



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

Energiasalvestiga elektrialajaama arendamine ja uurimine

Elektroenergeetika õppekava

Energiasüsteemide õppetool

Magistritöö

Õppetooli hoidja

Juhendaja

Kaasjuhendaja

Lõpetaja

dotsent Jako Kilter

dotsent Jako Kilter

dotsent Elmo Pettai

Vitali Navross

Tallinn 2016

Autori deklaratsioon

Deklareerin, et käesolev lõputöö, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituudile haridusastme lõpudiplomi taotlemiseks elektroenergeetika erialal. Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Lõpetaja (allkiri ja kuupäev) _____

Lõputöö kokkuvõte

<p>Autor: Vitali Navross</p> <p>Töö pealkiri: Energiasalvestiga elektrialajaama arendamine ja uurimine</p> <p>Kuupäev: 07.01.2016</p>	<p>Lõputöö liik: Magistritöö</p> <p>101 lk</p>
<p>Ülikool: Tallinna Tehnika Ülikool</p> <p>Teaduskond: Energeetikateaduskond</p> <p>Instituut: Elektroenergeetika instituut</p> <p>Õppetool: Energiasüsteemide õppetool</p>	
<p>Töö juhendaja: dotsent Jako Kilter</p> <p>Töö kaasjuhendaja: dotsent Elmo Pettai</p>	
<p>Sisu kirjeldus:</p> <p>Käesoleva lõputöö eesmärk on akupatareidel töötava energiasalvestiga alajaama ehituse ja tööpõhimõtte uuring.</p> <p>Töö annab ülevaate süsteemi põhielementidest, nendes toimivatest protsessidest, lisaks süsteemi juhtimisalgoritmide uuringust mikroõrgu osana. Lähtudes uuritud materjalist antakse töös võimalikud lahendused elektrienergia salvestamise süsteemi laiendamiseks lisamoodulite ühendamise abil.</p> <p>Töö käigus on läbi viidud erinevaid süsteemi katsetusi kasutades olemasolevat prototüüpi. Saadud andmete alusel on välja toodud süsteemi laadimise ja tühjendamise laadimise karakteristikud ning tehtud kasuteguri arvutused, mis on vajalikud tõhusamate ja suurema mahtuvusega süsteemide projekteerimiseks.</p>	
<p>Märksõnad: energiasalvesti, Li-ioon aku, tarkõrgud, mikroõrgud, jaotusõrgud, alajaam</p>	

Summary of the diploma work

Author: Vitali Navross	Kind of the work: Master thesis
Title: Energy storage system development and research	
Date: 07.01.2016	101 pages
University: Tallinn University of Technology	
Faculty: Power Engineering	
Department: Electrical Power Engineering	
Chair: Power Systems	
Tutor of the work: Associate Professor Jako Kilter	
Co-tutor of the work: Associate Professor Elmo Pettai	
Abstract:	
<p>In current thesis author studies structure and principle of work of electro energy saving system based on accumulators.</p>	
<p>Author gives overview of basic elements of system, processes in these elements and management algorithms of the system being as a part of solar park. On base of current research there are defined solutions for system extension by means of joining additional modules to basic system module.</p>	
<p>During research author tests the system with prototype. As a result of current work there are certain parameters defined for charging and discharging processes of system, carried out calculations of productivity, which is required for more effective and high-capacity system projects.</p>	
Key words: energy storage system, Li-Ion batteries, smart grid, micro grid, distribution grid, substation	

Резюме дипломной работы

Автор: Виталий Наврость	Вид работы: Магистерская диссертация
Название работы: Исследование и разработка системы запасения электроэнергии	
Дата: 07.01.2016	101 стр.
Университет: Таллинский Технический Университет Факультет: Энергетический факультет Институт: Электроэнергетика Кафедра: Электроэнергетика	
Руководитель работы: доцент Яко Кильтер Соруководитель работы: доцент Эльмо Петтай	
Резюме: <p>Задачей данной дипломной работы является изучение строения и принципа работы системы сохранения электроэнергии на основе аккумуляторных батарей.</p> <p>Работа включает в себя обзор основных элементов системы, процессов, происходящих в них, а также изучение алгоритмов управления системой, как части парка солнечных батарей. На основании изученного материала были предложены возможные варианты расширения системы путём подключения дополнительных модулей сохранения электроэнергии к основному модулю.</p> <p>В ходе работы были проведены различные испытания системы при помощи имеющегося прототипа. На основании полученных данных составлены характеристики процессов заряда-разряда системы и произведены расчёты производительности, необходимые для проектирования более эффективных и энергоёмких систем.</p>	
Ключевые слова: системы запасения электроэнергии, литий-ионные аккумуляторы, умные сети, микросети, распределительные сети, подстанция	

Sisukord

Lõputöö ülesanne.....	8
Eessõna	10
Lühendite ja sümbolite loetelu	11
Sissejuhatus.....	12
1 Elektrivarustussüsteemi tööpõhimõte, tüübid ja arengu võimalused.	14
1.1 Enimlevinud elektrivarustussüsteem	14
1.2 Elektrivarustussüsteemi arengu vajadus	15
1.3 Uue põlvkonna elektrivarustuse võrgud	15
1.3.1 Tarkvõrgud.....	16
1.3.2 Mikrovõrgud	17
1.3.3 Elektri hajutatud tootmine.....	18
1.3.4 Arenenud elektrivõrkude eelised.....	19
2 Kaasaegse elektrivarustussüsteemi energiasalvestid.....	20
2.1 Tänapäeval kasutuses olevad elektrienergiasalvestuse tehnoloogiad	20
2.2 Akupatareidel töötavad energiasalvestid	22
2.2.1 Kasutatavad akude tüübid	23
2.2.2 Suuremad ESS tootjad	24
2.3 Energiasalvestiga süsteemide võimalused	27
3 Arendatava energiasalvestiga alajama üldeesmärk, konstruktsioon ja seadmed	28
3.1 AJ-a üldeesmärk	28
3.2 Alajama konstruktsiooni kirjeldus	29
3.3 Energiasalvesti alajama nimiandmed ja plokkskeem.....	30
3.4 Peajaotuskilp.....	31
3.5 Muundurikilp	32
3.5.1 NXA AC/DC konverter.....	32
3.5.2 LCL Filter	33
3.5.3 RTU.....	33
3.5.4 SATEC ezPAC SA330.....	33
3.6 Trafokapid	34
3.6.1 Eraldustrafo	34
3.6.2 Lühistuskapp	34
3.7 Kaughalduse seadmed	34
3.8 Akude kapp.....	35
3.8.1 Akud.....	35
3.8.2 BMS.....	35
4 ESS peamised juhtimistegevuste algoritmid	36
4.1 Ohutu töö režiimi jälgimistegevuse algoritm.....	36
4.2 Käivitustegevuse algoritm	37
4.3 Seiskamistegevuse algoritm.....	40
4.4 Ooterežiim	42
4.5 Laadimistegevuste algoritmid.....	43
4.5.1 Sissejuhatav toiming	45
4.5.2 Laadimise toiming.....	46
4.5.3 Laadimise lõpetamise toiming	47
4.6 Tühjendamistegevuse algoritm.....	48
5 Mikrovõrgu rakenduse juhtimisprotsesside algoritmide kirjeldus	50
5.1 Mikrovõrgu käivitamise ja režiimi valimise protsessi algoritm	50
5.2 Mikrovõrgu laadimisprotsessi algoritm.....	52
5.3 Energiasalvesti tühjendamisprotsessi algoritm.....	54
5.4 Seiskamisprotsessi algoritm.....	56
6 Energiasalvestiga alajama laienduse võimalused	58
6.1 Laiendamine võimsusvahemikus 150 kuni 1000 kW madalpinge poolel	58
6.2 Laiendamine võimsusvahemikus 1 kuni 10MW keskpinge poolel	60

6.3 Laiendamise võimaluste võrdlus	62
7 Energiasalvestiga alajaama prototüübi katsetamine ja efektiivsuse määramine.....	64
7.1 Prototüübi kirjeldus	64
7.2 Energiasalvesti laadimine	66
7.3 Energiasalvesti tühjendamine	69
7.4 Energiasalvesti laadimis-ja tühjendamistäistsükkel.....	73
7.5 Energiasalvestiga alajaama kadude arvutamine ja efektiivsuse määramine	77
7.5.1 Kadude arvutamine	77
7.5.2 Efektiivsuse arvutamine	83
7.5.3 Energia jaotamine.....	86
Kokkuvõte	88
Kirjandus	90
Lisad	93
L.1. Alajaama hoone projekt.....	94
L.2. Prototüüpi 30A vooluga laadimis ja tühjendamis katsetulemused.....	99

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema: Energiasalvestiga elektrialajaama arendamine ja uurimine

Üliõpilane: Vitali Navross, 104590 AAVM

Lõputöö juhendaja: dotsent Jako Kilter

Lõputöö kaasjuhendaja: dotsent Elmo Pettai

Õppetool: Energiasüsteemide õppetool

Õppetooli hoidja: dotsent Jako Kilter

Lõputöö esitamise tähtaeg: 07.01.2016

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppetooli hoidja (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Tarkvõrgud on innovatiivne lähenemine elektrienergia tootmise integreerimisele ülekande-, jaotus- ja tarbimisvõrkude süsteemidesse ning uute informatsiooniliste ja kommunikatsiooniliste tehnoloogiate kasutuselevõtmine andmete edastamiseks. Tarkvõrk võimaldab lahendada energeetikas esilekerkinud väljakutseid ning probleeme.

Seoses taastuvenergia allikate järjest laiema kasutuselevõtmisega ja integreerimisega elektrivõrku vajatakse varustuskindluse tagamiseks elektrisüsteemis energiasalvesteid. Energiasalvestid võimaldavad elektrienergia voogude paindlikumat juhtimist tuleviku tarkvõrgus. Energiasalvestite tõhususe tõstmiseks on vaja nende omadusi täpsemalt uurida, et anda ettevõtete tootearendajatele projekteerimiseks vajalikku infot.

2. Töö eesmärk

Käesoleva lõputöö eesmärk on uurida akupatareidel töötava energiasalvestiga alajaama ehitust ja tööpõhimõtet ning olemasoleva prototüübi abil katseliselt määrata Li-ioon energiasalvesti laadimis- ja tühjendamiskarakteristikud ning energiasalvesti kasutegurit.

3. Lähteandmed:

- Lõpetatud projekti „Energiasalvestiga alajaama arendamine“ lõpparuanne koos lisadega.
- Prototüüpalaajaama madalpingeosa ja energiasalvesti uurimiseks ehitatud katsestend ja selle seadmete dokumentatsioon.
- Tellija tehnilised nõudmised (täpsustamisel).
- Juhendaja(te) soovitusel.
- Erialase kirjanduse allikad.

4. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Ülevaate koostamine energiasalvestiga alajaamade arengusuundadest ja nendes kasutatavatest tehnilistest lahendustest.
- Harju Elekter Elektrotehnika AS arendatava alajaama tööpõhimõtte uurimine ja kirjeldamine.
- Energiasalvestiga alajaama juhtimistegevuste algoritmide uurimine ja kirjeldamine.
- Modulaarselt laiendatava energiasalvestiga alajaamade arendamine ja soovitude andmine projekteerijatele.
- Projekteerija peab saama alajaama nimivõimsust vastavalt tellija vajadustele muuta vahemikus 150 – 10 000 kW;
- Alajaama madalpingepoolel on põhimooduli nimivõimsus 150 kW, akupatarei energiamah 150 kWh;
- Alajaama madalpingepoolel on lisamooduli nimivõimsus 300 kW, akupatarei energiamah 300 kWh;
- Keskpingele ühendatava alajaama energiasalvesti moodul-fiidrite arv: 1 kuni 10, millest igaühe nimivõimsus on 1000 kW ja akupatarei energiamah 1000 kWh;
- Mikrovõrku integreeritava energiasalvestiga alajaama juhtimisprotsesside kirjeldamine ja algoritmide koostamine.
- Katsestendi Li-ioon energiasalvesti laadimis- ja tühjendamiskarakteristiku katseline määramine erinevate võimsuste korral ja tulemuste dokumenteerimine.
- Olemasoleva energiasalvesti prototüübi laadimis- ja tühjendamistsükli uurimine ja selle kasuteguri määramine.

Eessõna

Käesolev magistritöö fokuseerib akupatareidel töötava energiasalvesti süsteemi uuringule. See projekt on Tallinna Tehnikaülikooli ja Harju Elekter Elektrotehnika AS'i omavahelise koostöö tulemus.

Antud töö põhineb energiasalvesti integreerimise pilootprojektil, mille algandmed olid saadud Harju Elekter Elektrotehnika AS'lt. Arendatava alajaama juhtimisloogika annab võimaluse opereerida mikrovõrgu rakendusega autonoomses režiimis põhinedes selle parameetritel.

Praktilise töö käigus saadud tulemustel ehk elektrienergia salvestamissüsteemi laadimis- ja tühjendamistegevuste karakteristikutel ning kasuteguri määramisel on oluline roll energiamahukamate ja efektiivsemate süsteemide projekteerimisel tulevikus.

Autor soovib avaldada suurt tänu dotsent Elmo Pettai'le pakutud võimaluse eest osaleda käesoleva projekti arendamisel, dotsent Jako Kilter'ile juhendamise ja PhD Marek Mägi'le töö käigus nõustamise eest ning Kristjan Peterson'ile töö praktilise osa abistamisel.

Lõpetaja: Vitali Navross

Elukoht: Vana-Rannamõisaa tee 1F/3

Töökoht: Harju Elekter Elektrotehnika AS

Amet: Müügiinsener

Tel.: 56 607 241

Lühendite ja sümbolite loetelu

A	-	Amper
V	-	Volt
Ω	-	Ohm
W	-	Vatt
Wh	-	Vatt-tund
VA	-	Volt Amper
P	-	Aktiiv võimsus
R	-	Takistus
Ah	-	Ampertund
I	-	Vool
U	-	Pinge
η	-	Kasutegur
E	-	Energia
<i>SOC</i>	-	Aku laetuse aste (<i>State of charge</i>)
<i>DOD</i>	-	Tühjakslaadimise sügavus (<i>Depth of Discharge</i>)
<i>BMS</i>	-	Aku-patarei juhtimissüsteem (<i>Battery Management System</i>)
<i>RTU</i>	-	Kaugjuhtimise seade (<i>Remote Terminal Unit</i>)
<i>UPS</i>	-	Katkematu energiaallikas (<i>Uninterruptible Power Supply</i>)
<i>ESS</i>	-	Energy storage system
<i>BESS</i>	-	Battery energy storage system

Sissejuhatus

Tänapäevast elu ei saa ette kujutada ilma elektrita. Nõudlus elektrienergia järele kasvab jätkuvalt üle maailma nii arenenud kui ka arenguriikides. Energia tekitamiseks kasutatavad meetodid muutuvad pidevalt, aga põhi- ja jaotusvõrgud, mille kaudu seda transporditakse lõpptarbijani, on enamasti sama. Seetõttu eelmise sajandi printsiipide alusel töötavad elektrisüsteemid ei ole võimelised rahuldama kaasaegseid nõudeid.

Elektrienergia ülekandmine tootjatelt tarbijatele tagavad põhi- ja jaotusvõrgud. Võrkude juhtimiskeskused vastutavad kogu elektrisüsteemi töökindla ja otstarbeka toimimise eest, kindlustades aktiiv- ja reaktiivvõimsuse tasakaalu ning talitluskindluse. Põhivõrk tegeleb pingele ja sageduse reguleerimisega ja rikete kõrvaldamisega ning hoolitseb piisava genereeriva võimsuse reservi eest. Jaotusvõrgu ülesandeks on elektri edastamine, 0,4-110 kV võrgu haldamine, rikete likvideerimine, elektrikao vähendamine ja pingele kvaliteedi tagamine.

Mida suurem on nõudlus toodetud elektrienergia järele, seda suurem on vajadus tagada elektrienergia töökindlus. Elektrisüsteemi ööpäevaringse elektrijaamade ja tarbijate koostöös käigus peab igal ajahetkel olema tagatud elektri tootmise ja tarbimise tasakaal. Elektritarbijate mõttes on oluline saada katkematu kvaliteetse elektrienergia toide. Selle saavutamiseks tuleb traditsioonivõrkudes elektrisüsteemi talitlust ülihoolega planeerida ja operatiivselt juhtida. Teiseks võimaluseks on moderniseerida olemasolevad traditsioonilised põhivõrgud tarkvõrkudeks.

Tarkvõrgud on innovatiivne lähenemine elektrienergia tootmise integreerimisele ülekande-, jaotus- ja tarbimisvõrkude süsteemidesse ning uute informatsiooniliste ja kommunikatsiooniliste tehnoloogiate kasutuselevõtmine andmete edastamiseks. Adaptiivse, interaktiivse, intellektuaalse ja integratiivse tarkvõrgu integreerimine võimaldab aidata tänapäevaste vajadustega seotud väljakutsete ning probleemide lahendamisel.

Antud töös on kirjeldatud üks elektrivõrkude moderniseerimise meetmetest, mis põhineb mikrovõrkude kontseptsiooni rakendamisel. Põhjalikumalt analüüsitakse energiasalvestiga alajaama struktuuri ning tööpõhimõtet, mis on tarkvõrkude ja mikrovõrkude üks kõige olulisem element.

Energiasalvestiga alajaam on selline süsteem, mis võimaldab salvestada elektrienergiat kui selle nõudlus on madal ja tagastada seda võrku tippajal. Energiasalvestid annavad võimaluse efektiivselt tasakaalustada võrgu elektrivõimsusebilanssi, suurendada taastuenergiaallikate poolt genereeritavat energia kasutegurit, taastuenergia allikate kõikumiste silumist, saada elektrienergiat juhul, kui üldises jaotusvõrgus on tekkinud katkestused jne.

Lõputöö esimene peatükk kirjeldab olemasolevate süsteemide tööprintsipe ja nende probleeme, mis on põhjustatud kaasaegsete nõuete taseme tõusuga. Samuti näidatakse uue põlvkonna võrkude struktuure ja põhilisi funktsioone.

Teises peatükis vaadeldakse enimlevinuid energiasalvestuse meetmeid. Käesoleva töö raames suunatakse põhirõhk akupatareidega töötavatele süsteemidele. Samas peatükis antakse ülevaade tuntud firmade poolt esitatud lahendustele energiasalvestamiseks akude baasil ja tuuakse välja eelised ülalnimetatud süsteemide kasutamisel.

Kolmas peatükk on pühendatud arendatava süsteemi uurimiseks ehituse ning komponentide poolt. Siin kirjeldatakse iga elemendi põhieesmärki selleks, et lihtsustada kogu süsteemi protsesside arusaamist.

Peatükid 4-6 hõlmavad süsteemis toimuvate protsesside kirjeldamist ning alajaama, kui päikeseenergia elektri jaama osa, juhtimisalgoritmide ülevaadet. Siinsamas pakutakse energiasalvestuse süsteemi laiendamist erinevate printsiipide kasutamisel.

Peatükk 7 koosneb praktilise osa andmete analüüsist. Töö käigus olid läbi viidud prototüübi katsetused erinevate laadimis- ja tühjendamisvoolude juures. Saadud tulemuste põhjal olid esitatud laadimis- ja tühjendamiskarakteristikud ning välja arvatud süsteemi kasutegur. Kasuteguri suurusjärk on näitlikustatud lugejale kadude jaotuse diagrammi abil.

1 Elektrivarustussüsteemi tööpõhimõte, tüübid ja arengu võimalused.

Kõik elektrisüsteemid koosnevad kolmest põhilisest elemendist [1]:

- elektrijaamad, mis muunduvad erinevat tüüpi energiat elektrienergiaks;
- kõrgepinge ülekandevõrgud, mis toimetavad energiat tarbijatele edasi;
- jaotusvõrgud, mis edastavad elektrienergiat lõpptarbijale.

Energiasüsteemi lahutamatuks osaks on elektrivarustussüsteem, mis vajab pidevat jälgimist ja teenindust. Elektrivarustussüsteemi üheks põhiliseks probleemiks on selle tööstabiilsuse tagamine. Elektrienergia parameetrite mittevastavus lubatud normidele võib põhjustada avariolukorra, millele järgneb majanduslik kahju või õnnetusjuhtumid.

1.1 Enimlevinud elektrivarustussüsteem

Enamik olemasolevatest elektrivarustussüsteemidest on ehitatud sarnase skeemi järgi:

- Alajaama trafo tõstab pinget elektrijaamas toodetud elektrienergia transporteerimiseks.
- Kõrgepingeliinide abil kantakse elektrienergia tarbijatele lähemale edasi.
- Pärast trafoga pinge alandamist edastatakse elektrienergia jaotusvõrgu kaudu lõpptarbijatele.

Tavapärane süsteem saab elektrienergiat mitmest suurest elektrigeneraatorist ja kannab selle kaugemal asuvatele tarbijatele üle. On olemas terve rida põhjuseid, miks energiat tootvad elektrijaamad asuvad tarbijatest kaugel ning seetõttu tuleb elektrienergiat transportida lõppkliendile [1]:

- **Energiaallika ehk kütuse asukoht.** Sageli on odavam ehitada alajaam energiaallika lähedal ja kanda üle elektrienergiat tarbijale kui transportida kütust või energiaallikat. Eriti on see tähtis geotermalsete allikate puhul, mida pole üldse võimalik transportida.
- **Ökonoomiline efektiivsus.** Isegi kui mõne kütuse liigi transportimine on lihtne (näiteks gaasi transportimine), siis globaalses mõttes on ikkagi efektiivsem elektrienergiat

transportida. Teiste sõnadega – on odavam välja ehitada üks suur elektrijaam ja transportida elektrit kui teha palju väiksemaid elektrijaamasid tarbijate lähedal.

- **Riskide maandamine.** Elektrigeneraatori rikke tõttu võivad tekkida suured finantskahjud energiasüsteemis. Seepärast on mõttekam ühendada mitu elektrijaama ühte üldsüsteemi kui paigaldada mitu generaatorit ühte alajaama.

1.2 Elektrivarustussüsteemi arengu vajadus

Viimasel ajal võib märgata, et paljudes tööstuslikult arenenud riikides muutuvad elektrivõrgud hiiglasuurteks. Selle põhjus on elanike arvu juurdekasv ja majandusareng. Sellise tohutu energiasüsteemi ohutuse jälgimine ja töövõimsuse säilitamine muutub keerulisemaks. Üheks traditsioonilistest elektrivõrgu stabiilsuse probleemi lahendamise viisidest on uute elektrijaamade väljaehitamine ja kõrgepinge ülekandeliinide arvu suurendamine elektrijaama ning tarbijate vahel. Teine variant on uuendada olemasolevad võrgud ja muuta need „targemateks” [2].

Enamik olemasolevatest elektrivõrkudest oli välja ehitatud möödunud sajandil ja ei vasta maailma kaasaegsetele tendentsidele. Võrkude projekteerimise eesmärgiks oli elektrienergia ühesuunaline kohaletoometamine elektrijaamast tarbijateni. Sellisel juhul reguleeritakse toodetava ja tarbitava energia bilanss reaalajas toitepoolel. Traditsioonilistes elektrivõrkudes praktiliselt puudub elektrienergia tarbimise kontroll tehnoloogiliste piirangute tõttu [3].

Ülalesitatud põhjendusi arvestades võib öelda, et varem ehitatud elektrivõrgud, millede eesmärk oli vananenud tehnoloogiate abil möödunud sajandi vajaduste rahuldamine, ei saa enam kaasaegseid nõudeid täita, rääkimata tulevikust.

1.3 Uue põlvkonna elektrivarustuse võrgud

Tänapäeval käib olemasolevate võrkude moderniseerimine vastavalt viimaste tehnoloogiate arendamise tendentsidele. Kasutusele tulid hajutatud energiatootmise seadmed, taastuvad energiaallikad ja energia koostootmine (elektrienergia ja soojusenergia kombineeritud tootmine). Terminit „tarkvõrk” rakendatakse selliste võrkude puhul, mis kasutavad kaasaegseid

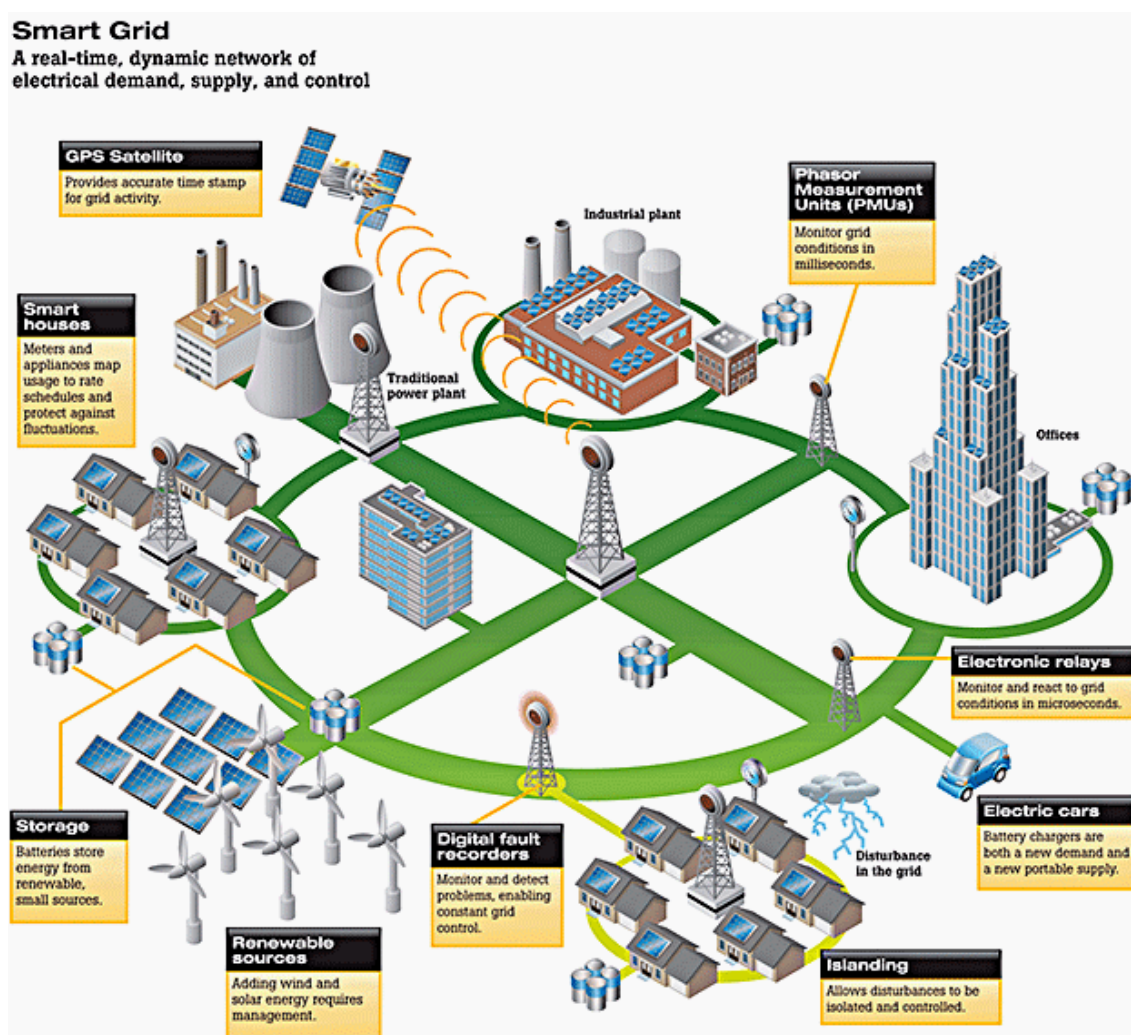
informatsioonilisi ja kommunikatsioonilisi tehnoloogiaid, jäävad paindlikeks, kindlateks ja säästlikeks dekorbaniseeritud elektrivarustuse süsteemideks [4].

