 põhimõtteskeem



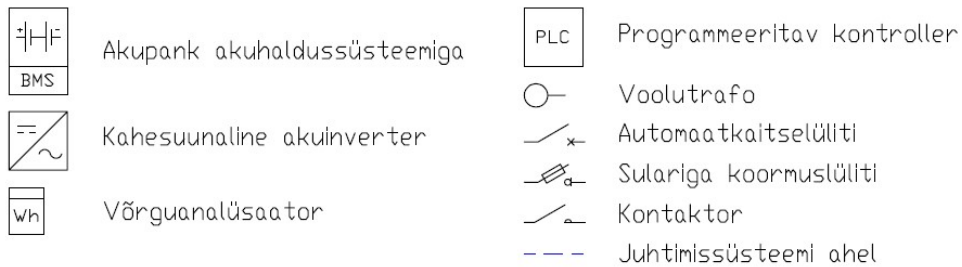
Joonis L3.4 Projekteeritava alajaama TT3-AJ2 asendiplaan

Tabel L3.7 Tööstustarbijale 3 planeeritud alajaama TT3-AJ2 kuluridade jaotus

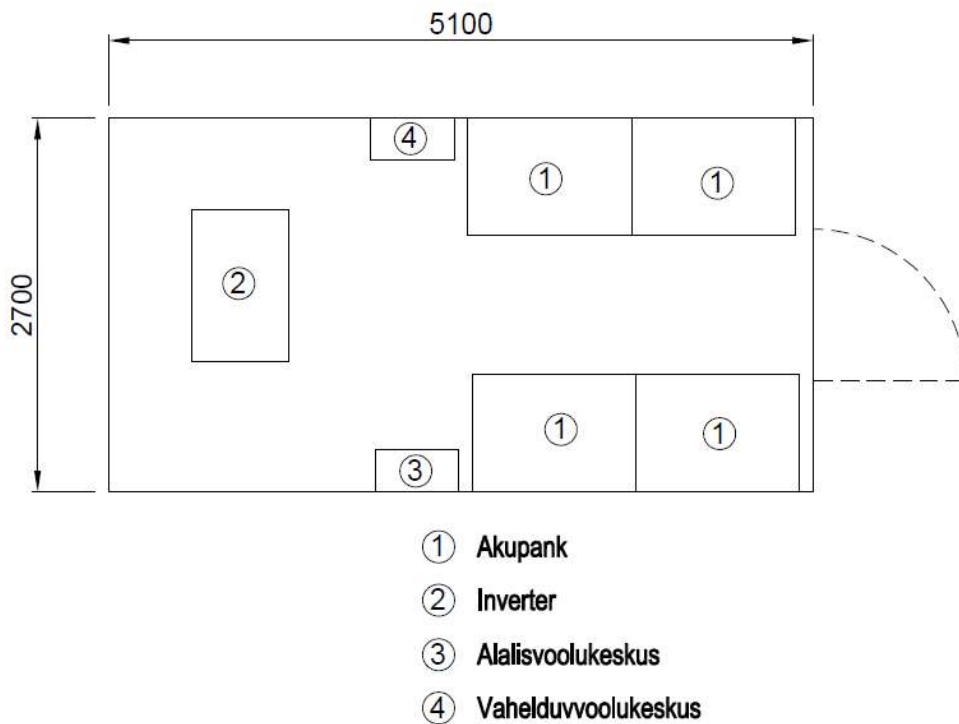
Projekteeritava alajaama TT3-AJ2 kuluread	Osa alajaama hinnast
Muundur	17%
Salvesti	56%
Juhtimisseade	2%
Väliskest	8%
Muud materjalid	2%
Tootearendus ja koostamine	3%
Arendaja üldkulud ning kasum	13%



TINGMÄRGID:



Joonis L3.5 Projekteeritava alajaama TT3-AJ3 põhimõtteskeem

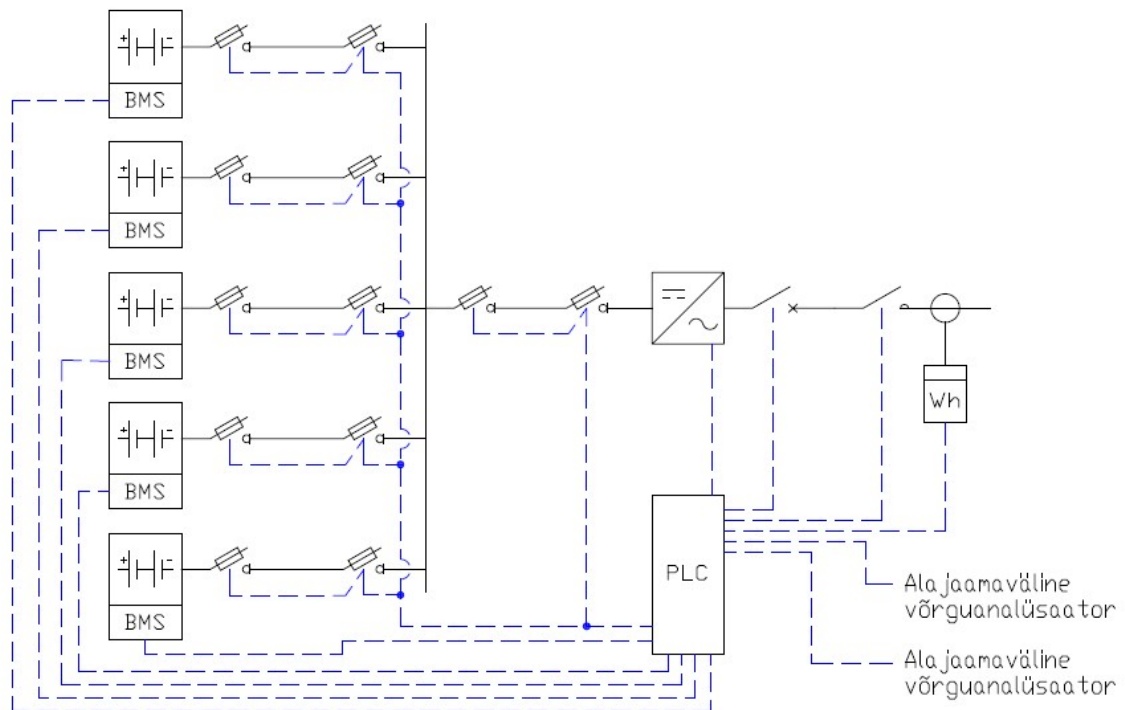


- ① Akupank
- ② Inverter
- ③ Alalisvoolukeskus
- ④ Vahelduvvoolukeskus

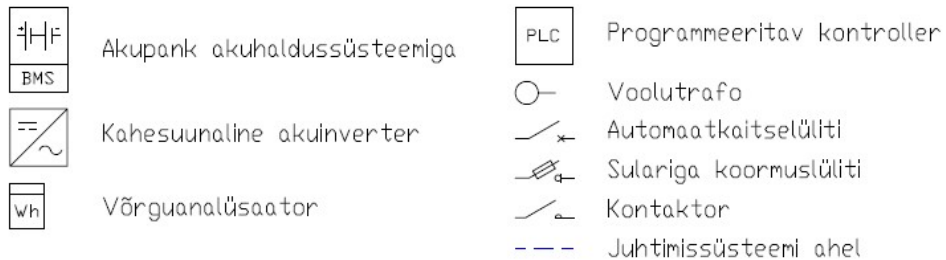
Joonis L3.6 Projekteeritava alajaama TT3-AJ3 asendiplaan

Tabel L3.8 Tööstustarbijale 3 planeeritud alajaama TT3-AJ3 kuluridade jaotus

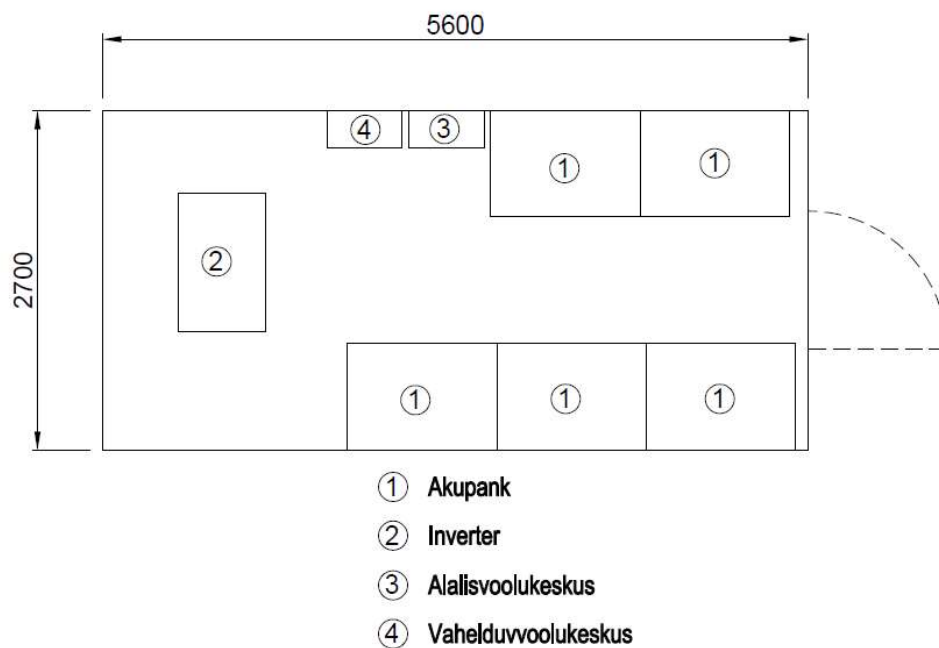
Projekteeritava alajaama TT3-AJ3 kuluread	Osa alajaama hinnast
Muundur	12%
Salvesti	64%
Juhtimisseade	1%
Väliskest	7%
Muud materjalid	1%
Tootearendus ja koostamine	2%
Arendaja üldkulud ning kasum	13%



TINGMÄRGID:



Joonis L3.7 Projekteeritava alajaama TT3-AJ4 põhimõtteskeem



Joonis L3.8 Projekteeritava alajaama TT3-AJ4 asendiplaan

Tabel L3.9 Tööstustarbijale 3 planeeritud alajaama TT3-AJ4 kuluridade jaotus

Projekteeritava alajaama TT3-AJ4 kuluread	Osa alajaama hinnast
Muundur	10%
Salvesti	67%
Juhtimisseade	1%
Väliskest	6%
Muud materjalid	1%
Tootearendus ja koostamine	2%
Arendaja üldkulud ning kasum	13%