1.3.1 Tarkvõrgud

Tarkvõrgud on innovatiivne lähenemine elektrienergia tootmise, ülekande-, jaotus- ja tarbimisvõrkude integreerimisel süsteemidesse. Selleks, et olla adaptiivne, interaktiivne, intellektuaalne, integratiivne ja optimeeritud, peab tarkvõrk täitma palju funktsioone [5]. Tarkvõrgu lihtsustatud põhimõttel on toodud joonisel 1.1.

European Technology Platform for Smart Grids defineeris tarkvõrgu järgmiselt:

Tarkvõrk „*Smart Grid*“ on selline võrk, mis saab arukalt integreerida kõiki sellega ühendatud kasutajaid (generaatoreid, tarbijaid ja seadmeid, mis täidavad mõlemat funktsiooni) selleks, et tõhusalt tarnida stabiilset, ökonoomset ja ohutut energiat [4].



Joonis 1.1 Tarkvõrgu lihtsustatud põhimõttel [6]

Tarkvõrk kasutab innovaatilisi tooteid ja teenuseid koos intellektuaalsete monitooringu, kontrolli, side ja isetaastumistehnoloogiatega järgmiste funktsioonide täitmiseks:

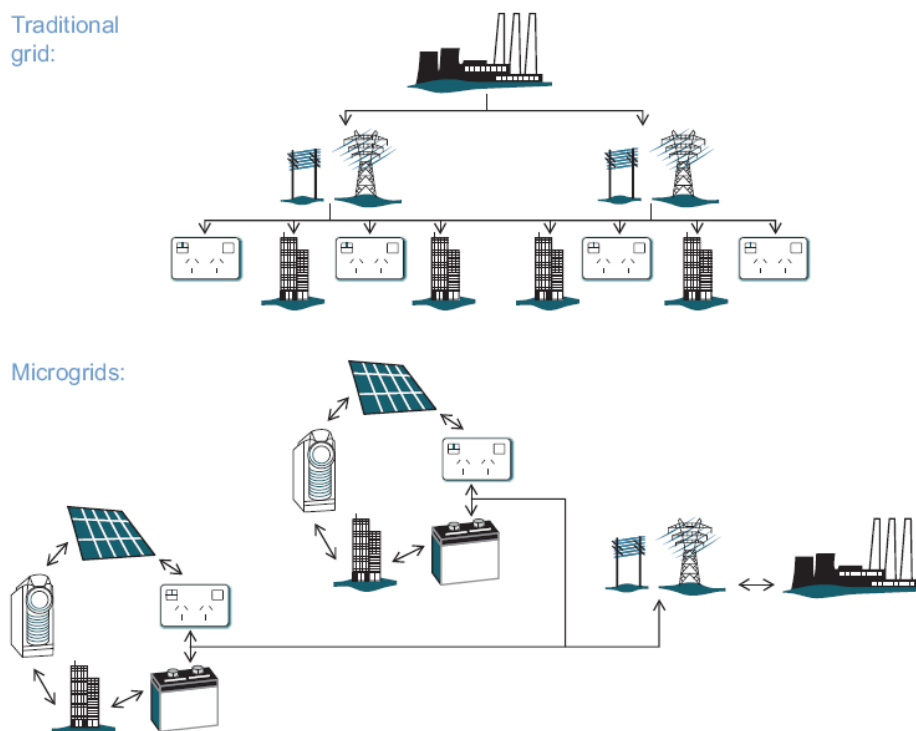
- Soodustada igasuguste suuruste ja tehnoloogiatega energiaallikate ühendust ja funktsionaalsust
- Lubada energiatarbijatel mängida oma rolli elektrisüsteemi talitluse optimeerimisel.
- Varustada energiatarbijat energiatarnija valikuga ja informatsiooni kättesaadavusega.
- Tunduvalt vähendada elektrisüsteemi mõju keskkonnale.
- Tõsta elektrienergia varustuskindluse ja ohutuse taset.

1.3.2 Mikrovõrgud

Mikrovõrku võib pidada tarkvõrkude ehituskiviks ja arvatavasti kõige perspektiivsema uue põlvkonna võrgu osaks [7]. Mikrovõrgu ja traditsioonilise võrgu lihtsustatud võrdlusmudelid on toodud joonisel 1.2.

Mikrovõrk on väikese objekti tarbijate ja hajutatud tootmise energiaallikate (mikroturbiinid, tuulegeneraatorid, päikesepaneelid ja elektrisalvestuse seadmed) kogum, mis on ühendatud ühte võrku. See võib olla ühendatud väliselektrivõrguga või isoleeritud sellest. Nimetatud võrku võivad kuuluda tööstus- ja munitsipaalpiirkondade, akadeemiliste ja avaliku kogukondade võrgud [8].

Mikrovõrkude tehnilised omadused teevad neid sobilikeks kaugel asuvate riigipiirkondade elektrivarustuse jaoks, kus elektrivarustus põhivõrgust on kas raskendatud topoloogiliste eriomaduste tõttu või kus seda rikutakse ilmastikuolude või inimtegevusest tingitud häirete tõttu liiga sageli.



Joonis 1.2 Mikrovõrgu ja traditsioonilise võrgu lihtsustatud mudelid [3]

Elektrivarustuse osas on mikrovõrkude põhilisemaks väärtuseks nende käsitlemine kontrollitava üksusena energiasüsteemis, mis saab tegutseda kui üks iseseisev tarbija. Tarbija seisukohast on mikrovõrk soodne lahendus oma elektrivajaduste rahuldamiseks. Neid võib kasutada süsteemi kindluse tõstmiseks ja fiidris pingekadu vähendamiseks ning ka katkematu toiteallikana.

Majanduslikust seisukohast vähendavad mikrovõrgud keskkonna saastumist ja globaalse soojenemise mõjusid.

1.3.3 Elektri hajutatud tootmine.

Vaatamata tavalise energiasüsteemi mitmetele eelistele on järgmised tehnilised, majanduslikud ja ökoloogilised kasud viinud energia tootmise hajutatud süsteemide arendamise ja integratsioonini [8]:

- Tarbimiskoormuse kiire kasv ja genereerimise suurendamine viib fossiilkütuse varu ammendumiseni. Seoses sellega on pidevalt arutamisel taastuvate energiaallikate kasutamise võimalused.

- Keskkonna saastamise ning globaalse soojenemise mõju vähendamine on võtmetegur taastuvate ressursside valimiseks fossiilsete energiaallikate asemele.
- Hajutatud tootmine annab paremad võimalused koostootmiseks ja jääksoojuse oma tööstuslikuks ja kaubanduslikuks kasutamiseks. See tõstab üldist elektrijaama tõhusust.
- Madala energiatihedusega piirkondades ja geograafiliselt raskesti ligipääsetavates piirkondades on energia hajutatud tootmine energiaallika põhiplokk.
- Võimalus töötada nii iseseisvalt kui ka välisvõrgu ühendusega teeb elektrivarustuse kvaliteetsemaks ja kindlamaks.

Peamiselt ühendatakse hajustootmise energiaallikad kesk- ja kõrgepinge võrkudega. Need süsteemid olid projekteeritud kaalutlusega, et tarbimiskoormused on passiivsed ja elektrienergia läheb ainult elektrijaamast tarbija suunas.

Mikrotootmise erinevad tehnoloogiad, näiteks mikroturbiinid, fotoelektrilised paneelid, kütuseelemendid ja tuuleturbiinid nimivõimsusega kuni 1000 kW, võivad olla ühendatud vahetult madalpinge võrguga.

1.3.4 Arenenud elektrivõrkude eelised

Tänu uute tehnoloogiate kasutuselevõtule on tarkvõrgud projekteeritud selliselt, et töötada optimaalsetes tingimustes isegi siis, kui elektrivarustuse võrgus tekivad rikked. Võrk peab olema võimeline ennast ümber seadistama ja taastuma selleks, et jätkuvalt toita tarbijaid ilma katkestuseta [5].

Intellektuaalvõrkude peamised ülesanded on järgmised:

- Energeetikasse investeringute efektiivsuse tõstmine;
- Kaasaegsete tehnoloogiate (näiteks: elektroonika, side, informatsiooni säilitamine ja vahetus, uued materjalid) eeliste kasutamine;
- Taastuvate energiaallikate (näiteks: tuul, vesi, päike) integreerimine.
- SF₆ ja CO₂ heitmete ja hulkuvate magnetväljade tekkimise tõenäosuse vähendamine;
- Elektrivarustuse kvaliteedi ja usaldusväärsuse tõstmine;
- Tarbijatele taskukohase energia pakkumine;
- Toitesüsteemi turvalisuse ja elektrienergia edasiandmise üldise ohutuse tagamine;
- Elektrienergia jaotamise ja ülekandevõrgu töö efektiivsuse tõstmine.

2 Kaasaegse elektrivarustussüsteemi energiasalvestid

Energiasüsteem peab genereerima nii palju elektrienergiat, et jätkuks tarbijate vajaduste katmiseks. Energia tarbimine ja genereerimine võib varieeruda sõltuvalt ööpäevast või hooajast. Energia salvestamissüsteemid mängivad tähtsat rolli nii energiasüsteemis üldiselt, kui ka mikrovõrkudes. Need süsteemid võivad salvestada üleliigset energiat, kui nad on ühendatud elektrivõrku või vabastada energiat, töötades isoleeritud režiimis või tippkoormuste tundidel. Nad soodustavad sageduse püsimist ja elektrienergia kvaliteedi parendamist. Selle tulemusena muutuvad mikrovõrgud ohutumateks ja stabiilsemateks[9].

2.1 Tänapäeval kasutuses olevad elektrienergiasalvestuse tehnoloogiad

Tänapäeval eksisteerib palju meetmeid elektrienergia salvestamiseks, mida on võimalik jagada kolmeks rühmaks:

Elektrilised	Mehaanilised	Elektrokeemilised
<ul style="list-style-type: none"> • Ülikondensaatorid • Ülijuhtivusega mähised 	<ul style="list-style-type: none"> • Hüdroenergia salvestid • Hoorattad • Sururõhu energiasalvestid 	<ul style="list-style-type: none"> • Akumulaatorid

Ülikondensaatorid on võimelised salvestama energiat ilma elektrokeemilise reaktsiooni osaluseta. Võrreldes traditsiooniliste kondensaatoritega omavad ülikondensaatorid suurt mahtuvust (kuni 5000 farad liitri kohta). Ülikondensaatorite põhiliseks puuduseks on suhteliselt madal energia tihedus ja kõrge omahind.

Ülijuhtivusega mähis kasutab mähist läbiva alalisvoolu poolt loodud magneetvälja energiat. Mähist jahutatakse krüogeenselt selleks, et saavutada ülijuhtivust ja välistada aktiivkadusid. Ülijuhtivusega mähise elektrilised parameetrid on võrreldavad ülikondensaatorite ja hooratate parameetritega. Vaatamata sellele on jahutussüsteemiga tehnoloogia keeruline ja väheefektiivne, mis teeb ülijuhtivusega mähise mitterealistlikuks elektrienergia salvestiks elektrivõrkudes.

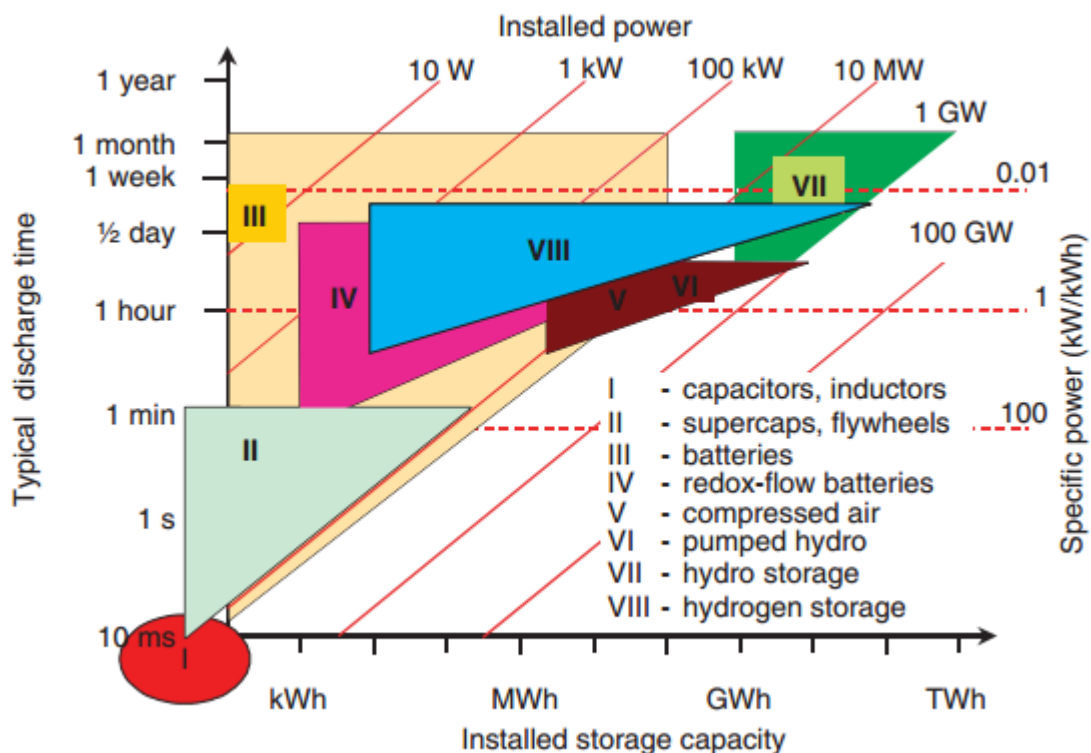
Hüdroelektrijaamad pumpavad vett alumisest basseinist ülemisse basseini. Kui võrgus on vajalik lisaenergia, siis kasutatakse turbiini pöörlemiseks vee potentsiaalset energiat. Tavaliselt kasutatakse antud süsteeme suurte elektrienergia varude salvestamiseks. Ülemise basseinina kasutatakse reeglina kunstlikke veekogusid ilma jõgede, jääliustiku ja jõeharu veeallikateta.

Hoorattad kasutavad pöörleva keha kineetilist energiat, põhinedes pöörleva massi inertsil ja rootori pöörlemiskiirusel. Hooratas on tüüpiline energia salvestamissüsteem suure elektrienergia varuga. Süsteemi põhiliseks puuduseks on tema enese tühjaks laadimine. Ilma kiirenduseta langeb rootori kiirus pidevalt hõõrumiskadude tõttu.

Sururõhu energiasalvestid kasutavad elektrienergiat õhu surumiseks elektriliste kompressorite abil. Reservuaaridesse sisse pumbatud suruõhku võib kasutada elektrienergia genereerimiseks, näiteks turbiini vahendusel. Reservuaaridena kasutatakse tihtipeale looduslikke õõnsusi (koopaid), mis võimaldab salvestada oluliselt rohkem suruõhu mahtu.

Akumulaatorid kasutavad keemiliste protsesside pööratavuse põhimõtet. Aku laadimisel toimuvad keemilised reaktsioonid, milles teise vooluallika elektrivälja energia muundub aku siseenergiaks. Keemilisel reaktsioonil vabanenud siseenergia muundub tagasi elektrivälja energiaks. Akumulaatorite põhiliseks puuduseks on rangelt piiratud laadimis- ja tühjendamiskiirus ning selle eluea sõltuvus laadimise ja tühjendamise tsüklite arvust.

Kõik need tehnoloogiad võib omakorda jagada kaheks rühmaks: kõrge võimsuse ja kõrge energiaga tehnoloogiaks. Kui kõrge võimsusega tehnoloogiad võimaldavad genereerida energiat tarbija jaoks vähem kui 10 sekundi jooksul, siis energia suure mahtuvusega tehnoloogiad võivad varustada tarbijaid energiaga tundide jooksul. Suure mahtuvusega süsteemi tüüpiline tühjaks laadimine toimub üks-kaks korda päevas. Kahte gruppi eristus on keeruliselt teostatav ülesanne, kuid põhiliseks eristusparameetrik on võimsuse ja mahtuvuse suhe. Kõrge võimsusega süsteemid peavad genereerima mitte vähem kui 20kW kWh mahtuvuse kohta. Üldalmainitud erinevate energiasalvestite tehnoloogiate võrdlustabel on toodud joonisel 2.1.



Joonis 2.1 Erinevate energiasalvestite tehnoloogiate võrdlustabel [10]

Jooniselt on näha, et hoorattad ja ülikondensaatorid sobivad kasutamiseks nendes süsteemides, kus suur energia kogus on vajalik lühiajaks. Suurematest energia salvestamiselementidest vahemikus alates 100 MWh kuni GWh on hüdroakumulatsioonielektriijaamad kõige tõhusamad. Suruõhusüsteemid omavad samuti suurt tootlust, kuid nende jaoks kasutatavad reservuaarid võtavad liiga palju ruumi, mis ei ole mugav. Energia salvestamissüsteemide jaoks, vahemikus 10 kWh kuni 10 MWh, on optimaalseks lahenduseks akupatareid, mis põhinevad *lead-acid* ja *lithium-ion* tehnoloogiatel [10].

2.2 Akupatareidel töötavad energiasalvestid

Mikrovõrkude integratsioon juba eksisteerivatesse võrkudesse on viinud nõudluse kasvule energia salvestamissüsteemide järele. Paljud juhtivad ettevõtted nagu ABB, AEG, Siemens, Samsung, Alstom, General Electric arendavad toodangut selleks, et võtta tekkinud nišši kontrolli alla. Selles peatükis antakse ülevaade suurematest tootjatest ja patareide tüüpidest, mida kasutatakse elektrienergia salvestamissüsteemides.

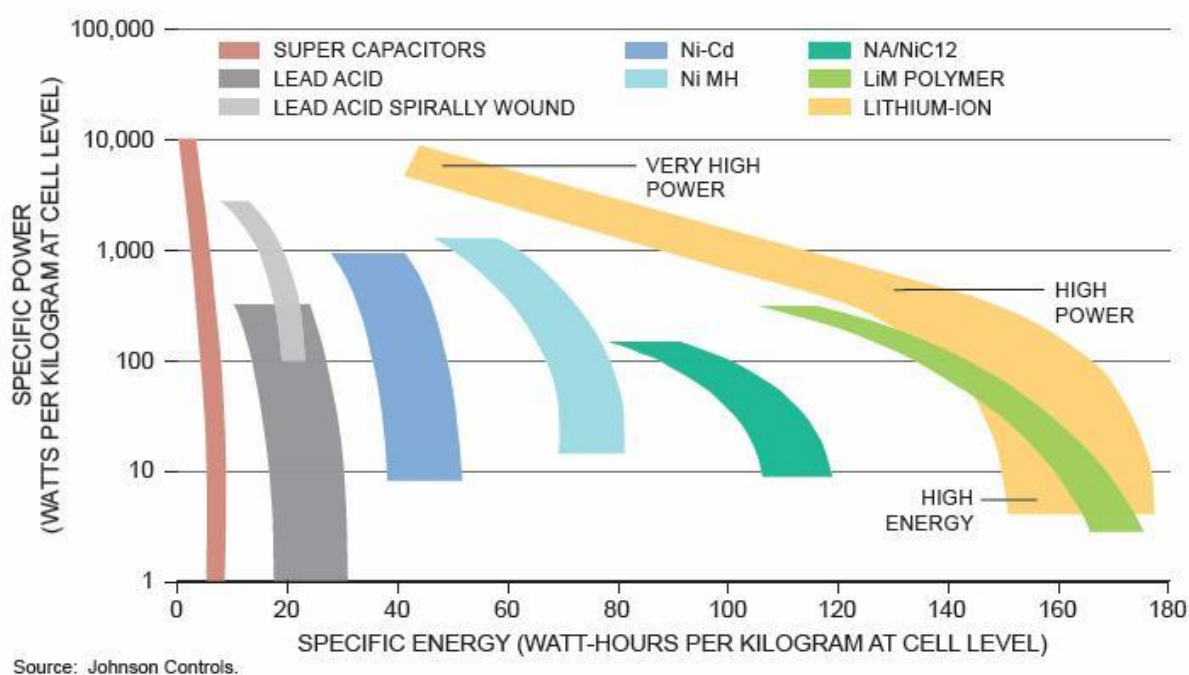
2.2.1 Kasutatavad akude tüübid

Viimaste aastakümnete jooksul on tootmistehnoloogiad muutunud ja ilmunud uued akupatareide tüübid. Viimaste aastate uuringud on võimaldanud välja töötada terve rida keemilisi akupatareid, millede iga tüüp omab kindlaid eelistusi. Vaatamata sellele ei anna mitte ükski lahendustest täielikku eelist võrreldes teistega. Akupatareid valides on vajalik lähtuda kindlatest nõudmistest sõltuvalt rakendusvaldkonnast.

Kõige kasutatavamad nüüdisaegsed akud on järgmised:

- Pliiaku SLA (*Sealed Lead Acid*);
- Nikkelkaadmiumaku (*NiCd*);
- Nikkel-metallhüdriidaku (*Nickel-Metal Hydride* või *NiMH*);
- Liitiumioonaku (*Li-Ion*);
- Liitiumpolümeeraku (*Li-Polymer*);
- Liitium-raudfosfaataku (*LFP*);
- RAM (*Rechargeable Alkaline Manganese*).

Erinevate energia salvestamissüsteemide tehniliste parameetrite võrdlemiseks kasutatakse tihti peale *Ragone* tabelit, kus võrreldakse energiatihedust (Wh/kg) võimsuse tiheduse (W/kg) järgi. Enamlevinud akude võrdlustabel on toodud allpool oleval joonisel 2.2.



Joonis 2.2 Erinevate akude energiatihedus [11]

Jooniselt on näha, et Li-ioon akud on palju tõhusamad ja mugavamad kasutamiseks energia salvestamissüsteemides. Seda tüüpi akud on kasutusel põhiliselt seal, kus on vajalik kõrge energia mahtuvus väikse mõõdu ja kaalu juures. Nad omavad suurt erimahtuvust, näitavad häid koormusparameetreid nii madalatel kui ka kõrgetel temperatuuridel, omavad väikest sisetakistust ja väga pikaajalist enese tühjaks laadimist. Tänapäeval on see kõige progressiivsem ja kiiresti arenev tehnoloogia. Samas on liitiumi elemendid küllalt tundlikud ning ohutuse ja pikaajalise eluea tagamiseks on vajalikud spetsiaalsed juhitavad integraalsed skeemid, mis piiravad tipp-pinget igas elemendis laadimise ajal ning väldivad järsult langevat pinget elemendi klemmidel tühjaks laadimisel. Peale selle on nad varustatud temperatuuri andurite ja soojuskaitsega, mis kontrollivad elementide temperatuuri vältimaks ohtlikku ülekuumenemist laadimise/tühjaks laadimise jooksul.

2.2.2 Suuremad ESS tootjad

2.2.2.1 ABB

ESSPro on lahendus elektrienergia salvestamiseks, mis on välja töötatud ühe suurima elektriliste komponentide ja süsteemide tootja ABB poolt. Antud süsteemid võimaldavad salvestada elektrienergiat mahuses 200 kWh kuni $n \times 7,2$ MWh ja edastada võrku võimsusega 100 kW kuni $n \times 30$ MW vastavalt. Installeerimiseks on ette nähtud kaks võimalust: konteineri või eraldi seisva ehitise kujul [12].



Joonis 2.3 ABB *ESSPro* PCS [12]

2.2.2.2 Siemens

Stabiilse ja usaldusväärse elektrivarustuse tagamiseks on Siemens välja töötanud *SIESTORAGE* - energia statsionaarseks salvestamiseks ja energia voogude reguleerimiseks mõeldud moodulsüsteemi, mis ühendab endas kiiresti toimivad energia võimsuse reguleerimisfunktsioonid ja liitium-iooni akud [13].



Joonis 2.4 Siemens *SIESTORAGE* [13].

2.2.2.3 Samsung

Samsung SDI on välja töötanud moodullahenduse, mis tagab laia energia võimsuste spektri alustades mitmest kW kuni MW-ni paralleelse konfiguratsiooniga. Tõhus Samsung SDI konstruktsioon maksimeerib ruumi säästmist. Samsung SDI *ESS* süsteemi pakutavaid paindlikke moodulkonstruktsioone võib kergesti adopteerida tellija erinevate nõudmiste rahuldamiseks[14].



Joonis 2.5 Samsung SDI energiasalvesti [14]

2.2.2.4 Alstom

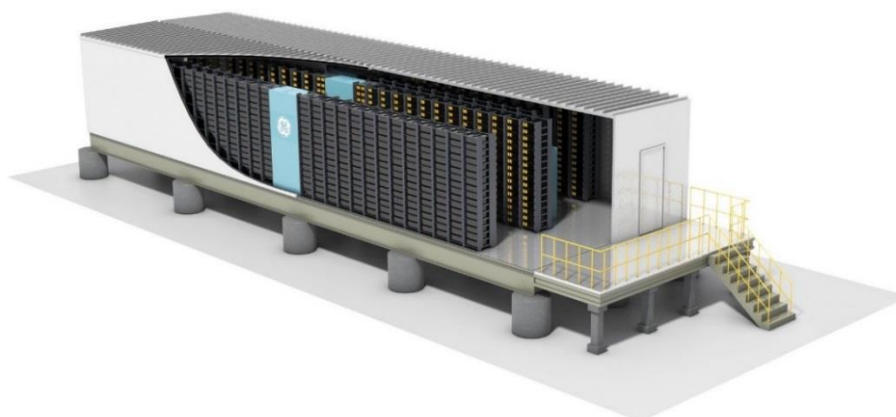
Elektrienergia salvestamiseks on Alstom loonud targa ja kompleksse lahenduse *MaxSine eStorage*. Spetsiaalne tarkvara täielikult kontrollib salvestatud elektrienergiat, optimeerides patareide laadimise ja tühjaks laadimise tegevust vastavalt elektrivõrgu vajadustele. Lahendus kujutab endast 1-2 MW konteinermodulit veejahutussüsteemiga[15].



Joonis 2.6 Alstom MaxSine eStorage ESS [16]

2.2.2.5 General Electric

General Electric (GE) pakub energia salvestamissüsteemi, mis kujutab endast konteinerit ja võib olla toodetud kahes variandis: maksimaalse mahtuvusega 6 MWh või 9 MWh. GE on võimeline valmistama majanduslikult parimaid ja konkurentsivõimelisi energia salvestamissüsteeme, lähtudes tarbijate nõudmiste aspektidest, mida saadetakse põhjalike uuringute käigus. Energia salvestamiseks eksisteerib palju lahendussüsteeme. Kõige parema lahenduse väljaselgitamiseks vaatleb GE iga projekti individuaalselt [17].



Joonis 2.7 Durathon BESS [17]

2.2.2.6 Muud ESS tootjad

Kuna salvestamissüsteemid on piisavalt uus ja aktuaalne toodang, siis tegelevad paljud ettevõtted nende süsteemide väljatöötamise ja arendamisega. Energia salvestamissüsteeme on võimalik näha AEG [18], STB [19], NEC [20], BYD [21], Liotech [22], Autrasys [23] jt firmade toodangu portfoolios.

2.3 Energiasalvestiga süsteemide võimalused

Põhinedes esimeses ja teises peatükis uuritud materjalil, on leitud palju eeliseid, mis tulevad energiasalvestiga süsteemi kasutamisest. Palju neist toovad kasu nii tarbijatele kui ka jaotusvõrgule [5] [24] [25] [26]. Allpool on toodud 6 omadust, mis toovad kasu kõigepealt lõpptarbijale:

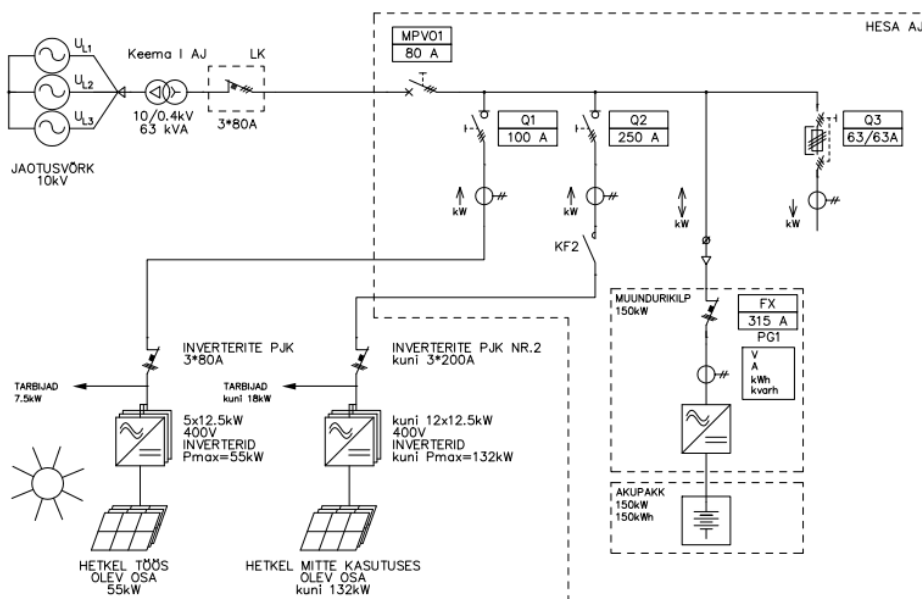
- **Koormuse nihutamine** võimaldab edasi lükata tarbimist ebasoodsamalt ajalt soodsamale ajale. Avaldab positiivset mõju kogu elektrisüsteemile, võimaldab kasutada taastuenergia allikaid tippkoormuse ajal ja tagab kokkuhoiu ka tarbijale.
- **Tipu lõikamine** võimaldab lühiajaliselt vähendada jaotusvõrgu koormust, tippkoormuse ajaks. Üldine elektritarbimine muutub seejuures vähe aga see ei pruugi olla ka eesmärgiks.
- **Taastuenergia kõikumiste silumine** – vähendab ootamatu ja järsku taastuenergia allikate väljuva võimsuse muutmise mõju jaotusvõrgule.
- **Võimaldab hajutatud tootmist** – väikse võimsusega hajutatud toiteallikad (päikesepaneelid, tuulegeneraatorid) võivad olla ühendatud võrguga läbi energiasalvestiga süsteemi, mis tagab selle sujuva töötamise.
- **Katkematu toiteallikas** – võimalus saada elektrienergiat juhul, kui üldises jaotusvõrgus on tekkinud katkestused.
- **Reaktiivenergia kompenseerimine** – tõstab elektrienergia kvaliteeti reaktiivenergia võrgust tarbimisel või võrku genereerimisel.

3 Arendatava energiasalvestiga alajama üldeesmärk, konstruktsioon ja seadmed

Antud peatükis kirjeldatakse arendatava alajaama eesmärki, selle karakteristikuid ja põhiliste komponentide kasutamise otstarvet. Saadud info põhjal on kergem aru saada sellest, kuidas töötab süsteem üldiselt. Arendatava alajaama hoone projekt on toodud käesoleva töö lisan 1.

3.1 AJ-a üldeesmärk

Energiasalvestiga alajaam oli projekteeritud olemasoleva päikeseenergia elektriijaama ehk mikrovõrku integreerimiseks. Antud süsteem ühendatakse elektriijaama madalpinge poolele jaotusvõrgu ja päikesepaneelide konverterite vahele. Elektriijaama ühejooneline ühenduste jõuskeem on toodud joonisel 3.1.



Joonis 3.1 Päikeseenergia elektriijaama ühejooneline skeem

Alajaama eesmärk on tõsta päikesepaneelide abil toodetava elektrienergia tootmise tootlikust. Arendatava süsteemiga saab edastada elektrienergiat jaotusvõrku ilma piirvõimsuse ületamist, (55kW, 80A) salvestades üleliigset energiat energiasalvestisse. Salvestatud energia vabastatakse jaotusvõrku, kui elektriijaama energiatootmine langeb või on võimatu ilmatingimuste pärast.

3.2 Alajaama konstruktsiooni kirjeldus

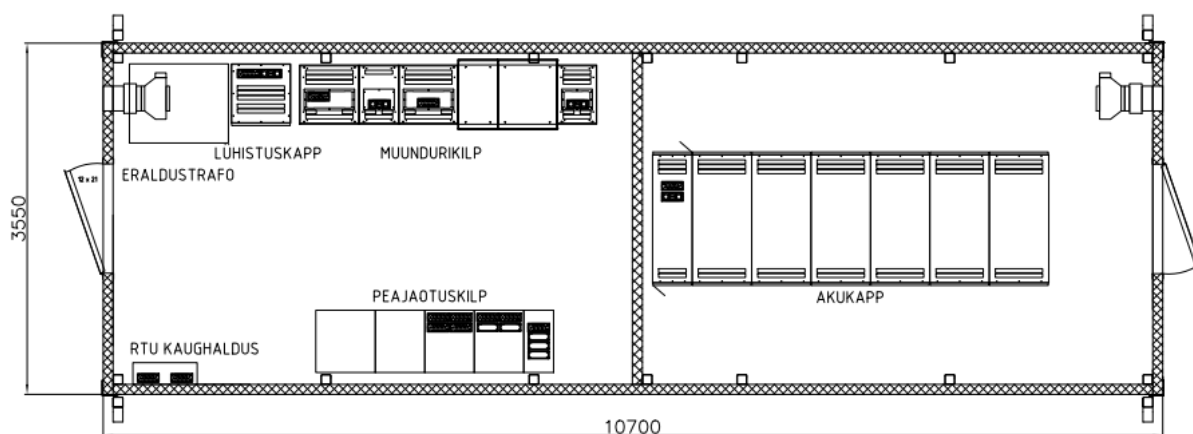
Alajaama hoone on projekteeritud eeldusega, et seda saab tõsta koos sinna installeeritud seadmetega. Hoone karkass koosneb teraspostidele toetatud kandefermidest. Teraskonstruktsioonid valmistatakse, krunditakse ja värvitakse tehases. Kandekarkassile kinnitatakse kivivillaga täidetud terasprofiilpaneelid, nn. "sándwich" tüüp. Paneelidevahelised vuugid on tihendatud ning kaetud metallprofiilidega.

Hoonel on viilkatus. Katus on ehitatud kandvale tsingitud profiilplekile. Katuse soojusisolatsiooniks on kivivill. Katuse kate on korrosiooni- ja ilmastikukindel ning talub ultraviolettkiirgust. Hoonel on räästarennid ja vihmavee äravoolutorud. Hoone katus on lahtimonteeritav ning mahatõstetav, mis vajadusel võimaldab seadmete vahetamist katuse kaudu.

Jaotlahoone välisüks on valmistatud kuumtsingitud terasplekist ning soojustatud kivivillaga. Välisuste hinged, lingid, lukud ja ukseulgurid on valmistatud korrosioonikindlast tsingitud terasest. Vajaduse korral on võimalik ustel kasutada tuuleriivi.

Paigaldamiseks on alajaama korpus varustatud tõsteasadega. Alajaama vundament valatakse monoliitbetoonist või monteeritakse vundamendi plokkidest paigalduskohas vastavalt alajaama hooneprojektile.

Alajaam tarnitakse täiskomplektselt ja sisaldab järgmisi põhilisi komponente: trafokapp, lühistuskapp, muundurikilp, RTU ja kaughalduse kapp, peajaotuskilp ja akukapp. Alajaama seadmete paigutus on toodud joonisel 3.2.



Joonis 3.2 Energiasalvestiga alajaama seadmete paigutuse ülevaade

3.3 Energiasalvesti alajaama nimiandmed ja plokk skeem

Alajaama ja peajaotuskilbi nimiandmed on toodud tabelites 3.1 ja 3.2.

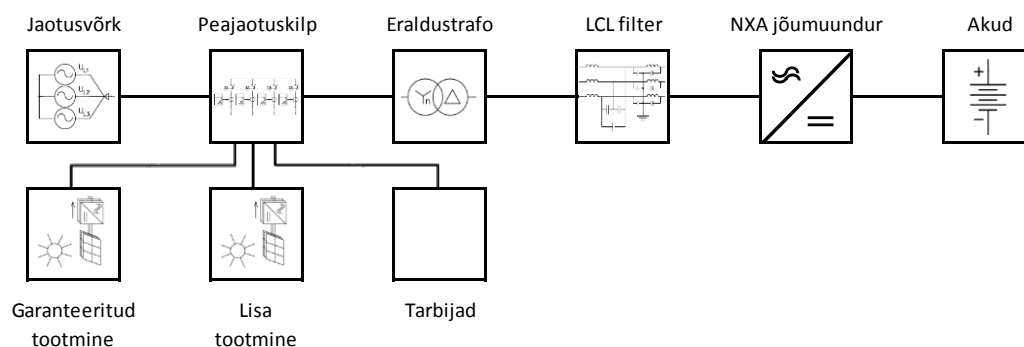
Tabel 3.1 Energiasalvesti alajaama nimiandmed

Energiasalvesti alajaama nimiandmed			
Nimivõimsus, kW	150 kW	Akude arv	216 tk
Nimimahtuvus, kWh	150 kWh	Aku elemendi pingeline	2,8...3,0...3,7 V
Nimivool DC	232 A	Akupaki pingevahemik	605...648... 797 V
Max. Vool DC	250 A	Akuelemendi nimimahtuvus	300 Ah
Max. Vool AC	217 A	Tsüklite arv	5000 (DOD=80%)

Tabel 3.2 Peajaotuskilbi nimiandmed

Peajaotuskilbi nimiandmed	
Nimipinge	3x230/400 V, 50 Hz
Latistuse nimivool	300 A
Lühisvoolutaluvus	10 kA
MPV01 fiider (jaotusvõrk)	55 kW, 80 A
Q01 fiider (garanteeritud tootmine)	55 kW, 80 A
Q02 fiider (lisa tootmine)	130...150 kW, 190...220 A
FX fiider (energiasalvesti)	150 kW/150 kWh
Q02 fiider (tarbijad)	63 A

Alajaama komponentide omavaheliste sidumiste selgitamiseks oli tehtud lihtsustatud süsteemi plokk skeem, mis on toodud joonisel 3.3.

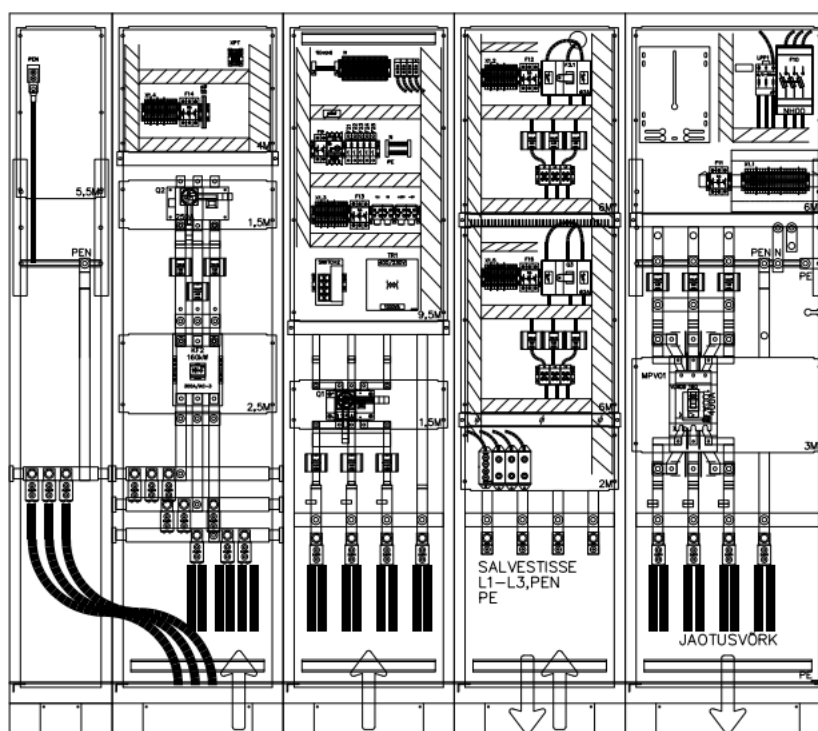


Joonis 3.3 Lihtsustatud alajaama plokk skeem

3.4 Peajaotuskilp

Peajaotuskilp on vahelduvvooluseade, mille kaudu ühendatakse kõik sisenevad ja väljuvad jõuahela kaablid alajaamaga. Välisjõuahelate kaablite all mõeldakse jaotusvõrguga ühendamiseks mõeldud liini ja päikesepargi garanteeritud ning lisa tootmise osade ühenduste liine. Soovi korral saab peajaotuskilbi külge ühendada ka väikest tarbijat, näiteks päikeseenergia elektrijaama omatarvet.

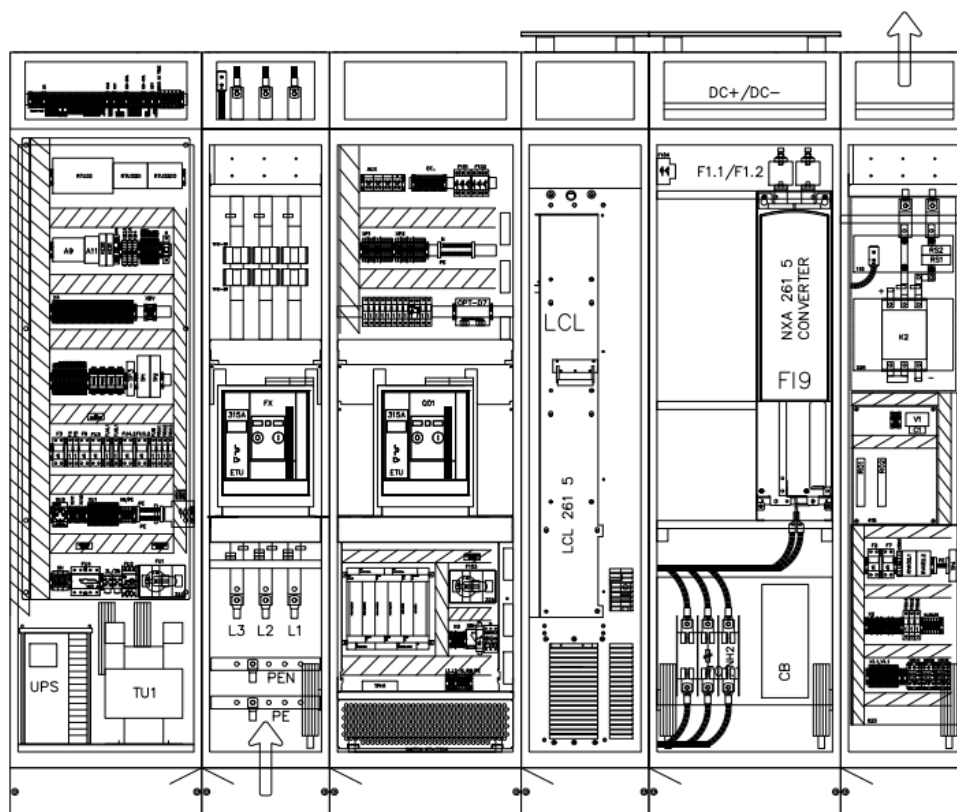
Peajaotuskilbi seadmete hulka kuuluvad alajaama omatarve osa ja välisliinide kaitse-, lahus- ning kommuteerimisseadmed. Iga väljuva ja siseneva liini kilbi lahtrid on varustatud voolutrafodega ja nende külge ühendatud Siemens PAC 3200 multimeetridega, mis võimaldavad fikseerida läbivooksva elektrienergia mahtu ja suunda ning edastada elektrienergia kvaliteedi parameetrid RTU-sse. Kirjeldatud kilbi seadmete paigutusjoonis on toodud joonisel 3.4.



Joonis 3.4 Peajaotuskilbi seadmete paigutuse ülevaade

3.5 Muundurikilp

Muundurikilbi ülesandeks on ühendada peajaotuskilp akukapiga ja konverteerida akust väljuva alalisvoolu võimsust peajaotuskilbi siseneva vahelduvvoolu võimsuseks või vastupidi. Selle eesmärgiga sai kilpi paigaldatud üks alajaama tähtsamatest seadmetest - kahesuunaline NXA AC/DC muundur LCL filtriga. Peale konverteri paiknevad muundurikilbis automaatkaitseülilidid (peajaotuskilbi ja eraldustrafo ühendamiseks ning NXA konverteri pingestamiseks), DC kontaktor (akukapi ühendamise kommuteerimiseks), omatarbe trafo, UPS, RTU, tarkarvesti SATEC, HMI ning juhtahelad. Muundurikilbi seadmete paigutusjoonis on esitatud joonisel 3.5.



Joonis 3.5 Muundurikilbi seadmete paigutuse ülevaade

3.5.1 NXA AC/DC konverter

Arendatavas alajaamas kasutatav kahesuunaline NXA AC/DC muundur toodetud tuntud inverterite, konverterite ja mootori ajamite tootja Vacon poolt. Antud õhkjahutusega mudel vastab premium klassi muunduri nõuetele ja on ette nähtud kasutamiseks kõikides alades, kus

on vaja tagada töökindlus, tootlikus ja stabiilsus. Vacon NXA IP00 moodulid on arendatud just jaotuskilpide või eraldi seisvate korpuste integreerimiseks ja tänu enda kompaktsusele lihtsustavad seadme paigaldamist. Rohkem infot seadme kohta võib leida tootja veebilehelt [27]. Kasutatava konverteri tehnilised andmed on toodud tabelis 3.3.

Tabel 3.3 Kahesuunaline AC/DC jõumuunduri tehnilised andmed

Kahesuunaline AC/DC jõumuunduri tehnilised andmed	
Jõumuunduri tootja	Vacon
Maksimaalne alalispinge muunduris	797 V
Muunduri alalisvoolu nimiväärtus	308 V
Muunduri vahelduvvoolu nimiväärtus	261 A
Muunduri nimivõimsus (DC)	176 kW
EMC standarditele vastavus	EN 61800-3

3.5.2 LCL Filter

Muunduri tootja Vacon LCL poolt valmistatud filter vähendab muunduriga genereeritud harmoonikute mõju AC võrgule. Jõumuunduri tellimisel võib valida erinevate filtrite vahel sõltuvalt seadme pingest ja voolust. Täpsemat infot filtrite kohta tootja ei avalda.

3.5.3 RTU

Kogu süsteemi ning iga komponendi eraldi juhtimise võtmeelemendiks on *RTU*. *RTU* on mikroprotsessori juhtimisega elektrooniline seade, mis kogub analoogseid ja digitaalseid parameetreid erinevatest juhitavatest seadmetest ning võimaldab juhtimisprotsessi automatiseerimist.

Multimeetritest, võrguanalüsaatorist, kommuteerimisseadmetest, muundurist ja *BMS*-st saadud andmeid töödeldakse vastavalt etteantud loogikale (programmidele) ning tulemuste alusel juhitakse süsteemi ilma inimese osaluseta.

3.5.4 SATEC ezPAC SA330

SATEC ezPAC™ SA300 seeria seadmed kujutavad endast kaasaegseid võrguanalüsaatoreid ja juhtimisseadmed ühes korpuses, millel pole tööstuse sektoris analoogi. SATEC ezPAC SA330 koosneb mitmest IED (*Intelligent Electronic Devices*) elemendist, mis on ühendatud ühte

võimsasse seadmesse, mis võimaldab kombineerida laiendatud kontrolleri, automatiseerimist, vigade salvestust, automaatanalüüsi ja energia kvaliteedi aruande koostamise funktsioone. Samuti saab seadme abil teostada kommerts mõõtmist, seadmete reservkaitset ja juhtimist ning tagada täislahendust alajaama või tööstuse automatiseerimiseks. Rohkem infot seadme kohta on saadaval tootja veebilehelt [28].

3.6 Trafokapid

3.6.1 Eraldustrafo

Eraldustrafo ühendatakse peajaotuskilbi ja jõumuunduri LCL filtri vahele ja kasutatakse meie süsteemis kahel põhjusel:

- Vähendab jõumuunduriga genereeritud harmoonikute mõju AC võrgule
- Jõumuunduri kaitsmiseks jaotusvõrgu poolt tekitatud ülepingete eest

Täht-kolmnurk ühendusega eraldustrafod omavad eripära efektiivselt summutada kolmandat järku harmoonikuid. Samuti ei võimalda selline trafo edastada lühiajalist ülepinge impulsi primaarahelast sekundaarahelasse ja tänu sellele võib mingil määral kaitsta seadmeid ülepingete eest.

3.6.2 Lühistuskapp

Lühistuskapis asuvad jõuklemmid eraldustrafo võrku ühendamiseks ja käivitustakisti trafo töösse panemiseks. Kuna trafo käivitusvool on nimivoolust mitu korda suurem, mis toob negatiivsed mõjud süsteemi talitlusel, siis tuleb käivitusvoolu piirata. Antud juhul olid kasutatud käivitustakistid, mida lülitatakse trafoga jadamisi võrku käivitamise ajaks ja piiratakse läbijooksva voolu suurust. Seejärel lühistatakse takistid jõukontaktori abil ja trafo jääb tööle püsirežiimis ilma takistiteta.

3.7 Kaughalduse seadmed

Kaughalduse seadmete kilp võimaldab saada, töödelda ja salvestada infot alajaamades toimuvate tegevuste kohta TCP/IP andmeprotokolli kaudu. Kilpi paigaldatakse andmete

vahe-server, 3G modem ja katkematu toiteallikas. Antud seadmed aitavad visualiseerida jooksvaid alajaama parameetreid ning koostada koondaruanded.

3.8 Akude kapp

Energiasalvesti põhielemendiks akuelemendid. Nende sisse laetakse energiat edasiseks kasutamiseks. Akude elemendid asuvad akukapis koos *BMS* süsteemiga, mille abil juhitakse laadimis- ja tühjendamistegevusi ja kaitstakse akusid lubamatute töörežiimide eest.

3.8.1 Akud

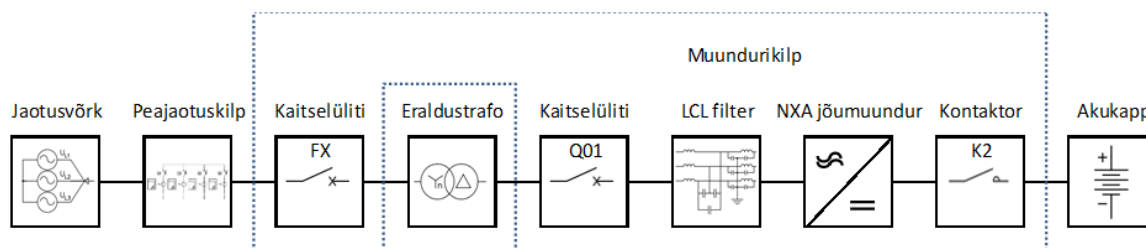
Energia salvestamiseks kasutati Winston Energy Group Ltd poolt toodetud akusid. Akukapis sai paigutatud 216 tk akuelementi, iga elemendi mahtuvus on 300Ah. Akud olid grupeeritud kahe elemendi kaupa ja monteeritud väljatõmmatava kasseti peale. Selline konstruktsioon tagab kiire liigipääsu elementidele juhul, kui on vaja teostada hooldustöid, kontrollmõõte või akude vahetamist. Akude elementide tehnilised andmed ja laadimis- ning tühjendamiskarakteristikud on saadavad tootja veebilehelt [29].

3.8.2 BMS

BMS on elektrooniline seade akuelementide parameetrite jälgimiseks ja lubamatute töörežiimide eest kaitsmiseks. *BMS*i põhiülesandeks on koguda jooksvat infot akude seisukohta ja piirata saadud info põhjal laadimis- ja tühjendamisvoolu nii, et akude parameetrid jääksid normaaltalitluse piirisse. Rohkem infot kasutatud Orion *BMS* süsteemi kohta saab lugeda tootja veebilehelt [30].

4 *ESS* peamised juhtimistegevuste algoritmid

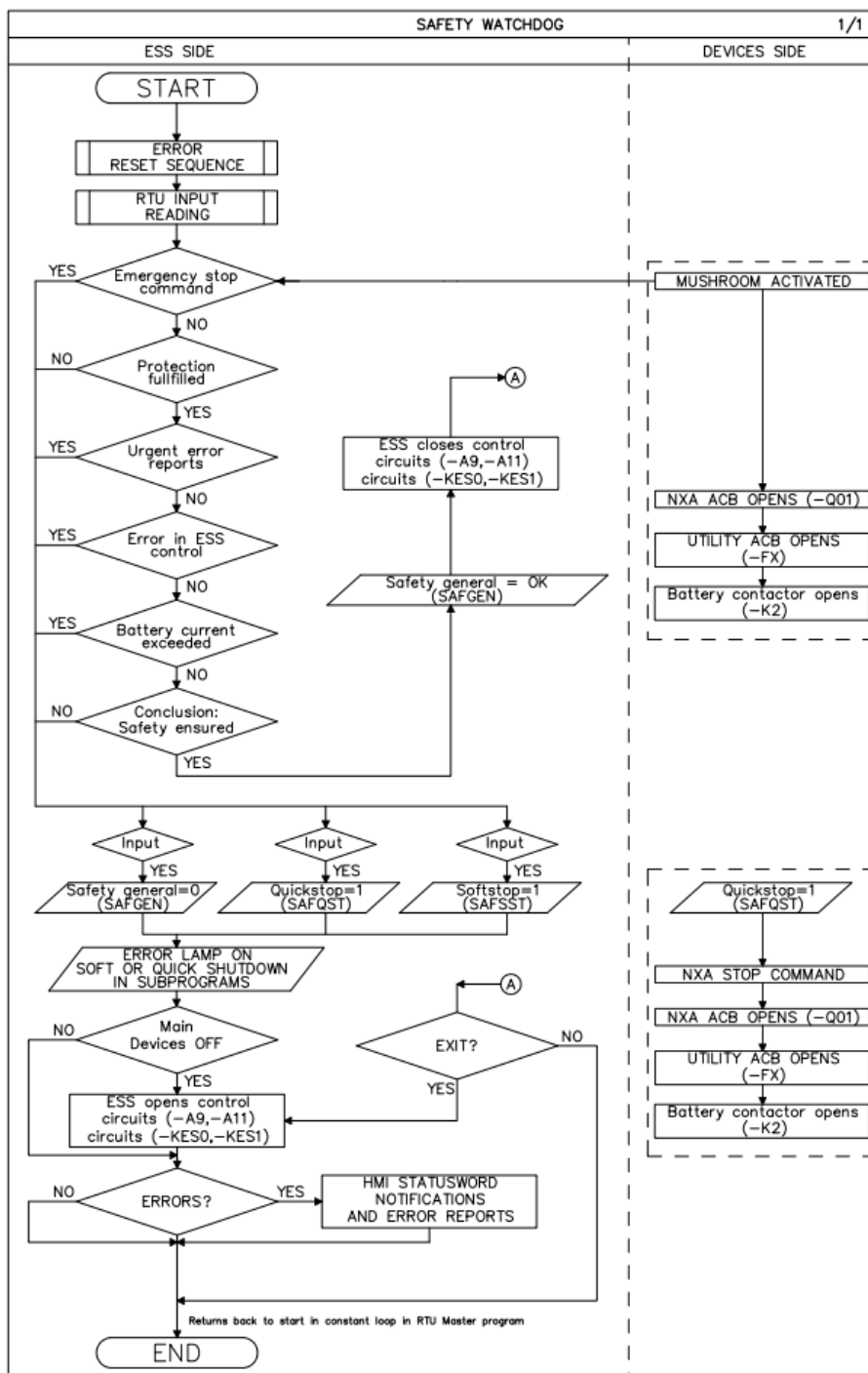
Antud peatükis kirjeldatakse põhilisi alajaama juhtimistegevuste algoritme *RTU* programmi plokk skeemi baasil. Töö raames loetakse põhilisteks juhtimistegevusteks alajaama ohutu režiimi jälgimis-, käivitamis-, seiskamis-, laadimis- ning tühjendamistegevused. Juhtimistegevuste läbivaatamise mugavuseks on alajaama jõuosa lihtsustatud plokk skeem toodud joonisel 4.1.



Joonis 4.1 Alajaama jõuosa lihtsustatud plokk skeem

4.1 Ohutu töö režiimi jälgimistegevuse algoritm

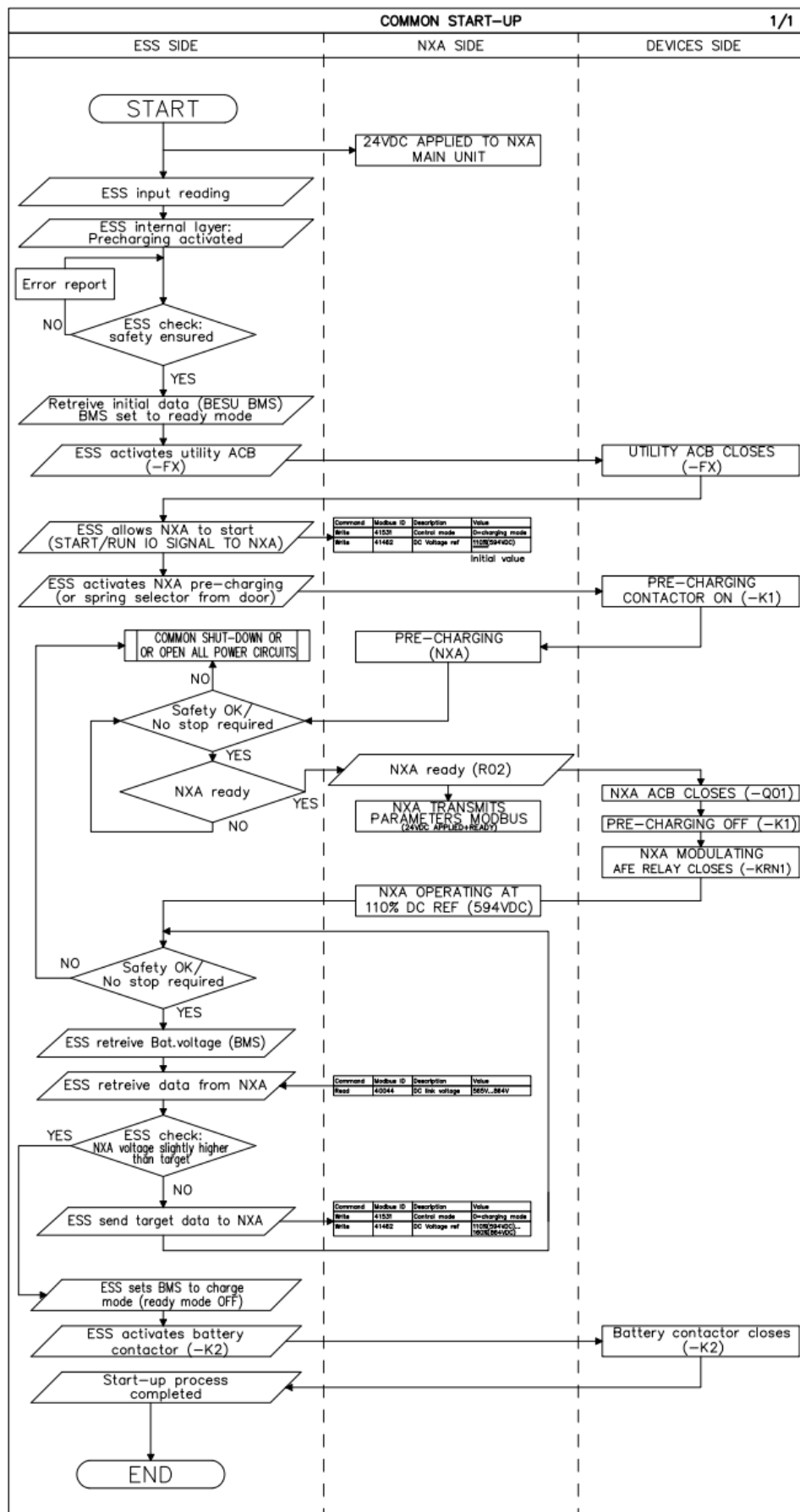
Kogu tööaja jooksul käivitab *RTU* programmi, mis jälgib süsteemi tööohutust. Antud programm pidevalt kontrollib *ESS* põhilisi parameetreid, mis on kogutud süsteemi kõikidest põhilistest elementidest. Nende andmete alusel määratletakse, kas süsteem võib jätkata opereerida normaalses režiimis või on vaja teostada selle peatust, aga mõnedel juhtudel teha isegi hädapeatust. Ohutu töörežiimi jälgimistegevuse algoritmi plokk skeem on toodud joonisel 4.2.



Joonis 4.2 Ohutu töörežiimi jälgimistegevuse plokk skeem

4.2 Käivitustegevuse algoritm

Käivitustegevus võimaldab viia süsteemi väljalülitatud seisukorrast üle akuelementide laadimis- või tühendamisrežiimile, sõltuvalt *RTU* ülesantud parameetritest. Detailne süsteemi käivitusalgoritm on toodud joonisel 4.3.



Joonis 4.3 Käivitustegevuse plokk skeem

- Esiteks kontrollib *RTU* *NXA* muunduri omatarbe alalisvoolu 24VDC olemasolu ja süsteemile ette antud töörežiimi: laadimise, tühjendamise või valmisolekute režiimi. Pärast seda annab *RTU* loasignaali konverteri silukondensaatorite eel-laadimiseks, kuid laadimine pole veel alanud. Eel-laadimiseks loasignaali saamisel algatatakse ülal kirjeldatud turvakontrolli toimingud:
 - Kui süsteemis on tuvastatud rike, siis tegevus peatatakse kuni rikke kõrvaldamiseni. Süsteemi vea põhjal koostatakse raport.
 - Kui turvalisuse kontroll on edukalt läbitud, pingestatakse turvareleed ja läbi aegrelee lülitakse sisse kõik kontrollahelate põhilised sõlmed.
- Seejärel paneb *RTU* *BMS*i valmisoleku režiimi, loeb andmeid ja saadab signaali automaatkaitselüliti *FX* sulgemiseks. See toiming paneb eraldustrafo peajaotuskilbi kaudu välisvõrgust töösse.
- Tagasiside alusel kontrollib *RTU* abikontaktide abil automaatkaitselüliti *FX* asendit. Kui lüliti on suletud, siis aktiveerib *RTU* silukondensaatorite eellaadimisprotsessi. Samuti võib seda teha käsitsi ukse peal asuva *S2* ümberlüliti abil. Ainult pärast kondensaatorite eel-laadimistoimingu lõpetamist võib *NXA* muundur alustada moduleerimist ja sätestada soovivat pinget alalisvoolu poole.
- Kondensaatorite eellaadimist teostatakse eraldiseisva alaldi abil *RTU*-ga juhitava *K1* kontaktori kaudu. Kondensaatorite eellaadimise ajal kontrollitakse pidevalt süsteemi töörežiimi ohutust ja *NXA* muunduri valmisolekut:
 - Vea esinemise juhul toimib *RTU* vastavalt *safegen* algoritmile ja peatab süsteemi.
 - Kui vigu ei esine ja *NXA* kontakt annab valmisoleku signaali, siis lühistatakse automaatkaitselüliti *Q01*, mis ühendab *NXA* AC/DC muunduri eraldustrafo kaudu vahelduvvoolu võrguga. Samaaegselt lõpetatakse sellega kondensaatorite eellaadimise algoritm *K1* kontaktorii väljalülitamisega.

NXA muundur alustab moduleerimist, püüdes saavutada määratud pinget DC lattidel.

Käivitamisel valitakse vaikumisi 110% tööpinget lähtudes järgmisest valemist:

$$V_{dc} = V_{ac} * 1.35 * DC_{ref}(\%) \quad (4.1)$$

Kus V_{dc} - DC lattide pinge,
 V_{ac} – võrgu nominaalpinge,
 1,35 – muunduri konstant,
 $DC_{ref}(\%)$ – muutuja DC lattide pinge reguleerimiseks.

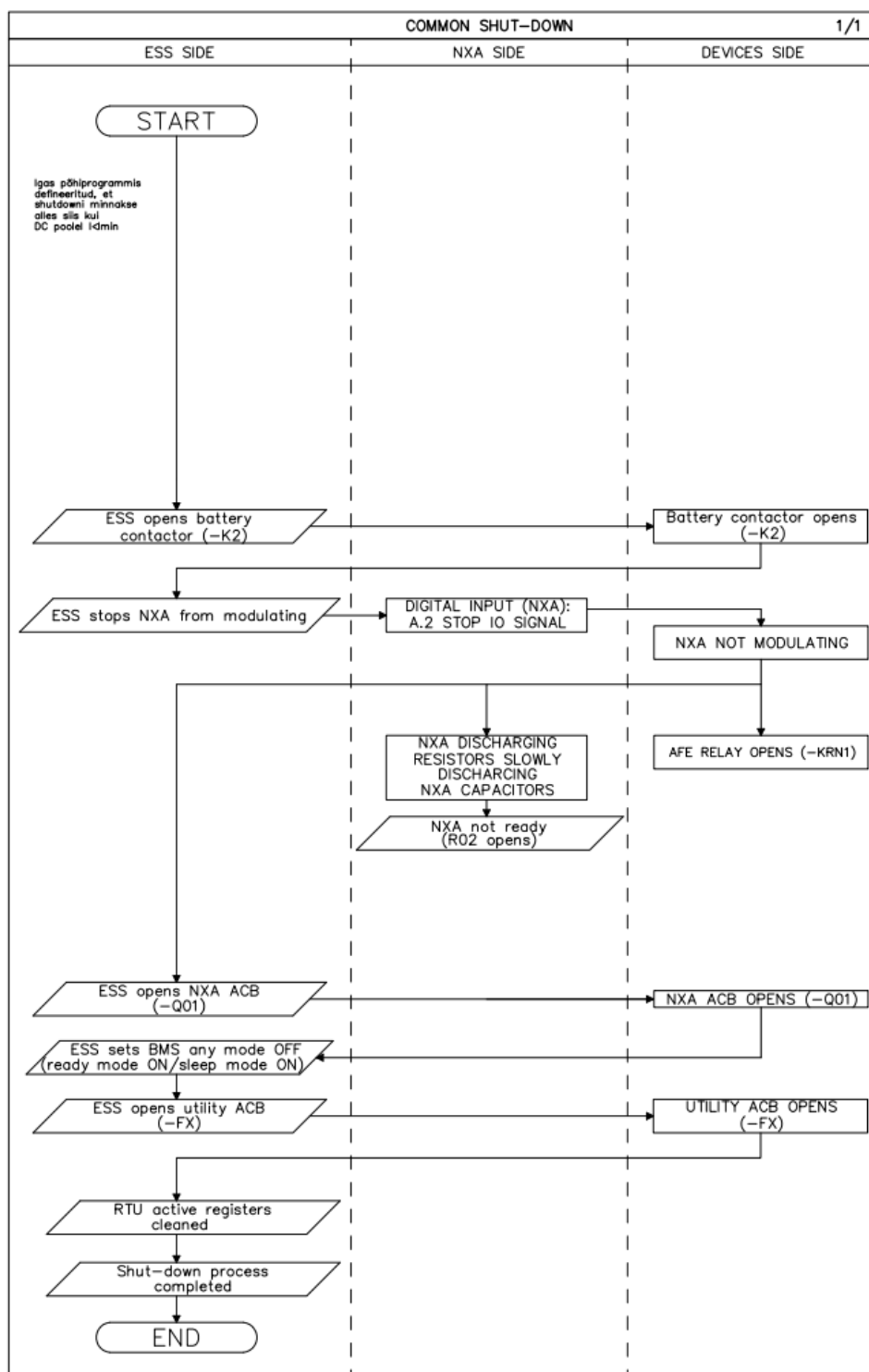
- Pärast järjekordset tööohutuse kontrollimist saadab *RTU* päringu *BMS*-le patareide jooksva pinge tasemest ning *NXA* muunduri pingest DC lattidel. Kui *BMS*-lt saadud pinge on *NXA* muunduri pingest suurem, siis suurendatakse *NXA* väljundpinge väärtust astmeliselt seni, kuni need pinged on tasandatud.
- Kui pinged on tasandatud, siis antakse *BMS*-le signaal ooterežiimist laadimisrežiimile ümberlülitamiseks. Kui *ESS* ei ole ooterežiimile pandud, siis sulgeb kontaktor *K2*, mille abil ühendatakse akukappi muunduri kilbiga ning käivitusprotsess lõpetatakse.

4.3 Seiskamistegevuse algoritm

Peamiselt kasutatakse seda tegevust süsteemi sujuvaks seiskamiseks juhul, kui akupatareide laadimis- või tühjendamisvoolu väärtus läheb *BMS* süsteemi poolt arvatud piiridest välja. Käesoleva tegevuse algoritmi plokskeem on toodud joonisel 4.4.

Kõigepealt edastab *RTU* HMI juhtimispaneelile süsteemi staatuse „Ending”, seejärel toimub kontaktori *K2* avamine ning akukapp ühendatakse muundurikilbist lahti.

Pärast seda antakse seiskamissignaali *NXA* muundurile, mis viib moduleerimise lõpetamisele. *NXA* muundur tühjendab silukondensaatoreid tühjendamisvoolu piiravate pidurdustakistite abil ja lõpetab oma valmisoleku signaali andmise. Samal ajal antakse signaal automaatkaitselüliti *Q01* avamiseks, mis ühendab *NXA* muunduri eraldustrafolt lahti ja pärast lüliti *Q01* asendi kontrollimist seab *RTU BMS* süsteemi tööseisukorrast valmisoleku seisundisse.

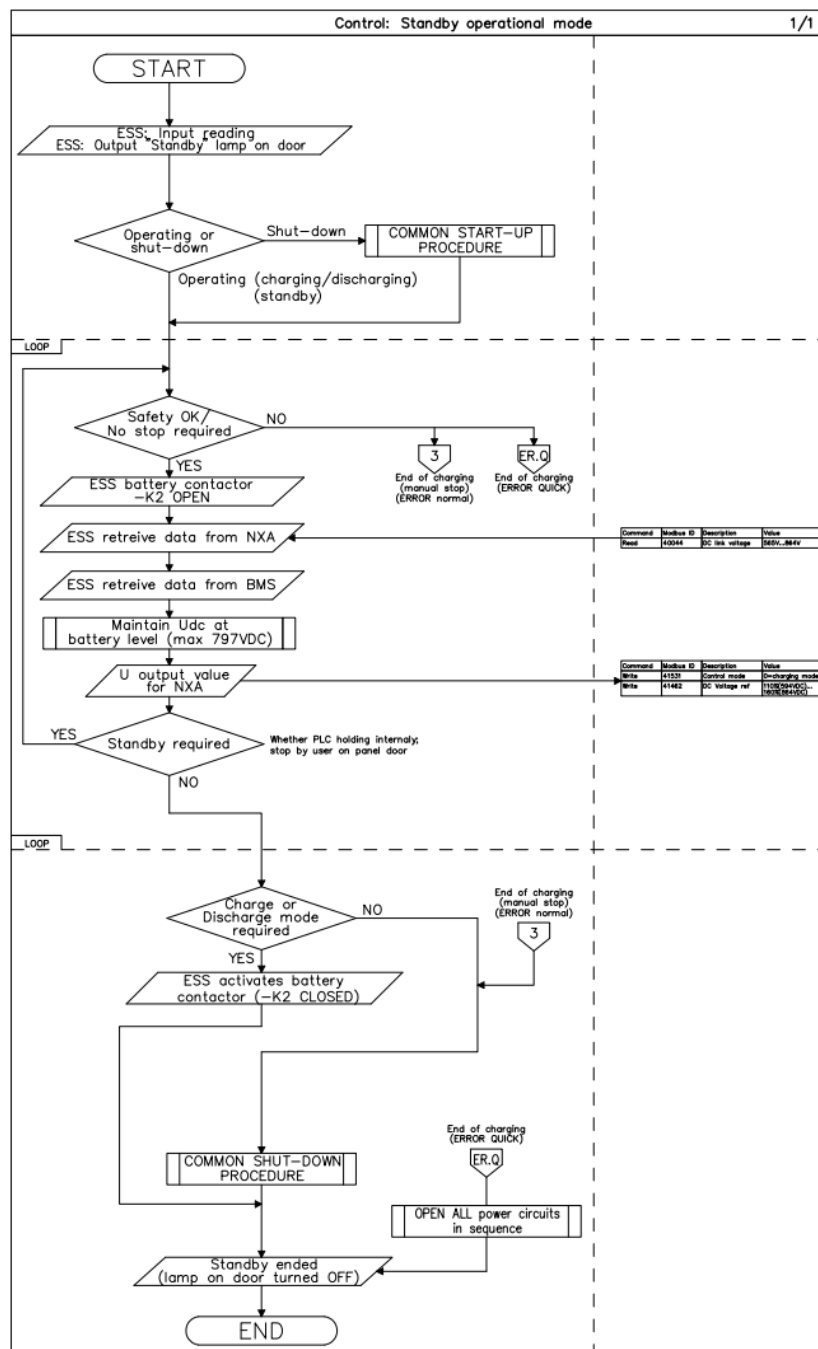


Joonis 4.4 Seiskamistegevuse plokskeem

Viimasena ühendab *RTU* muundurikilbi peajaotuskilbist lahti, avades automaatkaitselüliti FX ja nullib *RTU modbus* registri. Sellega lõpetatakse seiskamistegevus.

4.4 Ooterežiim

Ooterežiimi kasutatakse süsteemi valmisoleku hoidmiseks ja kiirkäivituse võimaluse tagamiseks. Sellisel režiimil on akudega kilp muunduri kilbist lahti ühendatud (kontakt K2 on avatud), kuid NXA muundur hoiab DC lattide väljundpinget akude pingega võrdseks. Vajadusel saab viivitamatult ühendada akukapp muunduri kilbiga K2 kontaktori abil ja panna ESS tööle. Ooterežiim töötab vastavalt joonisel 4.5 toodud plokk skeemile.



Joonis 4.5 Ooterežiimi plokk skeem

RTU loeb süsteemi parameetrid ja lülitab muunduri kilbi uksele vastavat indikatsiooni lambi sisse. Kui NXA-konverter on väljalülitatud režiimis, siis käivitatakse silukondensaatorite eellaadimise toiming, mille algoritm on kirjeldatud süsteemi käivitustegevuse algoritmis.

Seejärel käivitab süsteem ohutuse kontrolli jälgimise algoritmi ja positiivse tulemuse juhul annab signaali kontaktori K2 avamiseks. *BMS* süsteemilt ja NXA konverterilt saadud andmete alusel reguleerib *RTU* järk-järgult NXA muunduri väljundpinget akupatareide pingetasemeni. Kuni vajalik NXA muunduri väljundpinge pole saavutatud, blokeerib *RTU* laadimis- või tühjendamistegevustele ülemineku võimaluse. See protsess kestab kogu ooterežiimi tegevuste jooksul.

Ooterežiim lõpetatakse siis, kui tuleb süsteemi laadimise, tühjendamise või peatumise käsk. Juhul kui antakse akude laadimise/tühjendamise signaal, siis kontaktor K2 suletakse ja käivitatakse valitud tegevuse vastav algoritm. Süsteemi peatamise juhul käivitatakse ülalkirjeldatud seiskamisprotseduur.

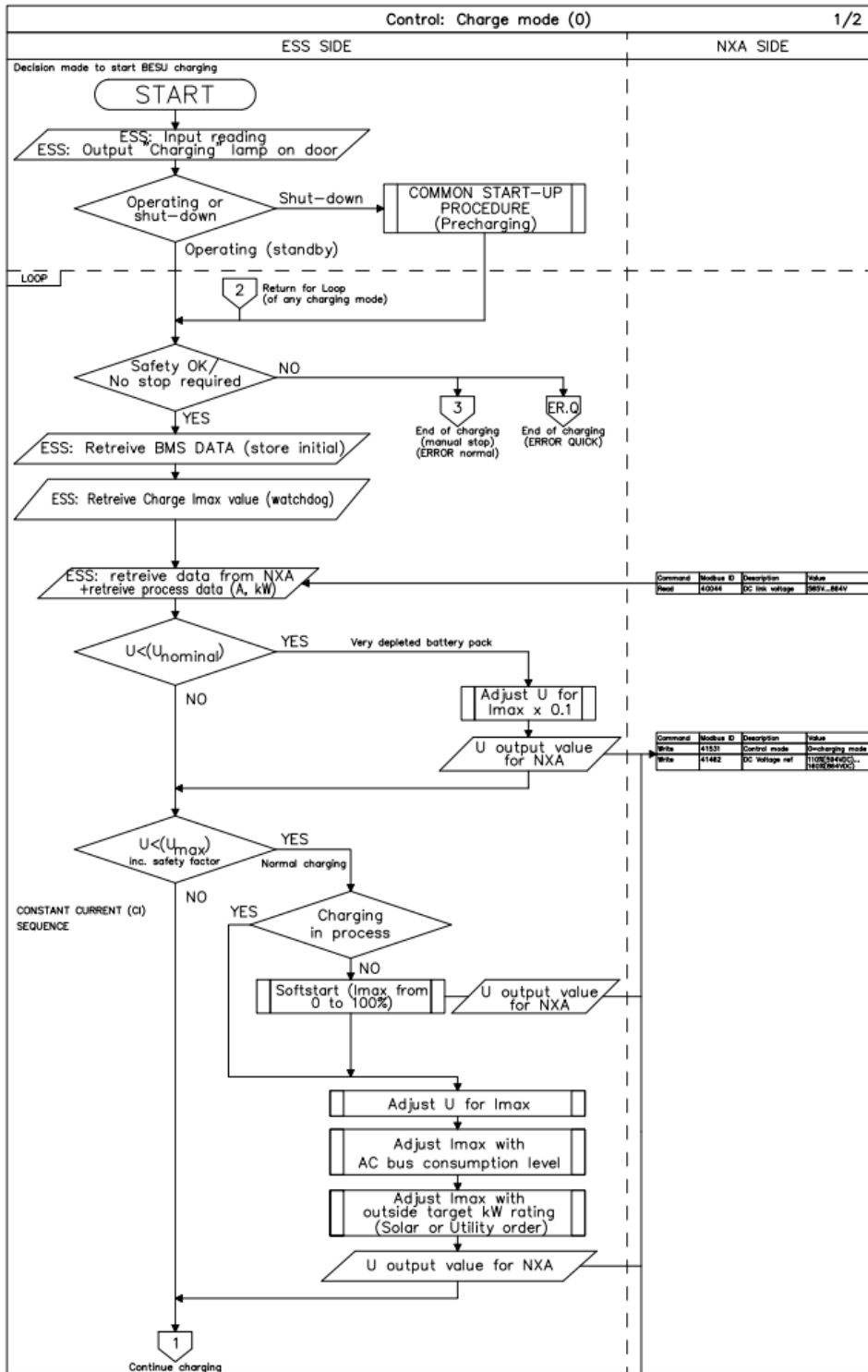
Viimasena kustub muunduri kilbi uksele ooterežiimi „standby“ indikatsiooni lamp, mis näitab režiimi lõpetamist.

4.5 Laadimistegevuste algoritmid

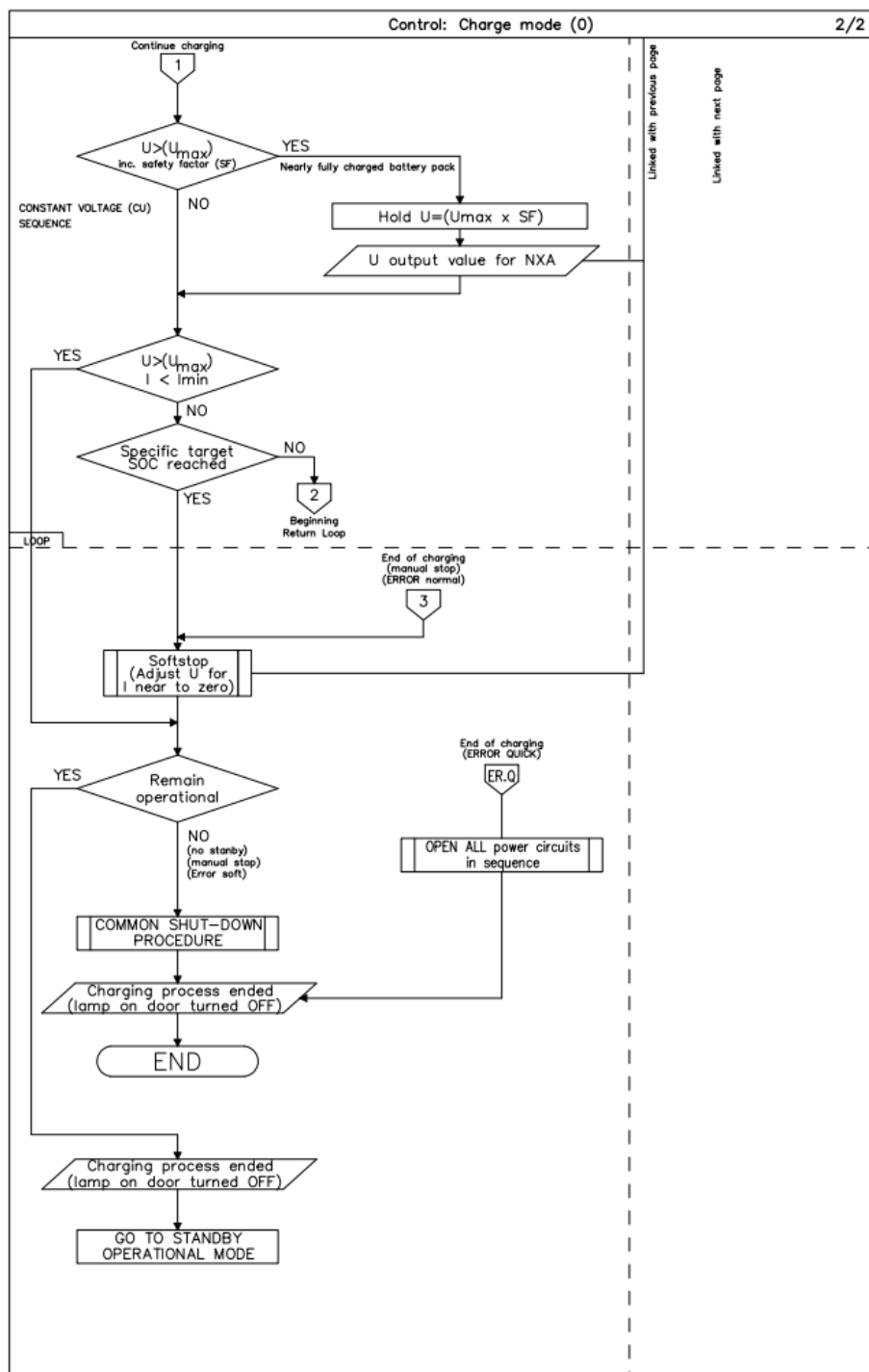
Laadimistegevusi kasutatakse võrgust saadud energia salvestamiseks akuelementidesse. Sõltuvalt *BMS* süsteemist saadud aku elementide parameetritest reguleerib *RTU* laadimisvoolu selliselt, et tagada optimaalse vooluga laadimise. Detailne plokkskeem laadimistegevuse kohta on toodud joonisel 4.6.

Laadimistegevus on jaotatud 3 põhiliseks plokiks:

- sissejuhatav toiming
- laadimise toiming
- laadimise lõpetamise toiming



Joonis 4.6 Laadimistegevuse plokkskeem



Joonis 4.6 järg Laadimistegevuse plokk skeem

4.5.1 Sissejuhatav toiming

Sissejuhatava toiminguga ajal toimub süsteemi põhiliste elementide andmete lugemine nende edasitöötlemiseks ja akupatareide laadimistoiminguga juhtimiseks.

- Kõigepealt kontrollitakse süsteemis laadimistegevuse alustamise käsu olemasolu, siis kontrollitakse muunduri jooksvaid töörežiime ja etteantud laadimise lõplikuid andmeid.
- Seejärel käivitab süsteem varem kirjeldatud ohutu töörežiimi jälgimise algoritmi ja kui ühtegi riket pole tuvastatud, siis lülitab muunduri kilbi ukstel laadimistegevuse indikatsiooni lambi sisse ning pannakse süsteem laadimistoimingule.
- Juhul kui laadimistegevuse käsu andmise ajal ei ole süsteem ooterežiimis ja NXA muundur ei tööta, siis käivitatakse silukondensaatorite eel-laadimistoiming, mis on kirjeldatud käivitustegevuse algoritmis.

4.5.2 Laadimise toiming

Alguseks sätestab *RTU* NXA muunduri laadimisrežiimile, kontrollib süsteemi töö ohutust ja loeb *BMS*-süsteemi algandmeid. Maksimaalse laadimise voolu jälgimise alamprogrammi abil arvestab *RTU* sõltuvalt määratud ülesandest laadimise maksimaalse voolu suurust ja laadimise lõpetamise eeldatavat aega.

Laadimise toimingu võib omakorda jagada kolmeks alamprogrammiks:

- sujuv laadimine
- normaalne laadimine
- laadimine konstantse pingega

Laadimistoimingu alamprogrammi valiku põhiliseks parameetrik on laaditavate akupatareide jooksev pinge tase.

Kui *BMS* süsteemilt saadud pinge väärtus on madalam sujuva laadimise alamprogrammi määratud parameetrist, siis hakkab töötama sujuva laadimise alamprogramm.

Kui *BMS* süsteemilt saadud pinge on kõrgem aeglaseks laadimiseks määratud parameetrist ja samal ajal ei ole laadimise pinge maksimaalsele väärtusele lähenenud, siis hakkab töötama normaalse laadimise alamprogramm.

Juhul, kui *BMS*-süsteemilt saadud pinge ületab maksimaalset laadimispinget, aga kõik laadimise lõpetamiseks esitatud nõuded pole veel täidetud, siis lülitatakse sisse konstantse pingega laadimise alamprogramm.

4.5.2.1 Sujuv laadimise alamprogramm

Nagu eelmistes programmides loetakse esimesena süsteemi peamised parameetrid ja arvutatakse välja nõutud laadimispinge, mille juures oleks laadimisvool 10 % nimivoolust.

Saadud väärtuse põhjal arvutab *RTU* välja nõutud pinge juurdekasvu juba saavutatud laadimispingele ning korrigeerib $DC_{ref}\%$ muutujat püsiva laadimise voolu hoidmiseks. Kui jooksev akude pinge ületab sujuva laadimise määratud pinget, siis läheb süsteem sujuva laadimisalamprogrammi tsüklilist normaallaadimise alamprogrammile üle.

4.5.2.2 Normaallaadimise alamprogramm

Normaallaadimine on sujuva laadimisega sarnane alamprogramm, aga laadimisvool ei ole 10% nimivooluga piiratud ja võrdub maksimaalsele laadimisvoolule, mis on süsteemi poolt välja arvutatud või HMI paneeli kaudu käsitsi ette antud. *RTU* reguleerib nõutud laadimispinget $DC_{ref}\%$ muutuja abil nii, et laadimise vool oleks maksimaalse laadimisvooluga võrdne. Kui *BMS*-süsteemilt saadud pinge tõuseb kuni maksimaalse laadimise pingeni, siis läheb süsteem muutumatu pingega laadimise alamprogrammile üle.

4.5.2.3 Muutumatu pingega laadimise alamprogramm

Selles režiimis hoiab laadimise alamprogramm püsivalt laadimise pinget maksimaalse laadimispinge tasemel, arvestades süsteemi ohutu töörežiimi tagavat parandustegurit. Antud režiimis sätestatakse $DC_{ref}\%$ 147,59 %-le, mis omakorda määratleb pinget 797 V. Siinjuures langeb aeglaselt laadimise vool ja tsükliline laadimise protsess kestab seni, kuni laadimise vool ei lähe määratud minimaalsest laadimisvoolust alla.

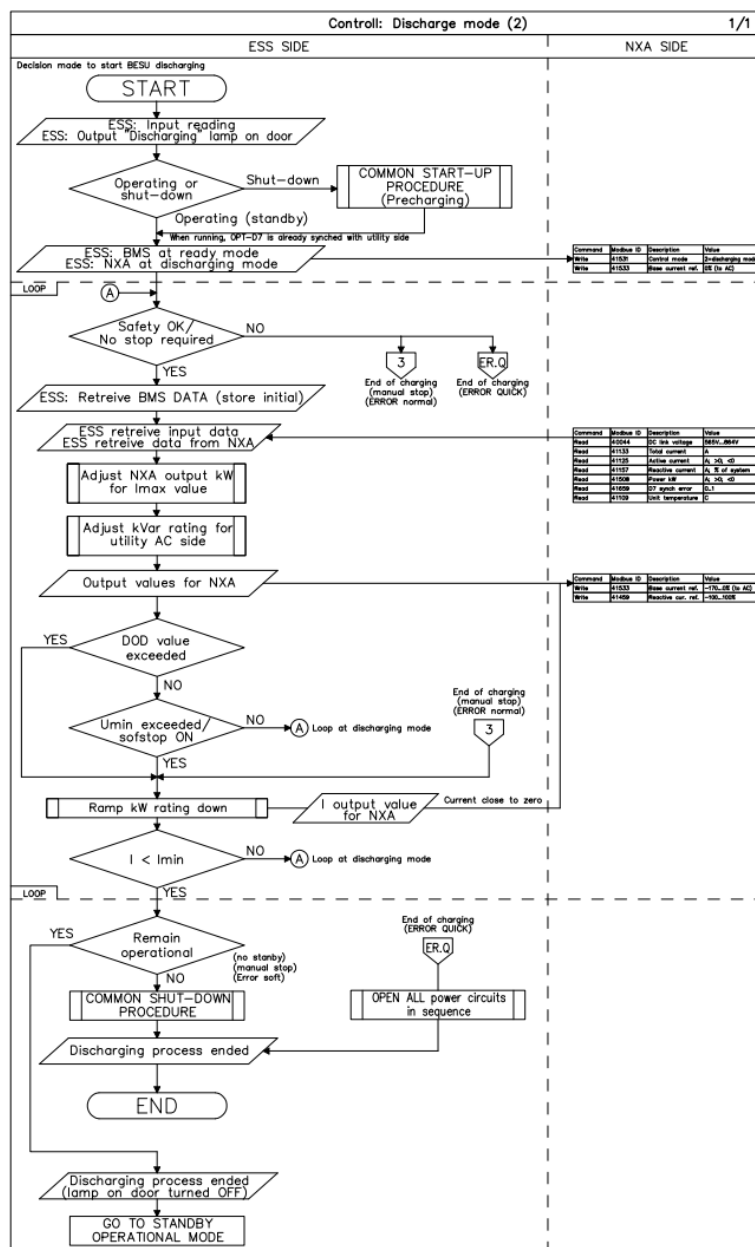
4.5.3 Laadimise lõpetamise toiming

Nagu oli juba ülal mainitud, kestab laadimise protsesini, kuni akude pinge ei ületa maksimaalset lubatud laadimispinget või laadimisvool ei lähe minimaalsest laadimisvoolust alla. Laadimise toimingu lõpetamise kriteeriumiks võib olla ka akupatareide määratud SOC_i piir. Juhul, kui tingimused voolu ja pinge osas pole täidetud, siis peatub toiming määratud SOC piiri ületamisel laadimise. *NXA* muundur reguleerib väljundpinget selliselt, et laadimise vool võrduks nulliga.

Kui vähemalt üks laadimise lõpetamise tingimustest on täidetud, siis sõltuvalt süsteemi parameetritest annab *RTU* käsu süsteemi väljalülitamiseks või jätkab opereerimist ooterežiimil. Laadimistoimingu lõpetamisel lülitakse muundurikilbil asuv indikatsioonilamp välja.

4.6 Tühjendamistegevuse algoritm

Tühjendamistegevusi kasutatakse akudesse salvestatud energia tagasi võrku vabastamiseks. Sõltuvalt *BMS* süsteemist saadud aku elementide parameetritest reguleerib *RTU* tühjendamisvoolu selliselt, et tagada optimaalse vooluga tühjendamise. Süsteemi tühjendamistegevuse algoritm toimub joonisel 4.7 toodud plokk skeemi järgi.



Joonis 4.7 Tühjendamistegevuse plokk skeem

Tühjendamistegevuse algoritmi käivitamisel, nagu ka kõikides eelmistes algoritmides, toimub parameetrite lugemine ja süsteemi ohutu töörežiimi kontroll. Kui need sammud on läbitud, siis lülitab *RTU* indikatsiooni lambi muundurikilbi uksele sisse ja kontrollib süsteemi valmidust.

- Kui süsteemi tühjendamistegevuse käsu andmise ajal oli süsteem väljalülitatud seisundis, tehakse süsteemi käivitus vastavalt käivitustegevuse algoritmile.
- Kui süsteem oli valmiduse seisukorras, siis käivitusprotsess jäetakse vahele ning *RTU* seab *BMS* valmisoleku režiimile ja *NXA* muunduri tühjendamise režiimile.

Tühjendamistegevuse tsüklit alustatakse ohutuse järjekorralisest kontrollimisest ning positiivse tulemuse puhul kogub *RTU* tühjendamistegevuse etteantud parameetreid, *NXA* muunduri ja *BMS* süsteemilt saadud akumulaatorite andmeid. Vastavalt saadud andmetele arvutab *RTU* *NXA* muunduri väljundvõimsuse kilovattides välja nii, et patareide tühjendamisvool vastaks *BMS* süsteemi poolt välja arvatud maksimaalsele tühjendamisvoolule.

Selles režiimis kestab *ESS* tühjendamine seni, kuni üks kahest laadimise lõpetamise tingimustest on täidetud. Tühjendamistegevuse lõpetamise kriteeriumiks on tühjendamissügavuse (*DOD%*) määratud taseme ületamine või akude pinge langemine alla lubatud piiri. Juhul kui *DOD%* ületab määratud taset või akude pinge on minimaalsest pingest madalam, siis peatub *NXA* muundur pehmelt, vähendades akude tühjendamise voolu nullini. Pärast seda võib *RTU* sõltuvalt süsteemi parameetritest anda käsu süsteemi väljalülitamisele või jätkata opereerimist ooterežiimil. *ESS* tühjendamistegevuse lõpetamisega kaasneb muunduri kilbi uksele oleva indikatsioonilambi väljalülitamine.

5 Mikrovõrgu rakenduse juhtimisprotsesside algoritmide kirjeldus

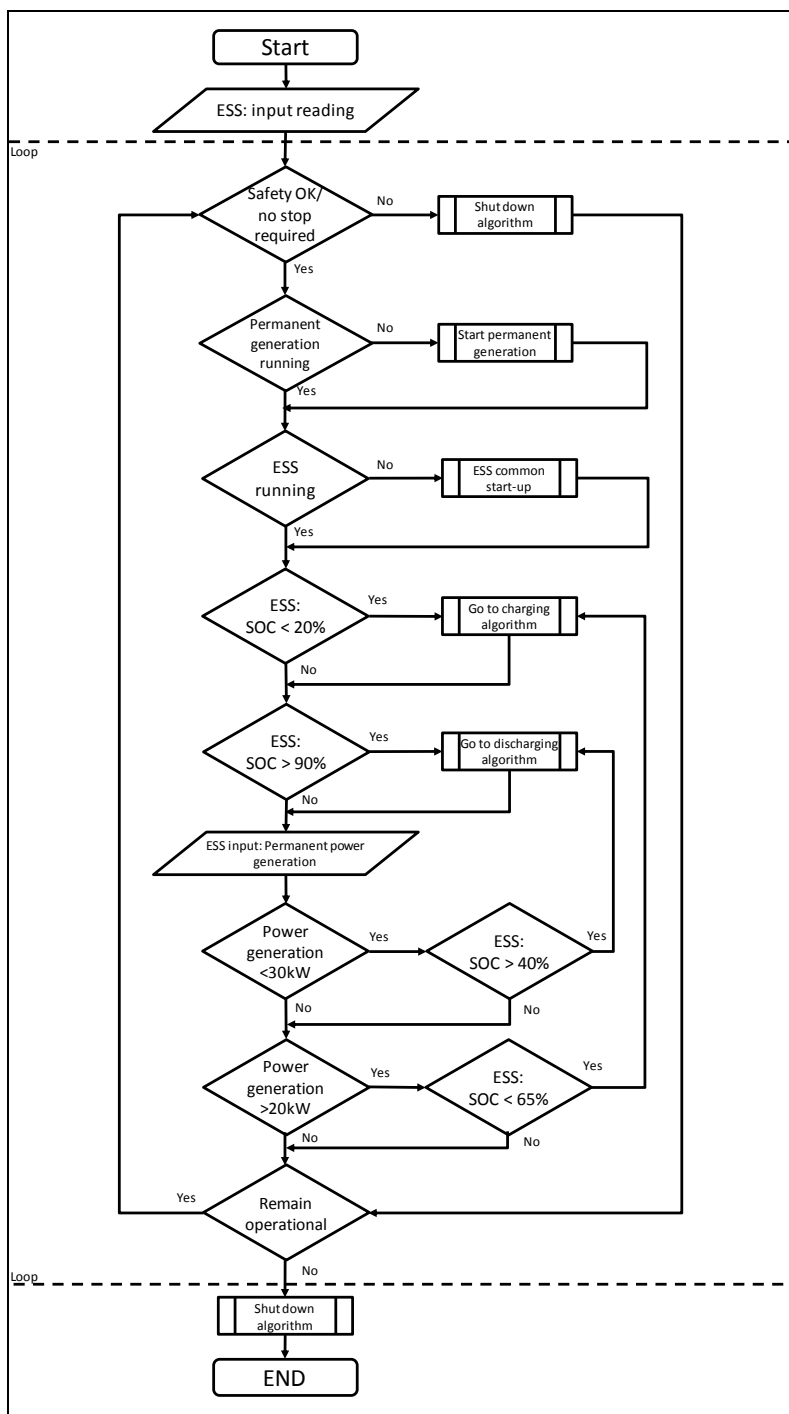
Käesolevas peatükis kirjeldatakse mikrovõrgu rakenduse juhtimisprotsesside algoritme, mis võimaldavad mikrovõrgu opereerimist autonoomses režiimis põhinedes selle parameetritel. Juhtimisprotsessid põhinevad sisend- ja väljundliinide elektriliste parameetrite jälgimisel ning energia salvestamissüsteemi seisundil. Sisend- ja väljundliinide elektrilised parameetrid aitavad määrata päikese elektrijäama tootmise suurust ning tarbitavat koormust.

5.1 Mikrovõrgu käivitamise ja režiimi valimise protsessi algoritm

Selle protsessi abil toimub mikrovõrgu käivitamine väljalülitatud asendist ning vastavalt energia salvestamissüsteemi ja elektriijaama tootmise parameetritele töörežiimi valimine.

Kõigepealt loetakse *ESS* süsteemi andmed ja mikrovõrgu parameetrid ning selle alusel teostatakse ohutu töörežiimi kontroll. Juhul kui süsteemis avastatakse probleem, siis pannakse käima mikrovõrgu seiskamisprotsessi algoritm. Mikrovõrgu käivitamine blokeeritakse kuni probleemi kõrvaldamiseni. Kui ohutu töörežiimi kontrolli läbimisel pole ühtegi probleemi tuvastatud, siis loetakse andmed garanteeritud tootmise osa kohta. Garanteeritud tootmise osa väljalülitatud asendi korral antakse signaal selle sisselülitamiseks. Seejärel kontrollitakse *ESS* süsteemi seisundit ja vajadusel antakse signaal selle käivitamiseks. Üalloodud tegevused vastutavad mikrovõrgu käivitamise eest ja juhul, kui süsteem on üle viidud valmisoleku seisundisse, alustatakse töörežiimi valimise protsess.

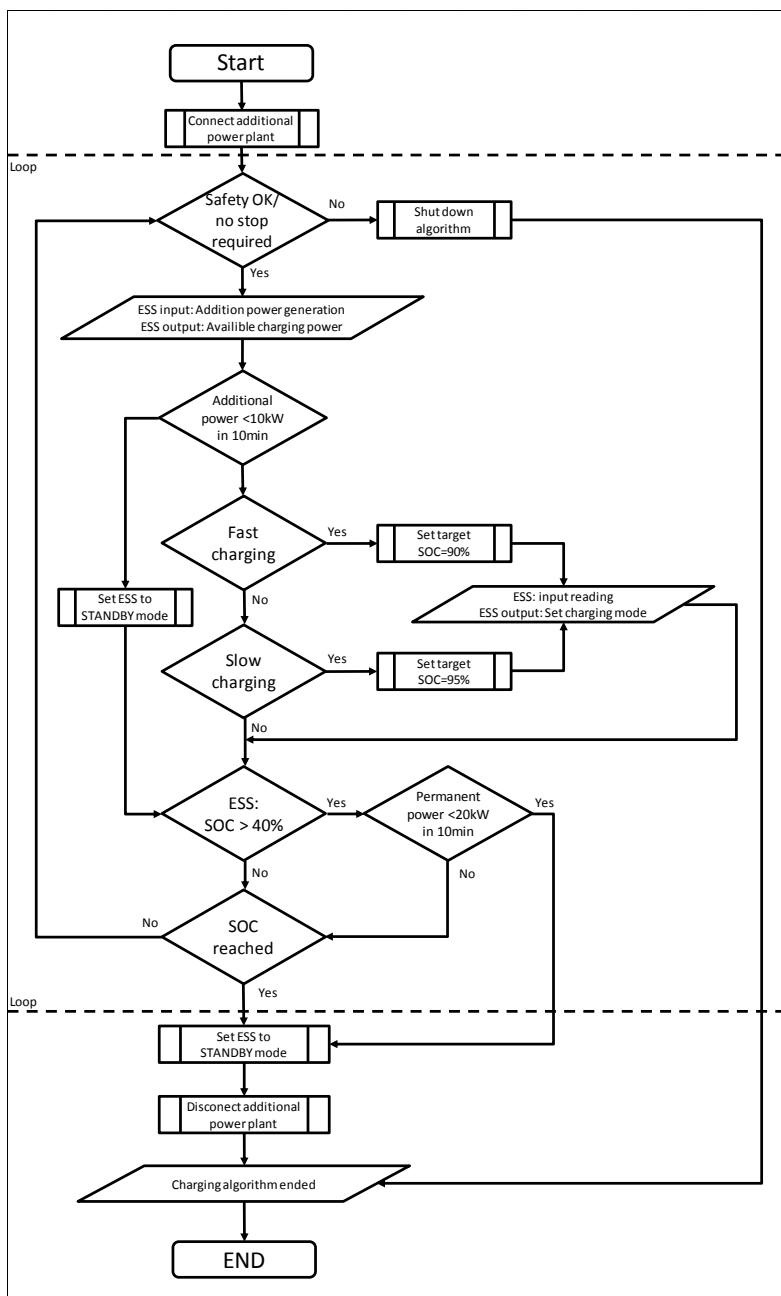
Põhinedes esitatud tehnilistel nõuetel olid välja töötatud kriteeriumid, mille alusel *RTU* saab määrata mikrovõrgu töörežiimi. Päikeseelektriijaama toodetava võimsuse ja *ESS* laetuse astme alusel *RTU* võib panna mikrovõrgu laadimis- või tühjendamisrežiimile või jätta valmisoleku režiimis. Vajadusel mikrovõrk võib olla sunniviisiliselt üle viidud ka väljalülitatud asendisse. Ülalkirjeldatud protsessi plokk skeemiga ja töörežiimi valimise kriteeriumitega saab tutvuda jooniselt 5.1.



Joonis 5.1 Mikrovõrgu käivitamise ja režiimi valimise protsessi plokskeem

5.2 Mikrovõrgu laadimisprotsessi algoritm

Antud protsess käivitatakse juhul, kui olid täidetud kõik tingimused, mis lubavad üle viia mikrovõrk valmisoleku seisundist laadimisrežiimile. Laadimisel, üleliigne energia salvestatakse ESS moodulisse, mida saab hiljem vabastada jaotusvõrku. Selleks, et paremini aru saada mikrovõrgu laadimisprotsessist, joonisel 5.2 on toodud protsessi plokkskeem.



Joonis 5.2 Mikrovõrgu laadimisprotsessi plokkskeem

Mikrovõrgu *ESS* laadimisel kasutatakse päikeseelektrijaama lisatootmise osa, mis on *ESS* süsteemist tavapäraselt lahti ühendatud. Seoses sellega antakse kõigepealt signaali lisatootmise osa käivitamiseks ja selle järel ühendatakse *ESS* peajaotuskilbi võrku. Peale ohutu töörežiimi kontrollimist loetakse andmed garanteeritud ja lisatootmise toodetava võimsuse kohta. Saadud andmete põhjal arvutatakse *ESS* laadimisvoolu nii, et oleks tagatud pidev võimsuse voog jaotusvõrgu suunas 20...50kW vahemikus. Juhul kui garanteeritud tootmine ei suuda genereerida võimsust antud vahemikus, siis puuduv võimsus kompenseeritakse lisa tootmise osast ja üleliigne energia läheb salvestisse. Kui lisatootmisega genereeritav võimsus on liiga madal ja ei võimalda *ESS* laadimist, siis salvesti pannakse ooterežiimile. Sel juhul nii garanteeritud, kui ka lisatootmise poolt genereeritav energia edastatakse jaotusvõrku.

Sõltuvalt arvutatud laadimisvoolust, süsteem võib valida kahe laadimisrežiimi vahel:

- Täiskiirusel laadimine kuni $SOC=90\%$, suure laadimisvoolu juures;
- Madalal kiirusel laadimine kuni $SOC=95\%$, suhteliselt väikse laadimisvoolu juures.

Laadimisrežiimist sõltub ka *ESS* laetustaseme sihtväärtus (*SOC*), mis on tingitud üksikute elementide laadimise ebaühtlusest suurte voolude juures ja võib põhjustada laadimistegevuse lõpetamist madalama *SOC* väärtusel, võrreldes väiksema voolu laadimisega. Seda efekti saab vaadelda prototüübi laadimisel, mis on kirjeldatud käesoleva töö peatükis 7.2.

Peale seda, kui laadimisrežiim ja *SOC* sihtväärtus on määratud, läheb *ESS* ooterežiimist laadimisrežiimile üle. Mikrovõrgu laadimisprotsess on tsükliline ja iga tsükli läbimisel korrigeeritakse *ESS*-i laadimisvoolu väärtus sõltuvalt päikese elektrijaama toodetava energia võimsusest.

Laadimisprotsess lõpetatakse *SOC* sihtväärtuse saavutamisel või mikrovõrgu *ESS* ooterežiimile ümberlülitamisel. Ooterežiimile ümberlülitamiseks peavad olema täidetud järgmised tingimused:

- *ESS* $SOC > 40\%$
- Garanteeritud tootmise võimsus $> 20\text{kW}$, 10 minuti jooksul.

Need tingimused olid lisatud protsessi algoritmile ümberfokuseerimise võimaluse jätmiseks süsteemi laadimisprotsessilt tühjendamisele juhul, kui näiteks energiasalvesti ei jõudnud *SOC* sihtväärtuseni ja päike on juba loojunud.

Juhul kui *ESS* jõudnud akud täis laadida, süsteem läheb ooterežiimile ja lisatootmise osa ühendatakse *ESS* peajaotuskilbist lahti. Laadimisprotsessi lõpetamisel läheb mikrovõrk tagasi töörežiimi valiku algoritmissse ja sõltuvalt süsteemi parameetritest valib sobiva režiimi. Pärast energiasalvesti täislaadimist või mikrovõrgu ümberfokuseerimist on täidetud kõik tingimused tühjendamisrežiimi valimiseks. See tähendab, et peale laadimisprotsessi lõpetamist valitakse automaatselt tühjendamisprotsess.

5.3 Energiasalvesti tühjendamisprotsessi algoritm

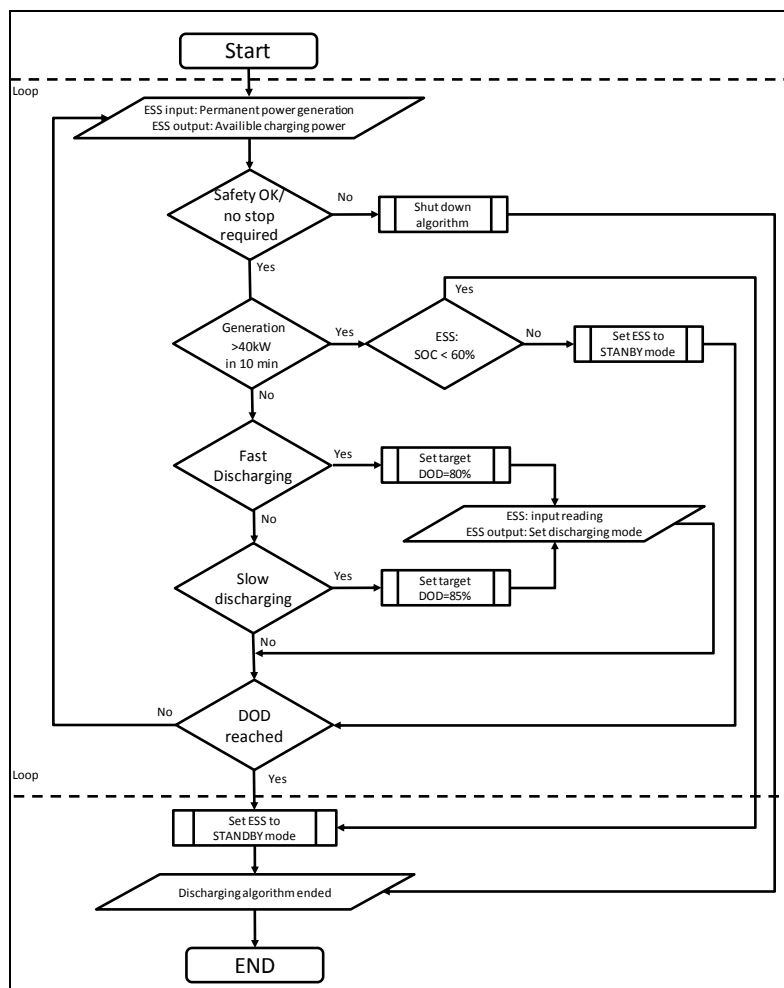
Juhul kui on täidetud tingimused mikrovõrgu tühjendamisrežiimile üleminekule, siis käivitatakse allkirjeldatud protsess, mis võimaldab vabastada salvestatud *ESS*-s energiat tagasi võrku. Mikrovõrgu tühjendamisprotsessi paremaks arusaamiseks on joonisel 5.3 toodud protsessi plokk skeem.

Kõigepealt loetakse andmed garanteeritud tootmise genereeritava võimsuse kohta, mille alusel arvutatakse *ESS* tühjendamisvool. Voolu arvutamisel, eeldatakse, et jaotusvõrku edastatav võimsus piiratakse 40kW juures. See tähendab, et *ESS* peaks kompenseerima puuduva võimsuse genereerimist 0...40kW vahemikus. Juhul, kui garanteeritud tootmine suudab genereerida nõutud võimsust iseseisvalt, siis tühjendamist ei toimu.

Päikeseelektrijaamaga genereeritava võimsuse langemisel alla 40kW taset, alustatakse tühjendamisprotsess arvutatud tühjendamisvoolu juures. Tühjendamisprotsess on samuti tsükliline ja iga tsükli läbimisel arvutatakse tühjendamisvool üle vastavalt garanteeritud tootmise genereeritava võimsuse suurusele. Sõltuvalt tühjendamisevoolu suurusest, laadimisprotsessi printsibi alusel, määrab süsteem tühjendamissügavuse taset (*DOD*):

- Suure tühjendamisvoolu juures $DOD=85\%$
- Madala tühjendamisvoolu juures $DOD=80\%$.

Selline sõltuvus on tingitud üksikelementide tühjendamise ebahütlusest ja võib põhjustada suure vooluga tühjendamistegevuse lõpetamist madalamal *DOD* väärtusel, võrreldes väiksema vooluga tühjendamisega. Seda efekti saab vaadelda prototüübi tühjendamisel, mis on kirjeldatud käesoleva töö peatükis 7.3.



Joonis 5.3 Energiasalvesti tühjendamiseprotsessi plokkskeem

Juhul, kui tühjendamiseprotsessi käigus garanteeritud tootmisega genereeritav võimsus läheb 40kW piirist välja ja 10 minuti jooksul ei lange, siis sõltuvalt ESS parameetritest võib süsteem muuta töörežiimi järgnevalt:

- ESS ooterežiimile üleviimine, mikrovõrgu tühjendamiseprotsessi katkestamata, juhul kui $SOC > 60\%$
- ESS ja mikrovõrgu ooterežiimile üleviimine, juhul kui $SOC < 60\%$

See tähendab, et kui garanteeritud tootmise genereerimisvõimsus ületab 40kW piiri, siis mikrovõrgu süsteem konfigureeritakse ümber laadimisrežiimile, kui ESS mooduli laetustase $SOC < 60\%$, või seatakse ESS mooduli ooterežiimile kui $SOC > 60\%$. Viimasel juhul pidevalt kontrollitakse garanteeritud tootmisega genereeritavat võimsust ja selle langemisel 40kW piirist alla pannakse ESS taas tühjendamisele.

Tavapäraselt lõpetatakse tühjendamisprotsess siis, kui *ESS* saavutab määratud *DOD* taset. Protsessi lõpetamisel läheb mikrovrk tagasi töörežiimi valiku algoritmissse ja sõltuvalt süsteemi parameetritest valib sobiva režiimi. Tühjendamisprotsessi lõpetamise kriteeriumid vastavad laadimisprotsessi valiku kriteeriumitele, mis tähendab, et peale tühjendamisprotsessi lõpetamist valitakse automaatselt laadimisprotsess.

5.4 Seiskamisprotsessi algoritm

Käesolevat algoritmi kasutatakse juhul, kui on vaja üle viia *ESS* moodulit või kogu mikrovrngu rakendust väljalülitatud asendisse. Seda protsessi käivitatakse käsitsi, mikrovrngu hooldustööde teostamiseks või automaatselt mikrovrngus probleemi tuvastamiseks. Seiskamisprotsessi plokk skeem on toodud joonisel 5.4.

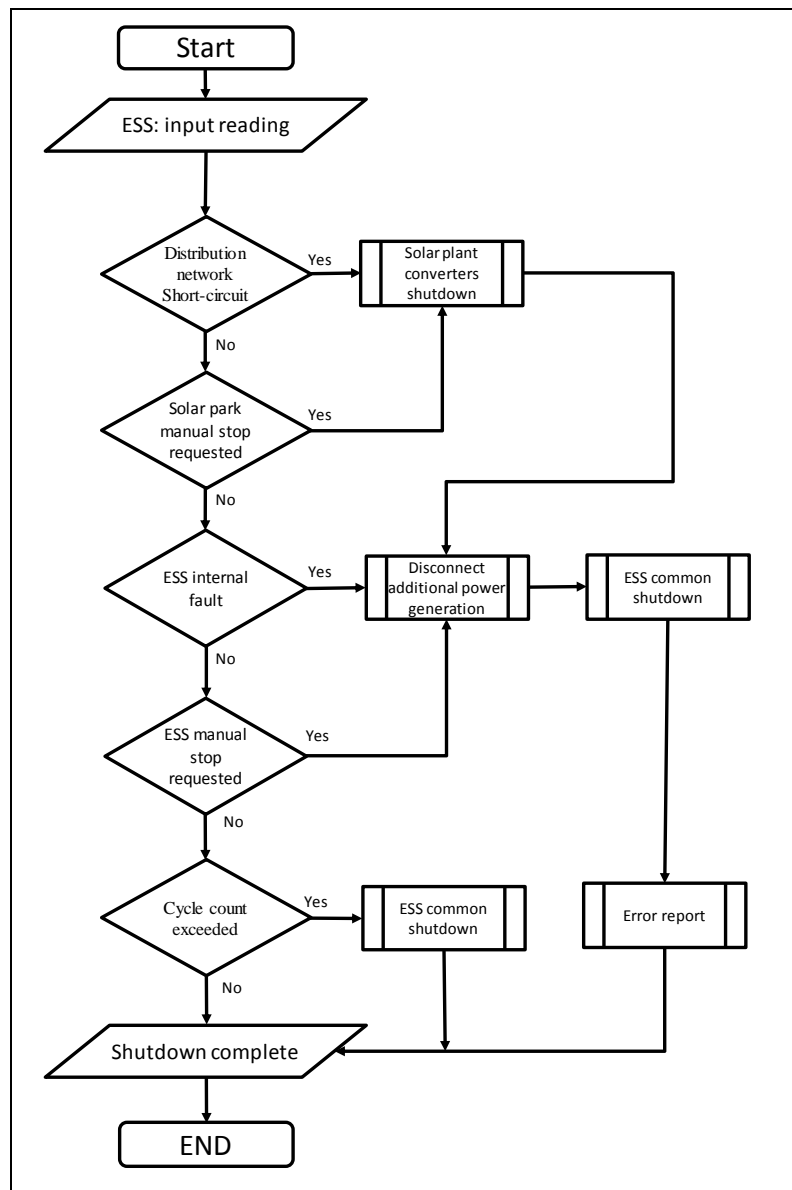
Protsessi alguses loetakse süsteemi andmed, mille põhjal uuritakse seiskamise põhjust. Juhul kui seiskamisprotsessi käivitamise põhjuseks oli jaotusvrngus esinev lühis, siis antakse signaal kogu mikrovrngu seiskamise kohta. See tähendab, et kõigepealt lülitakse ettenähtud viisil nii garanteeritud kui ka lisatootmise osa päikeseinverterid välja. Selle järel ühendatakse lisatootmise osa *ESS* peajaotuskilbist lahti ja käivitatakse *ESS* seiskamistegevuse algoritm. Mikrovrk on üle viidud väljalülitatud asendisse ja selle taaskäivitamine blokeeritud kuni probleemi kõrvaldamiseni või väljalülitamise signaali kadumiseni.

Juhul kui mikrovrngu seiskamisprotsess initsieeritakse *ESS* vea korral, siis kohe ühendatakse lisatootmise osa peajaotuskilbist lahti ja käivitatakse *ESS* seiskamistegevuse algoritm. Garanteeritud tootmise osa jääb sel juhul tööle ja genereerib võimsust jaotusvrngu. *ESS* on üle viidud väljalülitatud asendisse ja selle taaskäivitamine blokeeritud kuni probleemi kõrvaldamiseni või väljalülitamise signaali kadumiseni.

Nii mikrovrngu rakenduse kui ka *ESS* mooduli seiskamise protsessi saab käivitada käsitsi, erinevate hooldustööde teostamiseks. Kui seiskamisprotsess käivitatakse automaatselt, ehk mikrovrngu või *ESS* vea tuvastamisel, siis vea koodi alusel genereeritakse raport ja saadetakse dispetšerile edasi.

Seiskamisprotsessi algoritmissse on samuti integreeritud *ESS* mooduli kaitsefunktsioon, mis piirab süsteemi ümberkonfigureerimise arvu kuni kahe tühjendamis-/laadimistsüklini

ööpäevas. Juhul kui määratud tsüklite arv on saavutatud, seadistatakse *ESS* ooterežiimile. Tsüklite loendur taastatakse kord ööpäevas ja *ESS* on uuesti tööks valmis.



Joonis 5.4 Seiskamisprotsessi plokkskeem

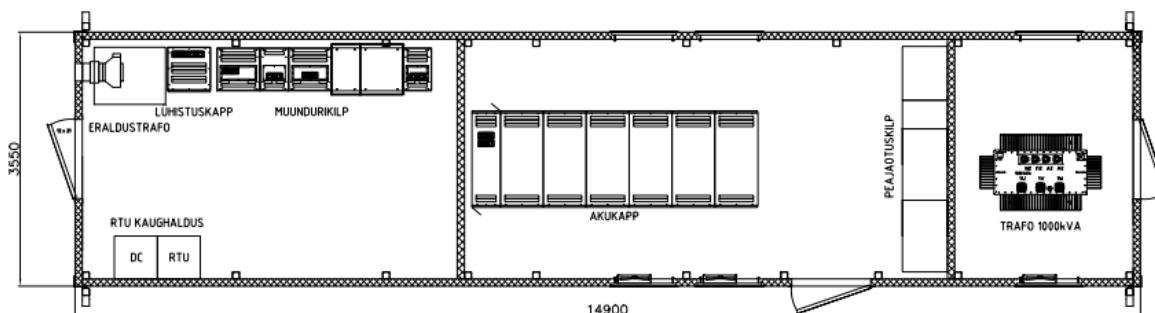
6 Energiasalvestiga alajaama laienduse võimalused

Uuritav *ESS* oli projekteeritud nimivõimsusele 150kW, kuid sõltuvalt mikrovõrgu nõuetest, võib sellest võimsusest jääda väheseks. Suurema võimsuse saavutamiseks võib kasutada mitu *ESS* moodulit, mis ühendavad ühisvõrgu omavahel kokku. Käesolevas peatükis vaadeldakse kaks võimalust energiasalvesti alajaama võimsuste laiendamiseks vahemikus 150 kuni 10 000kW.

6.1 Laiendamine võimsusvahemikus 150 kuni 1000 kW madalpinge poolel

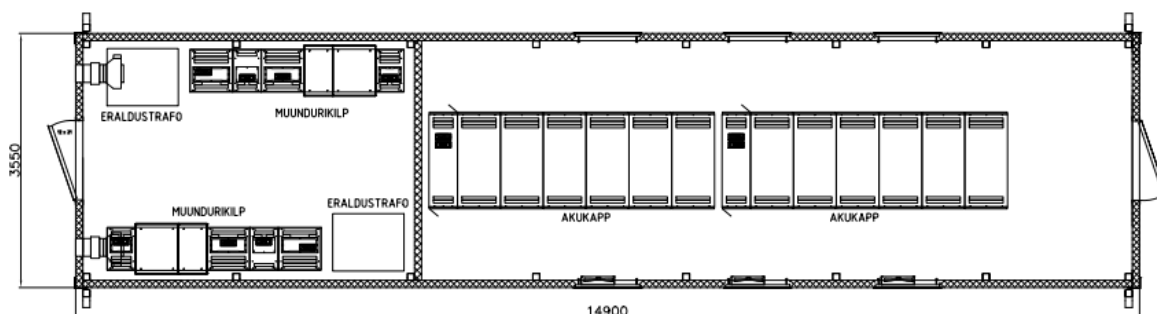
Arendatava 150kW mooduli põhjal on võimalik koostada tüüplahenduste rida süsteemi võimsuse laiendamiseks kuni 1000kW-ni. Sihtvõimsuse saavutamiseks kasutatakse ühes süsteemis põhimoodulit ja selle külge ühendatud mitmed lisamoodulid. Kõik moodulid ühendatakse omavahel madalpinge poolel kokku, kuid sellise võimsusega moodulite kogum on parem ühendada jaotusvõrgu keskpinge poolel. Selle eesmärgiga on põhimoodulisse paigaldatud pinget tõstev trafo, mis viib mooduli korpuse suurendamiseks.

Põhimooduli tehnilised parameetrid ja põhilised elemendid ei erine oluliselt vaadeldavast *ESS* süsteemist. Selle mooduli põhiliseks ülesandeks on ühendada energiasalvesti lisamoodulid peajaotuskilbi kaudu omavahel kokku ja üksikute moodulite laadimis- ning tühjendamistegevuste juhtimine ühe tervikuna. Käesoleva mooduli paigutusjoonise eskiisiga saab tutvuda jooniselt 6.1.



Joonis 6.1 Põhimooduli seadmete paigutuse ülevaade

Põhimooduli külge ühendatud lisamoodulid valmistatakse samade mõõtudega ja omavad nimivõimsust 2x150kW. Sellistes moodulites puuduvad peajaotuskilp ja pinget tõstev trafo, kuid selle tõttu vabanenud ruumi kasutatakse lisa muundurikilbi, eraldustrafo ning akukapi paigaldamiseks. Lisamooduli paigutusjoonise eskiisiga saab tutvuda jooniselt 6.2



Joonis 6.2 Lisamooduli seadmete paigutuse ülevaade

1000kW energiasalvesti üldkontseptsioon peab koosnema 4 moodulist:

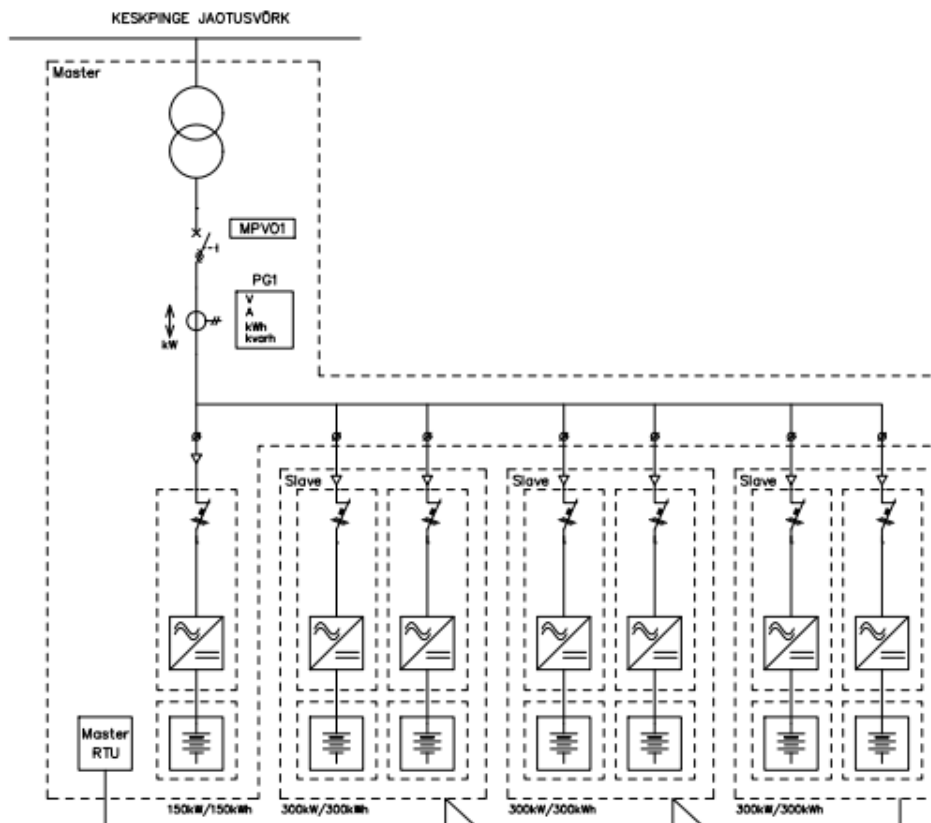
- Üks põhimoodul, energia salvestamiseks ja lisamoodulite ühendamiseks ning juhtimiseks, 150kW
- Kolm lisamoodulit, energia salvestamiseks, 3 x (2 x 150kW)

Ülaltoodud printsiibi põhjal on koostatud tüüplahenduste rea koondtabel võimsuste vahemikus 150 kuni 1000kW (Tabel 6.1).

Tabel 6.1 Tüüplahenduste rea koondtabel võimsuste vahemikus 150 kuni 1000kW

kW/kWh	150	450	750	1000
Põhimoodulite arv	1	1	1	1
Lisamoodulite arv	-	1	2	3

Laiendatud süsteemi printsiibi paremaks arusaamiseks, on joonisel 5.2 toodud lihtsustatud ühejooneline skeem.

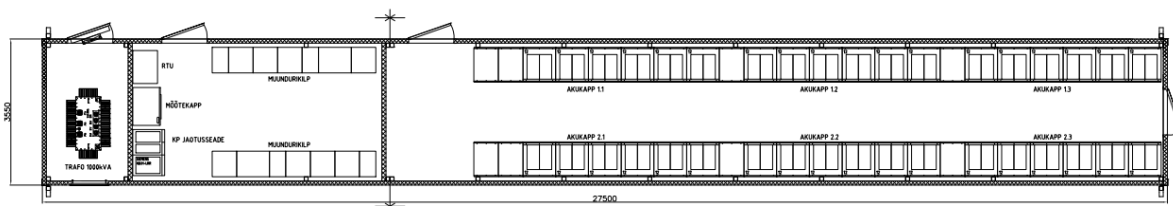


Joonis 6.3 Madalpinge poolel laiendatud energiasalvesti lihtsustatud ühejooneline skeem

6.2 Laiendamine võimsusvahemikus 1 kuni 10MW keskpinge poolel

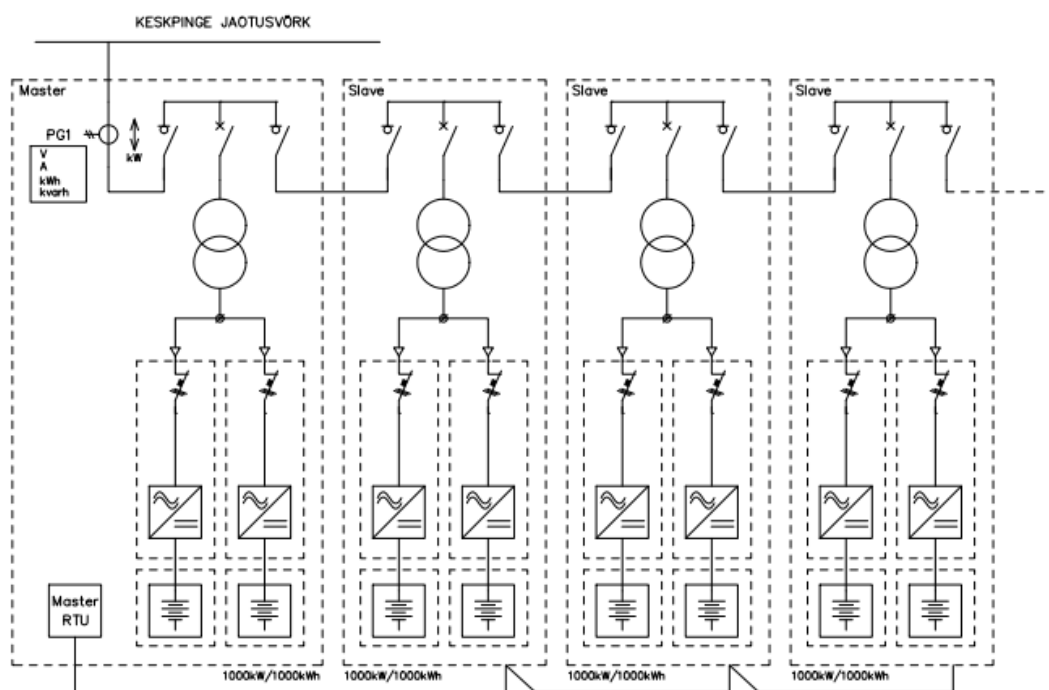
Keskpinge poolel omavahel ühendatud moodulite põhjal võib pakkuda veel ühte võimalust võimsuse laiendamiseks vahemikus 1 kuni 10MW. Antud juhul kaob vajadus peajaotuskilbi ning eraldustrafo kasutamiseks, kuna sellisel juhul pole ettenähtud tarbijaid, mis on ühendatud otse energiasalvestuse süsteemi külge madalpinge poolel. Nende asemele tulevad keskpinge jõutrafo ja keskpinge jaotusseade mooduli ühendamiseks keskpinge võrku.

Käesolevat varianti on otstarbekas kasutada siis, kui kogu süsteemi väljundi võimsus ei ole väiksem kui 1MW. Ühe mooduli nimivõimsust saavutatakse kahe muundurikilbi kasutamisel, mille võimsus on 500kW iga muundurikilbi kohta. Muundurikilbi külge ühendatakse akukapid, kuhu mahutatakse 216 akut, 1000Ah mahtuvusega iga elemendi kohta. Väljund võimsuse suurenemisega kasvavad ka mooduli mõõtmed. Ühe mooduli paigutusjoonis on toodud joonisel 6.4.



Joonis 6.4 1 MW mooduli seadmete paigutuse ülevaade

Kokkuvõttes põhineb ülaltoodu kontseptsioon madalpinge poolel laiendatava süsteemi põhimõttel. Süsteemis samamoodi peaks olema nii põhimoodul, mille eesmärgiks on üksikute moodulite laadimis- ning tühendamistegevuste juhtimine ühe tervikuna, kui ka lisamoodulid. Keskpinge poolel laiendatava süsteemi põhimõtteline skeem on toodud joonisel 6.5.



Joonis 6.5 Keskpinge poolel laiendatava süsteemi põhimõtteline skeem

Tabelis 6.2 on toodud tüüplahenduste rea koondtabel võimsuste vahemikus 1 kuni 10MW laienduse võimalusega keskpinge poolel.

Tabel 6.1 Tüüplahenduste rea koondtabel võimsuste vahemikus 1 kuni 10MW

MW/MWh	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Põhimoodulite arv	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Lisamoodulite arv	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9

6.3 Laiendamise võimaluste võrdlus

Madalpinge poolel laiendatava süsteemi nimivõimsus on piiratud 1000kW. See on põhjustatud sellest, et kõike lisamooduleid tuleb ühendada otseselt põhimooduli külge ja põhimooduli peajaotuskilbi suurus otseselt sõltub lisamoodulite arvust. Lisamoodulite suure arvu ühendamine tähendab peajaotuskilbi mõõtude ning tehniliste andmete suurendamist, just nimelt nimi voolu ning lühisvoolu taluvuse väärtust. Peale peajaotuskilpi tuleb suurendada ka pinget tõstva trafo nimivõimsust, mille kaudu ühendatakse kogu süsteem jaotusvõrguga. Mida suurem on süsteemi nimivõimsus, seda suurema võimsusega trafo tuleb paigaldada. Põhimooduli nimivõimsuse suurenemisega kasvavad ka soojakaod, mille tõttu tuleb kasutada suurema võimsusega jahutussüsteemi. Kõik need aspektid tähendavad põhimooduli mõõtude ning hinna suurenemist, mis omakorda muudab kogu süsteemi mahulisemaks ja kallimaks. Käsitatud põhjuste alusel on otstarbekam kasutada keskpinge laienduse võimalusega moodulit, kui tegemist on 1MW võimsusest suurema süsteemiga.

Keskpinge poolel laiendatavate moodulite kasutamisel on oma plussid ja miinused. Keskpinge poolel ühendamiseks tuleb paigaldada nii pinget tõstvat trafot kui ka jaotusseadet, mille maksumused on tunduvalt suuremad. Käesoleva mooduli kasutamine suhteliselt madalama süsteemi võimsuse korral suurendab mooduli maksumust oluliselt, võrreldes sama võimsuse süsteemi maksumusega, mis on teostatud madalpinge poolel laiendamisega. Selle põhjusel keskpinge poolel laiendatava süsteemi minimaalseks võimsuseks on defineeritud 1000kW.

Suurendatud võimsusega muundurikilbi ning mahukamate akuelementide kasutamine toob kaasa soojakadude suurenemise, mille tõttu jahutuseadme asemel tuleb kasutada kallimaid konditsioneerimissüsteeme. Samuti peab muundurikilp laskma läbi suurema voolu ja võimaldama rohkemate alalisvoolu ning vahelduvvoolu kaablite arvu ühendamist. Suurema mahtuvusega akude elemendid omavad ka suuremaid mõõte, elementide akukappi mahtumiseks tuleb ehitada suurem akukilbi kest. Kõik ülaltoodud aspektid tähendavad samuti mooduli mõõtude ning hinna suurenemist.

Kõrgepinge poolel laiendatava mooduli eeliseks võib lugeda pikaajalist süsteemi laiendamise võimalust, kuna kõik moodulid ühendatakse läbi keskpinge jaotusseadme kokku jadamisi. See tähendab, et plaanitud süsteemi ei pea kohe täis 10MW võimsusele välja ehitama, vaid võib samm-sammult laiendada vastavalt vajadusele. Juhul kui madalpinge poolel laiendatavad

moodulid peavad olema paigutatud üksteise kõrvale, madalpinge ühenduskaablite pikkuse vähendamiseks, siis keskpinge poolel laiendatavate moodulite vahekaugus ei ole nii tähtis ja need võivad paikneda suhteliselt suurel vahekaugusel. See annab suuremat vabadust mikrovõrgu projekteerimisel.

7 Energiasalvestiga alajaama prototüübi katsetamine ja efektiivsuse määramine

Käesolevas peatükis kirjeldatakse olemasoleva prototüübi katsetused. Töö käigus oli läbi viidud mitu katset erinevate voolude juures laadimise, tühjendamise ja kombineeritud täistsükli tegevuse uurimiseks. Käesoleva töö raames on kirjeldatud laadimis- ja tühjendamistegevused 20A juures, ning kombineeritud täistsükli 40A juures. Katsetuse tulemustega 30A voolu juures võib tutvuda töö lisas 2. Kõik saadud tulemused olid dokumenteeritud tööžurnaali edasiseks töötamiseks ning kasuteguri arvutamiseks.

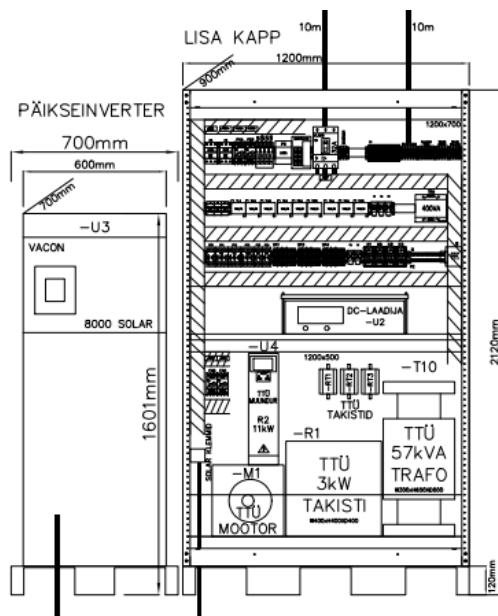
7.1 Prototüübi kirjeldus

Katsetusel kasutatava prototüübi ehitus, põhilised elemendid ning ühenduste skeemid on arendatava alajaamaga sarnased. Põhiliseks erinevuseks on akukapi mahtuvus – 25kWh ja eraldustrafo võimsus – 57 kVA. Väikest mahtuvust põhjustab prototüübis kasutatavate akuelementide mahtuvus, mis on 40Ah 300Ah asemel. Katsetusel kasutatava akukapi pilt on toodud joonisel 7.1.



Joonis 7.1 Prototüübi akukapp

Peajaotuskilbi ning trafo kappide funktsionaalsust täidab prototüübis lisakapp, mis hõlmab endas nii kohaliku elektrienergia tarbijaid kui ka mikro võrku ühendatud päikesepaneelide inverterit. Päikesepaneelide genereerimist imiteeritakse antud juhul vooluallikaga. Lisakapi paigutusjoonis on toodud joonisel 7.2



Joonis 7.2 Lisakapi seadmete paigutuse ülevaade

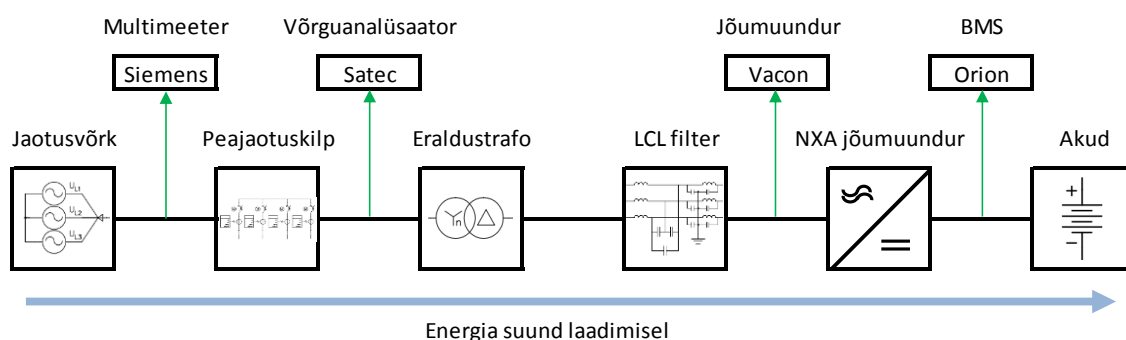
Prototüübi põhiliseks elemendiks on muunduri kilp, mis vastab täielikult arendatava alajaama muundurikilbile ja kirjeldatud peatükis 3.5. Muundurikilbi pilt on toodud joonisel 7.3.



Joonis 7.3 Prototüübi muundurikilp

7.2 Energiasalvesti laadimine

Antud katsetuse eesmärk on määrata akukapi laadimiskarakteristik ning salvestatud energia maht. Töö käigus jälgitakse samuti NXA muunduri ning muundurikilbi laadimistegevuse juhtimisloogikat, mis tagab akude laadimise optimaalses režiimis. Prototüüpi katsetatakse TTÜ võrku ühendamisel ilma tarbijata, mis on ühendatud otseselt lisakilbi külge. Katsetamisel läbib TTÜ võrgust saadud energia eraldustrafo ja NXA muundurit ning see salvestatakse akude elementidesse. Katsetust kirjeldatava plokk skeemiga saab tutvuda jooniselt 7.4.



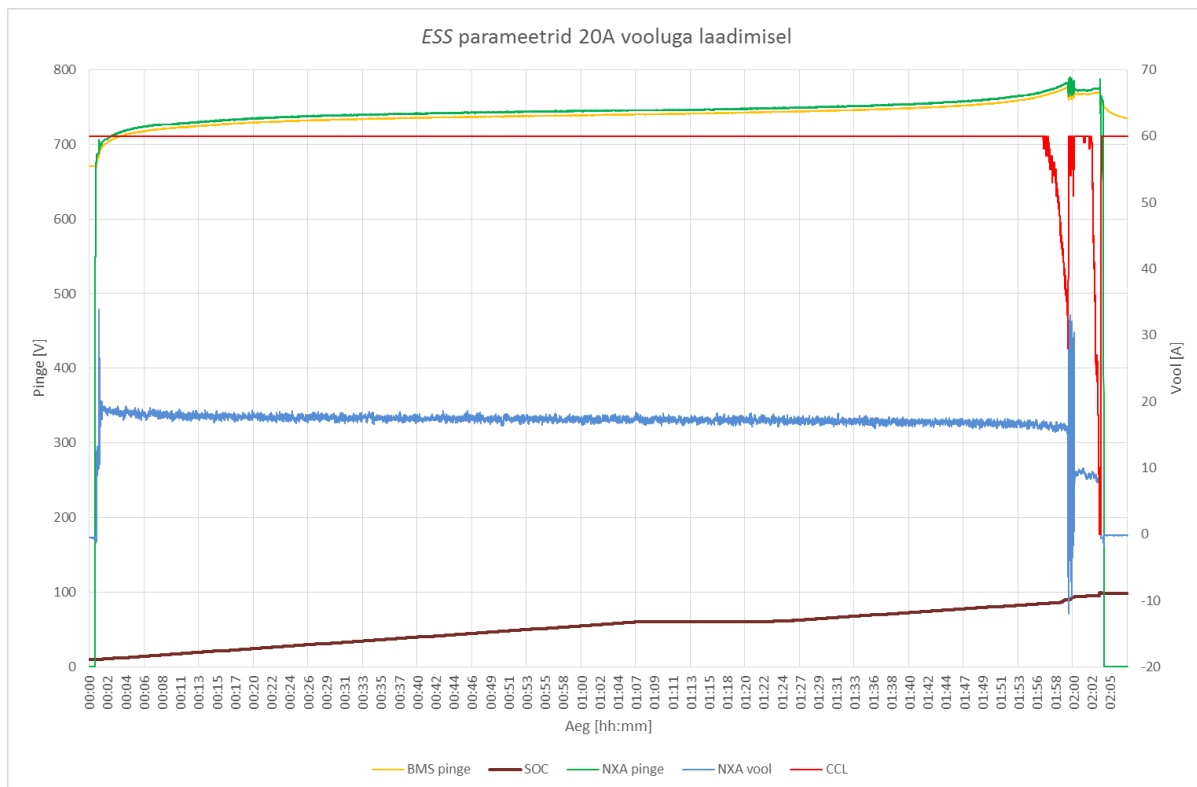
Joonis 7.4 Laadimistegevuse katsetuse plokk skeem

Kasutades Satec analüsaatori, *BMS* süsteemi ja NXA muundurit olid töö käigus mõõdetud prototüübi parameetrid. *BMS* süsteemiga mõõdetavad andmed salvestati arvutisse, mis oli ühendatud otseselt *BMS* seadmega *CAN*-võrgu kaudu. Satec analüsaatori ja NXA muunduri saadud andmed korjati ja salvestati *etherneti* kaudu *RTU*-sse. Peale testi läbiviimist olid kõik andmed alla laaditud *RTU*-st töö arvutisse edasiseks töötamiseks. Katsetuse alg- ja lõppandmed on toodud tabelis 7.1

Tabel 7.1 Laadimistegevuse katsetuse alg- ja lõppandmed

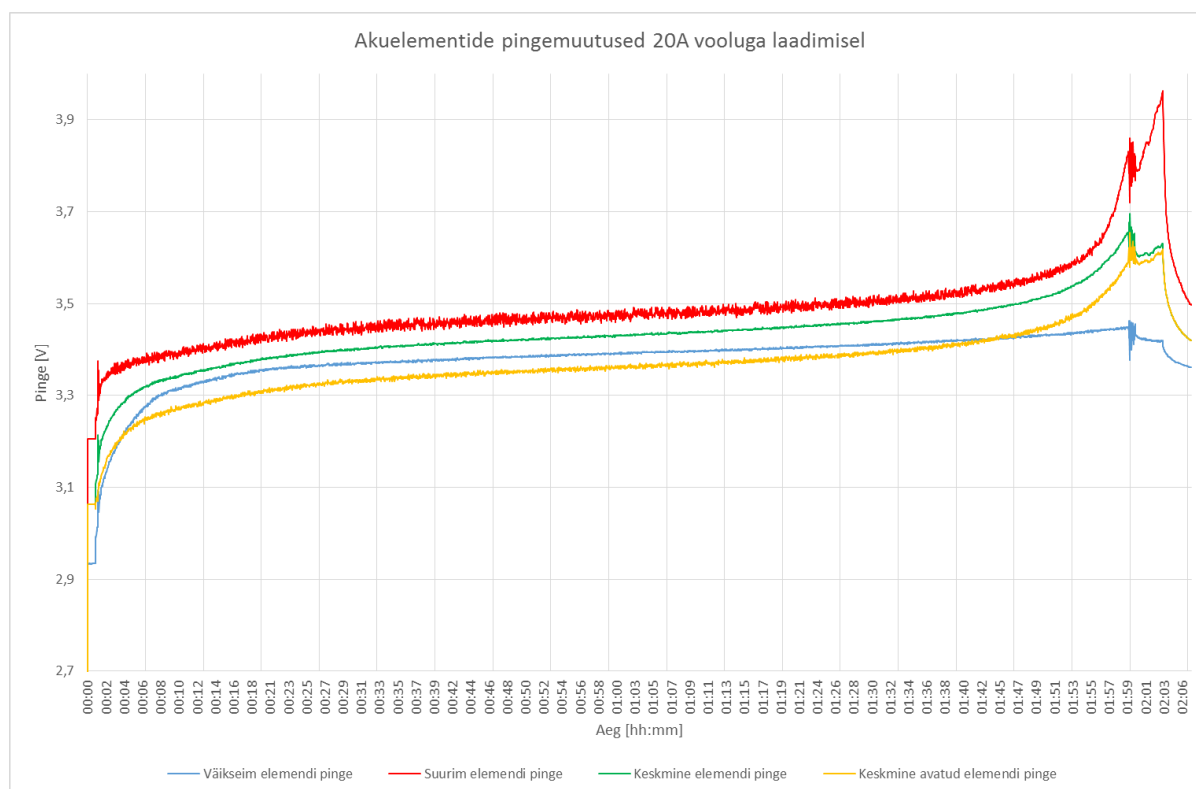
Katse kirjeldus:	ESS laadimine 20A vooluga		
Katse kestvus:	2h 06m		
Mõõteriistad:	Satec, BMS, NXA		
Kasutatud mahtuvus:	36Ah		
Esialgne		Lõplik	
SOC:	5%	SOC:	100%
CCL:	60A	CCL:	0A
BMS pinge:	670,6V	BMS pinge:	770,4V
Vcell max:	3,206V	Vcell max:	3,963V
Vcell min:	2,933V	Vcell min:	3,405V

Katsetuse põhilisteks parameetriteks loetakse käesoleva töö raames akukapi klemmidel mõõdetud pinget, laadimisvoolu, *CCL*, *SOC* ja akude üksikelementide pingeid. Joonisel 7.5 võib tutvuda graafiliselt kujutatud seadmetelt kogutud andmetega.



Joonis 7.5 Laadimistegevuse karakteristikud

Joonisel 7.5 toodud graafikult on selgelt näha laadimistegevuse põhilisi etappe: laadimise algus, normaallaadimine, laadimisvoolu piiramine, laadimise lõpetamine. Selleks, et paremini aru saada laadimistegevuse ajal toimuvate toimingute põhjust, on joonisel 7.6 toodud *BMS* süsteemist saadud akuelementide pingemuutuse andmed.



Joonis 7.6 Akuelementide pingemuutused laadimisel

Vaatleme laadimistegevust põhinedes joonistel 7.5 ja 7.6 toodud andmetel. Laadimistegevust alustatakse alalispinge poolel asuva kontaktori K2 sulgemise momendist. Kontaktori sulgemisel suurendatakse järsult akukapi ja aku üksikelementide klemmidel mõõdetavaid pingeid, mis on kohe näha graafikutelt. Seejärel laetakse akud muutumatu vooluga, mille tõttu ei toimu suurt pinge võnkumist ja selle väärtus kasvab sujuvalt enamiku katsetuse aja jooksul.

Jooniselt 7.6 on näha, et ebahütlase laadimise tõttu hakkavad akude üksikelementide pinged katsetuse lõpuks järsult kasvama ja ajahetkel 02:00 jõuavad väärtuseni, mille juures hakkab *BMS* süsteem laadimisvoolu piirama. Laadimisvoolu piiramist on selgelt näha joonisel 7.5 esitatud/asuva/ graafiku lõpust. Samal ajal hakkab *BMS* süsteem ülelaaditud elementide balansseerimist tegema/või balansseerima, püüdes ühtlustada üksikelementide pingeid. Aku elementide balansseerimisel piiratakse *CCL* voolu ning selle tõttu hakkavad langema akude üksikelementide pinged, mille alusel hakkab *BMS* *CCL* voolu suurendama. Akude pinge tõuseb ja kogu protsess kordub jälle. Käesolevad *BMS* süsteemi kaudu tehtud toimingud ajavad nii laadimisvoolu kui ka akude pingete võnkumisi, mida on selgelt näha joonistel 7.5 ja 7.6 asuvate graafikute lõpust.

Ülal kirjeldatud võnkumised stabiliseeritakse sujuvalt ning laadimistegevus piiratud voolu juures kestab kuni $SOC=100\%$, mille saavutamisel laadimine lõpetatakse. Laadimistegevuse lõpetamisega kaasneb akukapi ning üksikelementide klemmidel mõõdetavate pingete langemine.



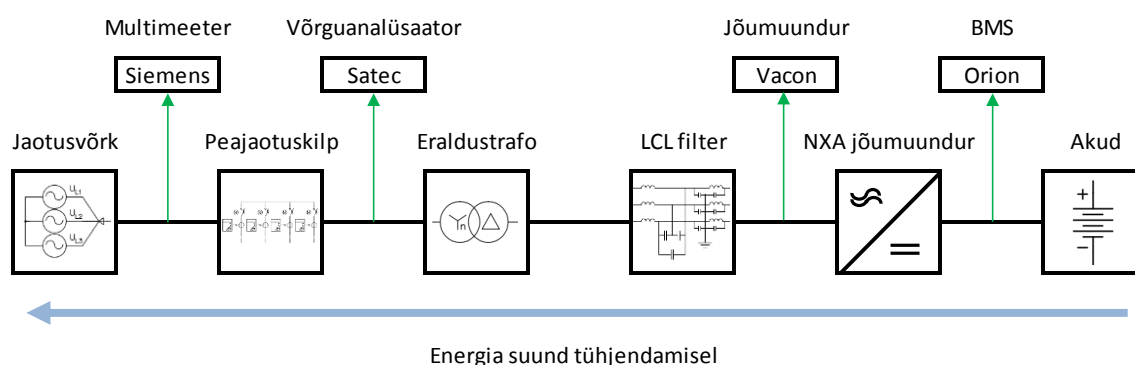
Joonis 7.7 Laadimistegevusel edastatud energia

Kogutud andmete põhjal oli välja arvatud tegevuse jooksul akudesse edastatud energia ning kasutatud akude mahtuvus. Graafiliselt on saadud tulemused esitatud joonisel 7.7. Jooniselt on näha, et vaatamata akuelementide täislaadimise saavutamisele, oli kasutatud 36Ah, mis on 90% akude nimimahtuvusest. Sellist erinevust võib seletada erinevate prototüübis kasutatavate seadmete kadude mõjuga.

7.3 Energiasalvesti tühjendamine

Käesoleva katsetuse eesmärk on määrata akukapi tühjendamiskarakteristik ning vabastatud energia maht. Töö käigus jälgitakse NXA muunduri ning muundurikilbi tühjendamistegevuse juhtimisloogikat, mis tagab akude tühjendamise optimaalses režiimis. Prototüüpi katsetatakse TTÜ võrku ühendamisel ilma tarbijata, mis on ühendatud otseselt lisakilbi külge. Katsetamisel

läbib prototüübisse salvestatud energia eraldustrafo ja NXA muundurit ning see vabastatakse tagasi TTÜ võrku. Katsetust kirjeldatava plokkskeemiga saab tutvuda joonisel 7.4.



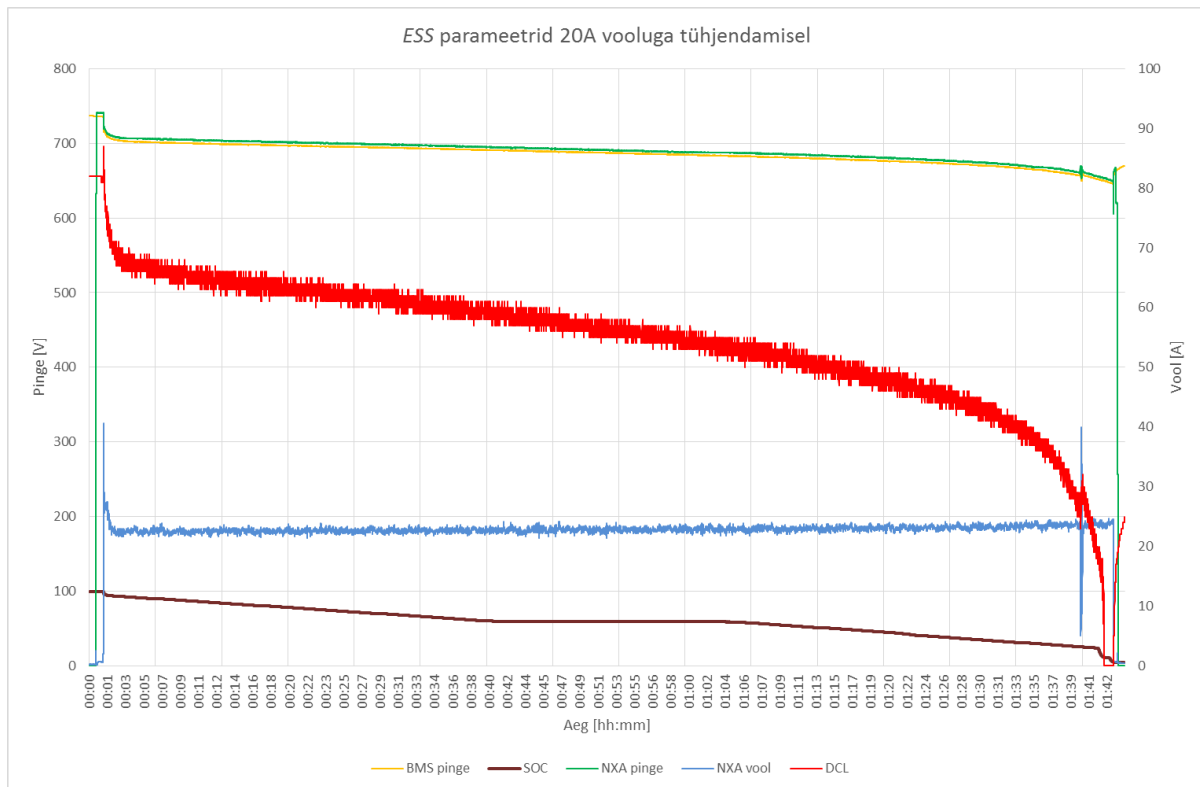
Joonis 7.8 Tühjendamistegevuse katsetuse plokkskeem

Kasutades Satec analüsaatori, *BMS* süsteemi ja NXA muundurit olid töö käigus mõõdetud prototüübi parameetrid. *BMS* süsteemiga mõõdetavad andmed salvestati arvutisse, mis oli ühendatud otseselt *BMS* seadmega *CAN*-võrgu kaudu. Satec analüsaatori ja NXA muunduri saadud andmed korjati ja salvestati *etherneti* kaudu *RTU*-sse. Peale testi läbiviimist olid kõik andmed *RTU*-st alla laaditud töö arvutisse edasiseks töötlemiseks. Katsetuse alg- ja lõppandmed on toodud tabelis 7.2

Tabel 7.2 Tühjendamistegevuse katsetuse alg- ja lõppandmed

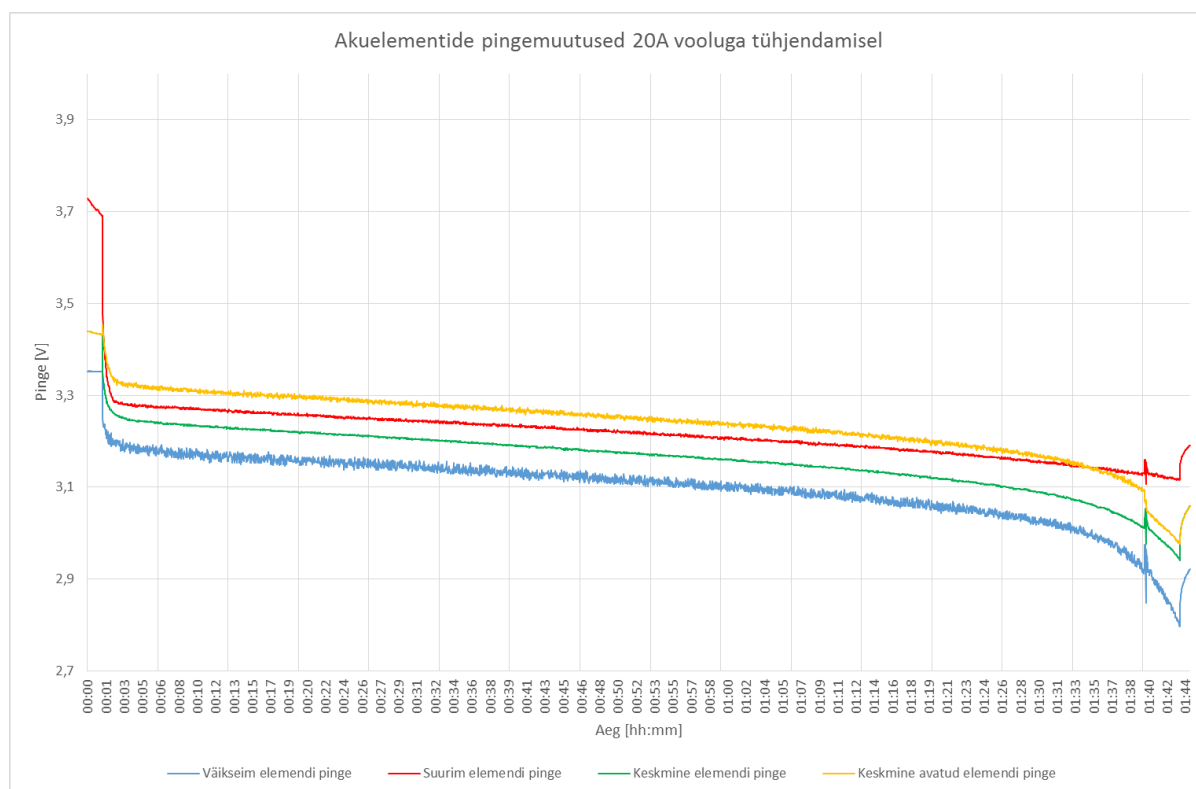
Katse kirjeldus:		ESS tühjendamine 20A vooluga	
Katse kestvus:		1h 45m	
Mõõteriistad:		Satec, <i>BMS</i> , NXA	
Kasutatud mahtuvus:		35Ah	
Esiolgu		Lõplik	
<i>SOC</i> :	100%	<i>SOC</i> :	5%
<i>DCL</i> :	85A	<i>DCL</i> :	0A
<i>BMS</i> pinge:	737V	<i>BMS</i> pinge:	645,5V
Vcell max:	3,728V	Vcell max:	3,106V
Vcell min:	3,353V	Vcell min:	2,797V

Katsetuse põhilisteks parameetriteks loetakse käesoleva töö raames akukapi klemmidel mõõdetud pinget, laadimisvoolu, *CCL*, *SOC* ja akude üksikelementide pingeid. Joonisel 7.9 võib tutvuda graafiliselt kujutatud seadmetelt kogutud andmetega.



Joonis 7.9 Tühjendamistegevuse karakteristikud

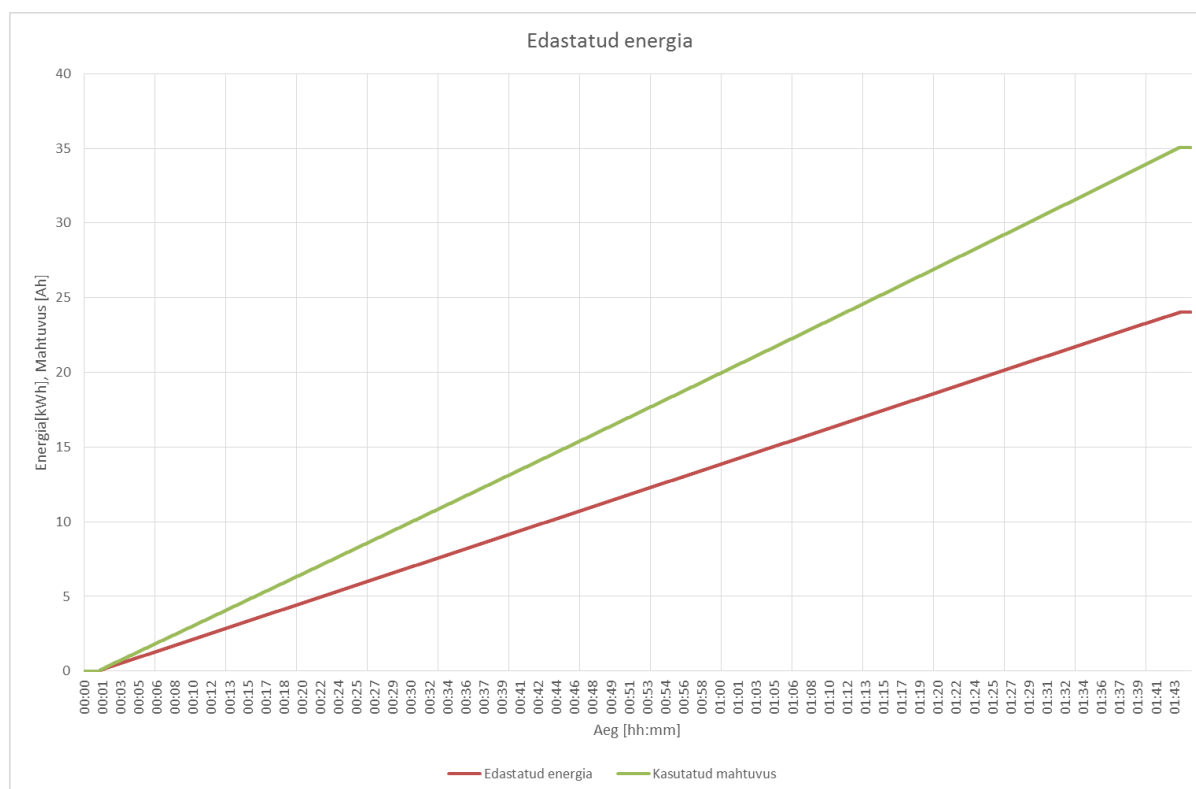
Ülaltoodud jooniselt on selgelt eristatav tühjendamistegevuse algus ja lõpp, mis kaasneb pinge järsu muutusega. Seda põhjustab alalisvoolu poolel asuva kontaktori K2 sulgemine tegevuse alguses ja avamine tegevuse lõpus. Akukapi klemmidel mõõdetava pingelangemine toob kaasa ka *DCL* voolu piiramise, mis on arvatud *BMS* süsteemi poolt ja sõltub otseselt üksikelementide pingest. Tühjendamistegevuse ajal toimuvate toimingute põhjuse paremaks arusaamiseks on joonisel 7.10 toodud *BMS* süsteemist saadud akuelementide pingemuutuse andmed.



Joonis 7.10 Akuelementide pingemuutused tühjendamisel

Suurem osa katsetuse ajast kestab tühjendamistegevus ilma suurte muutusteta, kuna *DCL* oli jooksvast tühjendusvoolust suurem. Kogu tegevuse jooksul langevad akuelementide pinged sujuvalt, mille tõttu alandatakse ka *DCL* voolu. Kui akude üksikelementide pinge hakkas katsetuse lõpuks kiiremini langema, läks *BMS* süsteemi poolt välja arvatud *DCL* jooksvast tühjendamisvoolust madalamale. Sellisel momendil püüab *RTU* reguleerida tühjendamisvoolu allapoole, mille tõttu läheb aku elementide pinge tagasi ülesse ja *DCL* suureneb. *DCL* voolu suurenemisega reguleerib *RTU* jooksva tühjendamisvoolu tagasi ülesse, mis põhjustab parameetrite võnkumist.

Katsetuse lõpus langeb järsult akude üksikelementide pinge, mis näitab elementide tühjust. *BMS* süsteemi poolt määratud akuelementide laetustaseme karakteristiku alusel korrigeeritakse *SOC* väärtust, mis on näha joonisel 7.9 asuvast graafikust. Tühjendamisetegevus lõpetatakse siis, kui akude üksikelementide pinge alaneb alla lubatud piiri ja *BMS* süsteem seab *DCL* voolu 0 väärtusele ning lõpetab tühjendamistegevuse loasignaali andmise.



Joonis 7.11 Tühjendamistegevusel edastatud energia

Kogutud andmete põhjal oli välja arvatud tegevuse jooksul akudest vabastatud energia ning kasutusel olevate akude mahtuvus. Saadud tulemused on graafiliselt esitatud joonisel 7.11, kust on näha, et vaatamata akuelementide täismahalaadimise saavutamisele, oli kasutatud 35Ah, mis moodustab 87,5% akude nimimahtuvusest. Sellist erinevust võib seletada erinevate prototüübis kasutatavate seadmete ning akude sees toimuvate kadude mõjuga.

7.4 Energiasalvesti laadimis-ja tühjendamistäistsükkel

Käesoleva katsetuse eesmärk on määrata akukapi laadimis- ja tühjendamiskarakteristik ning salvestatud ja vabastatud energia maht täistsükli läbimisel. Antud katsetus ühendab ülalkirjeldatud laadimis- ja tühjendamistegevuse kokku, mille vahele on tehtud 10 minutiline paus prototüübi parameetrite stabiliseerumiseks. Läbides eraldustrafot ja NXA muundurit salvestub võrgust saadud energia akudesse ja vastupidine tegevus alustatakse 10 minuti pärast. Katsetus oli läbi viidud 40A juures ning katsetuse alg- ja lõppandmed on toodud tabelis 7.3

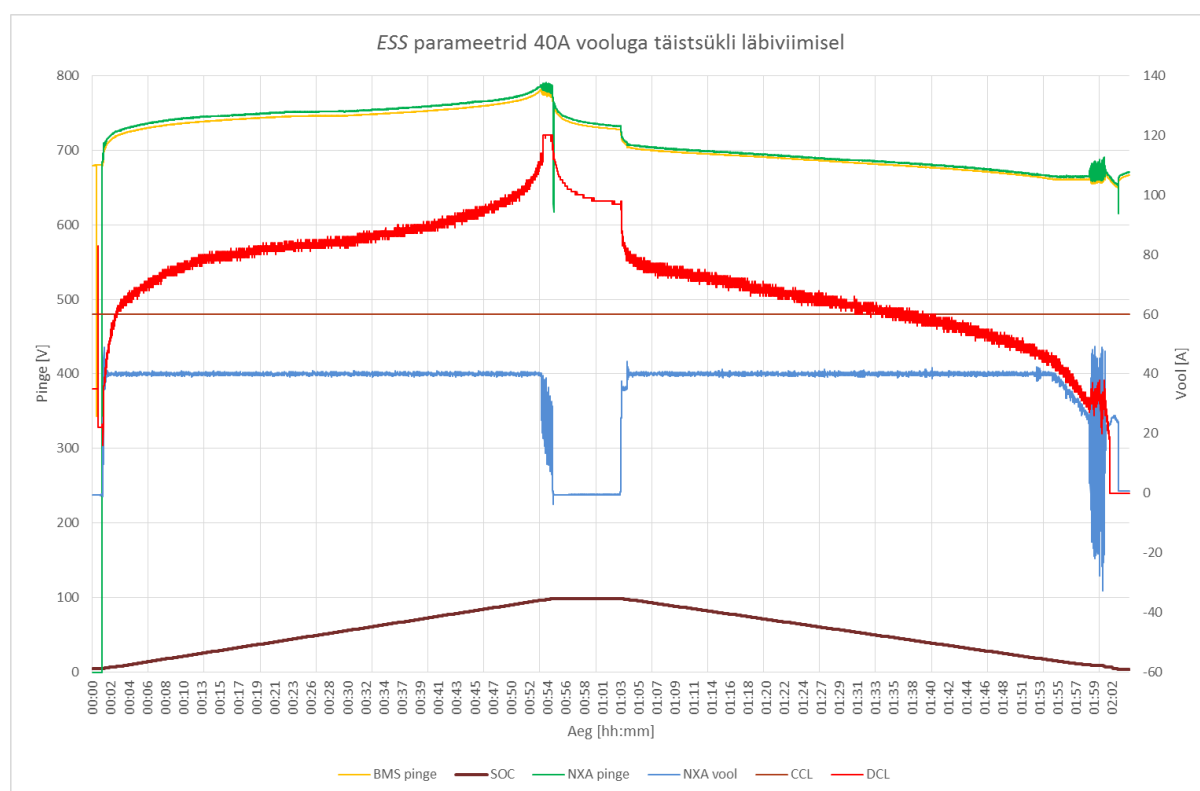
Tabel 7.3 Täistsükli katsetuse alg- ja lõppandmed

Katse kirjeldus:				ESS laadimise/tühjendamise täistsükli läbiviimine 40A vooluga			
Mööteriistad:				Satec, BMS, NXA			
Laadimine				Tühjendamine			
Katse kestvus:		0h 53m		Katse kestvus:		1h 00m	
Kasutatud mahtuvus:		34Ah		Kasutatud mahtuvus:		37Ah	
Esialgne		Lõplik		Esialgne		Lõplik	
SOC:	6%	SOC:	100%	SOC:	100%	SOC:	4%
CCL:	60A	CCL:	60A	DCL:	97A	DCL:	0A
BMS pinge:	679,6V	BMS pinge:	781,3V	BMS pinge:	727,8V	BMS pinge:	649,7V
Vcell max:	3,221V	Vcell max:	3,860V	Vcell max:	3,409V	Vcell max:	3,143V
Vcell min:	2,989V	Vcell min:	2,452V	Vcell min:	3,352V	Vcell min:	2,744V

Katsetuse ajal kogutud ja töödeldud andmed on graafiliselt esitatud joonistel 7.12 ja 7.13.

Nende andmete põhjal võib jälgida kõik laadimis- ja tühjendamistegevuse etappe.

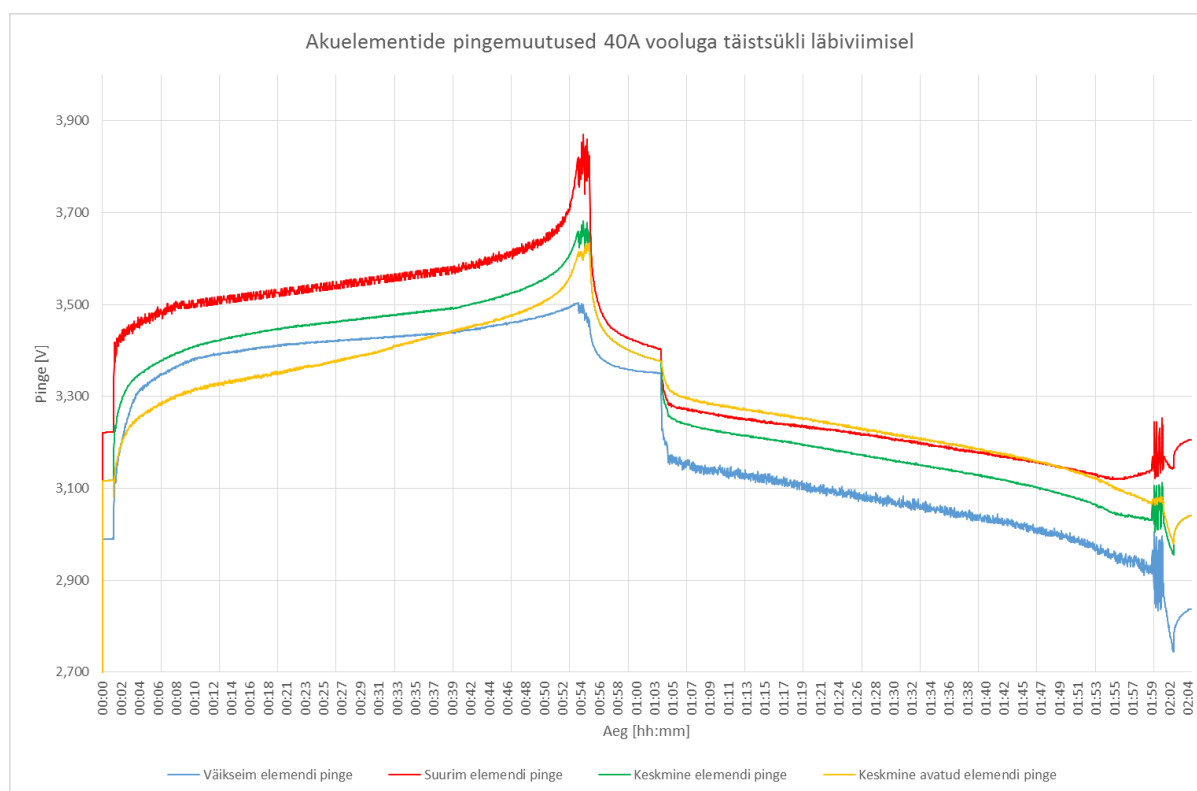
Laadimistegevust alustatakse akukapi klemmidel ja üksikelementide pinge hüppega. Seejärel laetakse akud muutumatu vooluga ja pinge ning *DCL* voolu väärtused kasvavad sujuvalt.



Joonis 7.12 Täistsükli laadimis- ja tühjendamistegevuse karakteristik

Katsetuse ajal ei toimu *CCL* voolu väärtuse piiramist *BMS* süsteemi poolt, kuid alates 00:53 ajahetkest oli laadimisvool korrigeeritud *RTU* poolt, kuna akukapi klemmidel mõõdetav pingeline jõudis *RTU* süsteemis määratud maksimaalse väärtuseni. Selle tõttu toimus edasine laadimine muutumatu pingega ja laadimisvool vähenes sujuvalt. Kui laadimisvoolu väärtus alaneb minimaalsest laadimisvoolust väiksemaks, avatakse kontaktor *K2* ja prototüüp viiakse ooterežiimile üle.

Ooterežiimile üleminekul toimub akukapi klemmidel mõõdetava pingeline järsk langemine. Samal ajal jälgib *NXA* muundur akukapi pinget ja reguleerib enda väljundpinget selliselt, et ta oleks akukapi pingele võrdne. Seda tehakse mõttega, et oleks võimalik vajadusel koheselt viia süsteemi ooterežiimist tühjendamisrežiimile üle. Ooterežiimi aja jooksul stabiliseeritakse akukapi pinget ja ühtlustatakse üksikelementide pinged tänu *BMS* süsteemi balansseerimise funktsioonile. Balansseerimise ajal koormab *BMS* ülelaaditud akude üksikelemente väikse vooluga pingete ühtlustamiseks.

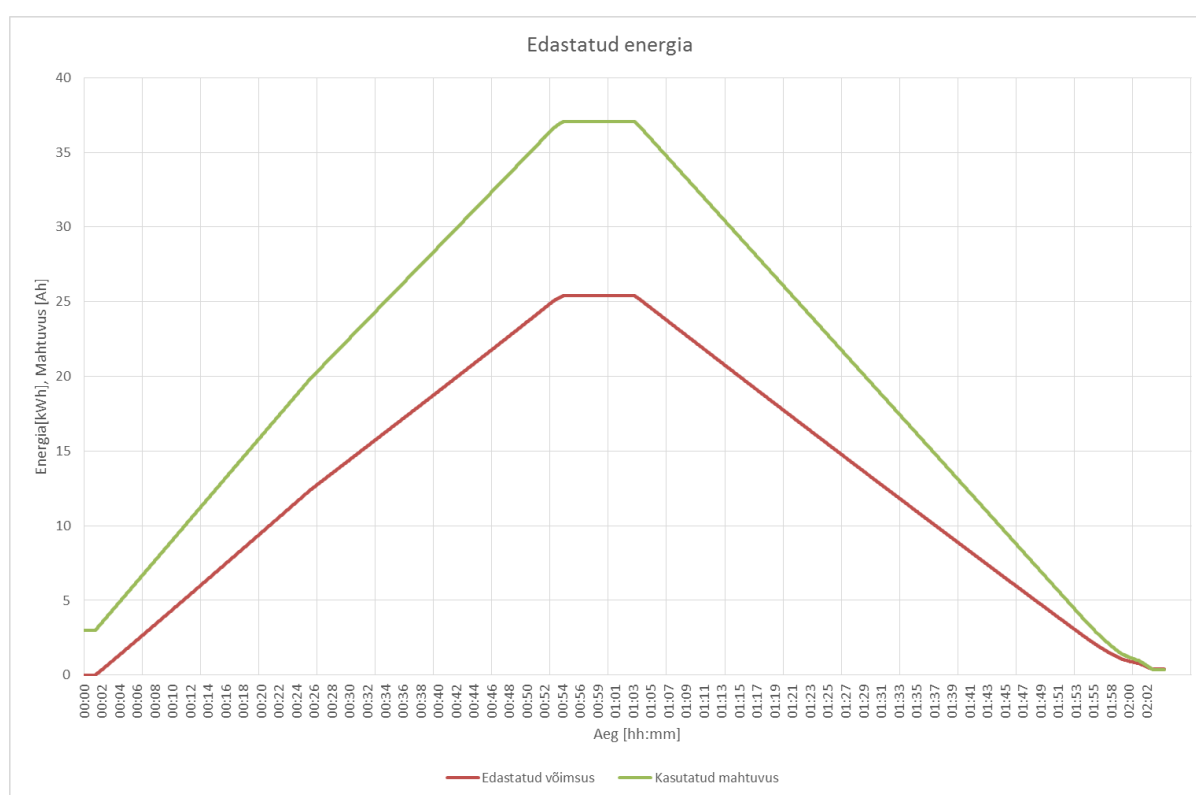


Joonis 7.13 Täistsükli pingemuutused laadimisel ja tühjendamisel

Peale 10 minutilist pausi lülitub prototüüp tühjendamistegevusele ümber. Antud tegevusega kaasneb pingeline järsk muutus, seejärel toimub püsirežiimis tühjendamistegevus. Akukapi pingeline ja *DCL* langevad sujuvalt. Kui akude üksikelementide pingeline hakkab katsetuse lõpuks

kiiremini langema, siis *BMS* süsteemi poolt välja arvatud *DCL* alaneb jooksvast tühjendamisvoolust väiksemaks. Sellisel momendil püüab *RTU* reguleerida tühjendamisvoolu allapoole, mille tõttu läheb akuelementide pinge tagasi ülesse ja *DCL* suureneb. *DCL* voolu suurenemisega reguleerib *RTU* jooksva tühjendamisvoolu tagasi ülesse, mis põhjustab parameetrite võnkumist.

Tühjendamisetgevus lõpetatakse siis, kui akude üksikelementide pinge langeb alla lubatud piiri ja *BMS* süsteem seab *DCL* voolu 0 väärtusele ning lõpetab tühjendamisetgevuse loasignaali andmise. Akude üksikelementide pingemuutused on toodud joonisel 7.13.



Joonis 7.14 Täistsükli läbimisel edastatud energia

Kogutud andmete põhjal oli välja arvatud tegevuste jooksul akudesse salvestatud ja akudest vabastatud energia ning kasutatud akude mahtuvus. Saadud tulemused on graafiliselt esitatud joonisel 7.14, kust on näha, et akudesse salvestatud energia maht praktiliselt langeb akudest vabastatud energia mahuga kokku. Mittevastavust võib seletada erineva mahtuvuse tasemega katsetuse alguses ja lõpus, kust järeldub, et katsetuse alguses olid akud laetud rohkem kui katsetuse lõpus. Seda erinevust võib vaadata ka laetustaseme *SOC* näitaja järgi tabelist 7.3.

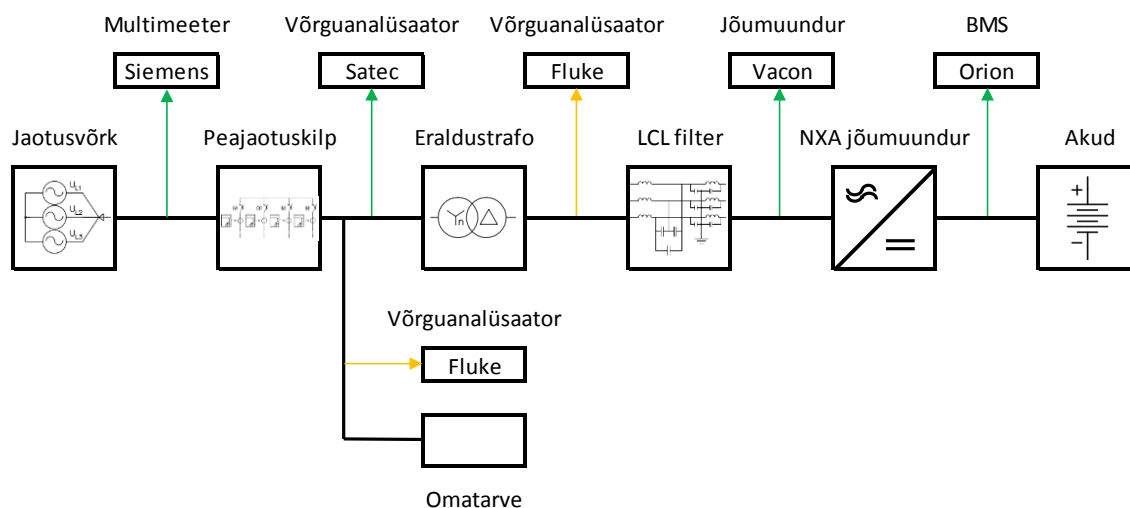
7.5 Energiasalvestiga alajaama kadude arvutamine ja efektiivsuse määramine

Käesolevas punktis arvutatakse katsetuse ajal saadud andmete põhjal süsteemis esinevaid kadusid ja määratakse kogu süsteemi ning erinevate tegevuste efektiivsus. Tulemuste alusel on koostatud kogu süsteemi energijaotuse diagramm.

7.5.1 Kadude arvutamine

Energiasalvesti opereerimisel esinevad süsteemi erinevatel seadmetel negatiivselt mõjuvad kaod, mis tõmbavad süsteemi kasuteguri alla. Põhilised kaod tekivad NXA muunduri seadmes, eraldustrafo ja akude sees. Samuti kadude hulka võib arvestada omatarbe osaga tarbitud võimsus, mida ei ole võimalik salvestada ja tagasi võrku anda.

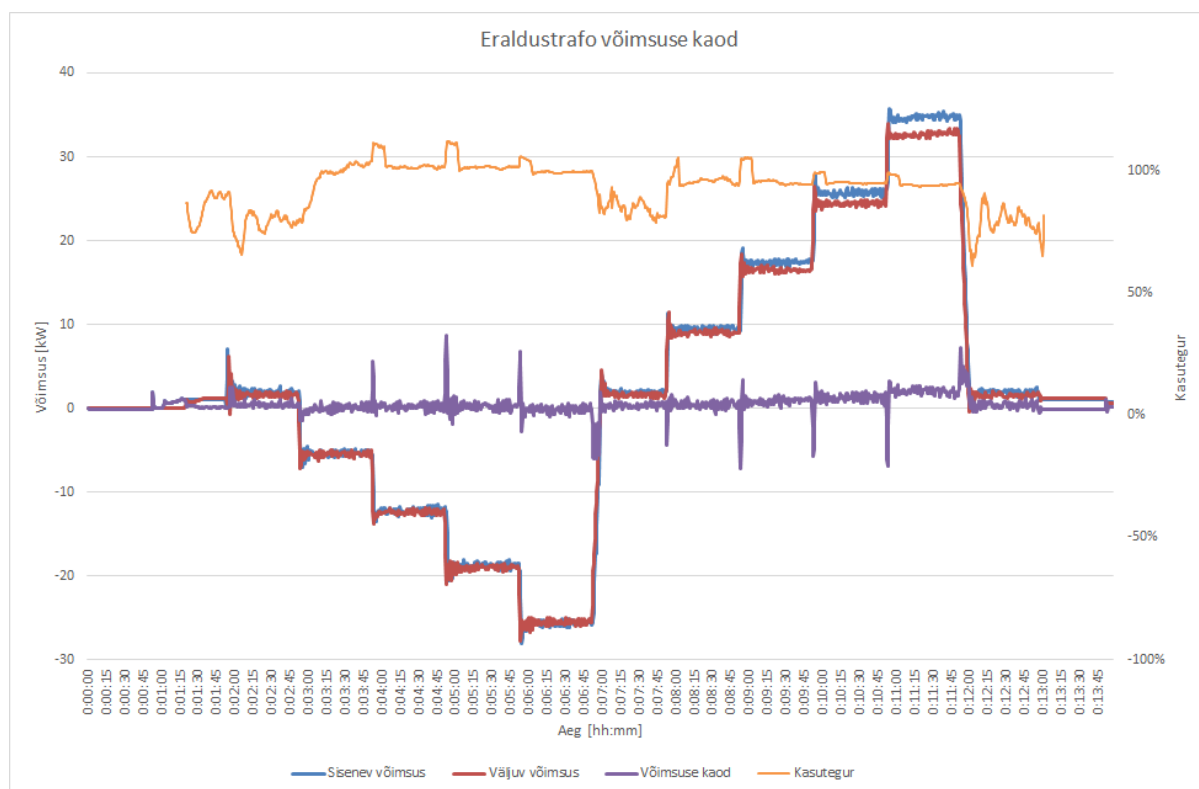
Laadimis- ja tühjendamise tegevuse katsetuse ajal saadud andmete alusel ei ole võimalik kõiki süsteemis olevaid kadusid välja arvutada. Selle eesmärgiga olid läbi viidud lisamõõtmised Fluke 1735 võrguanalüsaatori abil. Joonisel 7.15 on toodud kadude arvutamisel kasutatud mõõteskeem.



Joonis 7.15 Kadude arvutamisel kasutatud mõõteskeem

7.5.1.1 Eraldustrafo kaod

Eraldustrafo kadude määramiseks olid teostatud mõõtmised 10, 20, 30 ja 40A laadimis- ja tühjendamisvoolude juures. Kõik mõõtmise ajal saadud andmed olid dokumenteeritud ja nende alusel koostatud eraldustrafo võimsuskadude graafik, mis on esitatud joonisel 7.16.



Joonis 7.16 Eraldustrafo võimsusekaod

Graafikust on näha, et eraldustrafo kasutegur ületab mõnel ajahetkel 100% piiri, mis on tegelikult võimatu ja põhjustatud mõõtevigadest tulenevast ebatäpsusest ning aegade mittekooskõlastamisest sisendvõimsuse ja väljundvõimsuse graafikute kokkupanemisel. Eraldustrafo kasuteguri väiksema väärtuse saime tühijooksu ajal. See tähendab seda, et eraldustrafo madala koormatavuse korral moodustavad tühijooksukaod hästi suurt osa eraldustrafo sisenevast võimsusest.

Samuti on näha, et eraldustrafo kasutegur on laadimistegevuse ajal veidi väiksem võrreldes tühjendamistegevusega. Seda vahet võib seletada primaar- ja sekundaarmähiste ühendustüübi ja edastatava energia suuna erinevusega ning sellega, et tühjendamisel osaliselt kompenseerib NXA muundur reaktiivvõimsust ja parandab võimsustegurit.

Saadud tulemuste alusel võib teha järelduse, et prototüübi katsetusel kasutatava eraldustrafo kasuteguriks võib lugeda:

- Laadimistegevusel - 99% (võimsuse kaod ca 500W)
- Tühjendamisel – 95% (võimsuse kaod ca 1300W)

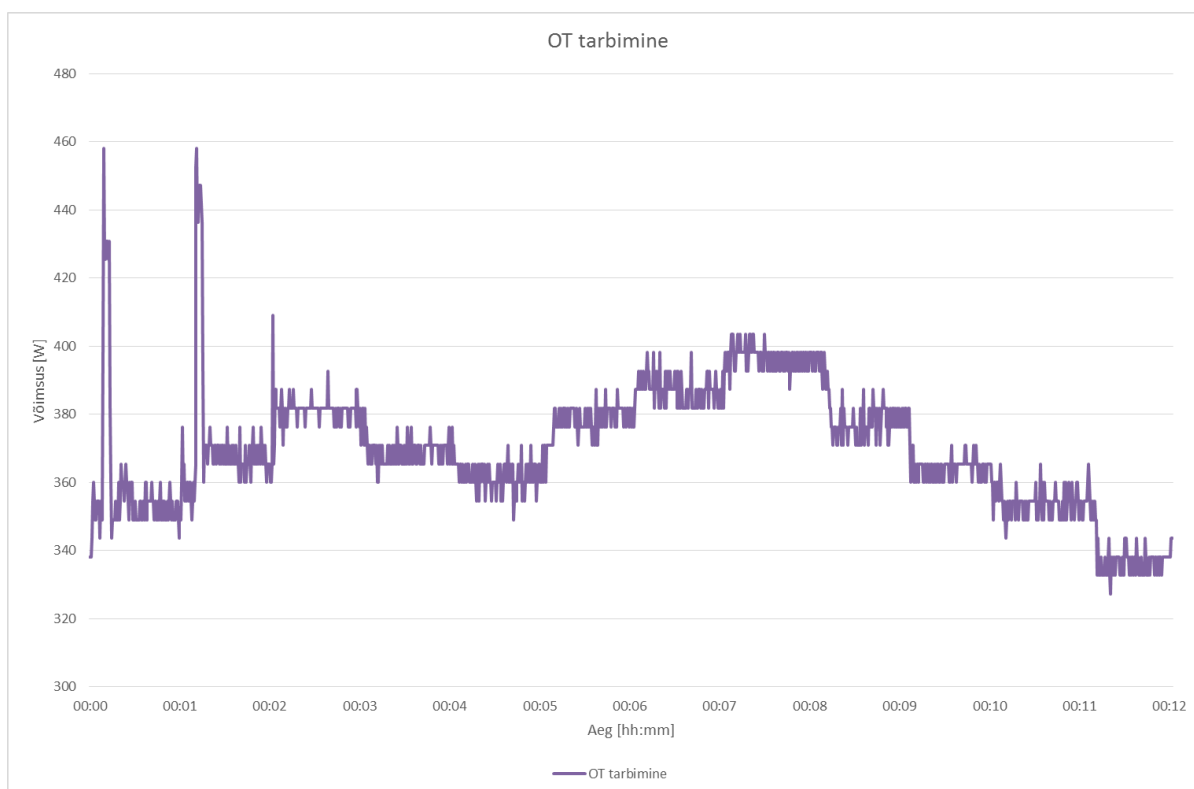
7.5.1.2 Omatarbe kaod

Prototüübi opereerimisel tarbitakse võimsust ka süsteemi omatarbe jaoks. Omatarbe alla kuuluvad sellised tarbijad nagu juhtimisahelate omatarve trafo, RTU, katkematu toiteallikas (UPS), igasugused turvareleed ja muud seadmed, mis tarbivad energiat energiasalvesti süsteemi normaalse opereerimise tagamiseks. Omatarbe võimsuse kaod olid eraldi mõõdetud võrgu analüsaatori abil. Mõõtmise ajal tehtud pilt on toodud joonisel 7.17.



Joonis 7.17 Omatarbe võimsuse kadude mõõtmine

Omatarbe võimsuse kaod olid mõõdetud prototüübi erinevate tegevuste ajal. Töö käigus saadud andmed olid dokumenteeritud ja graafiliselt esitatud joonisel 7.18.



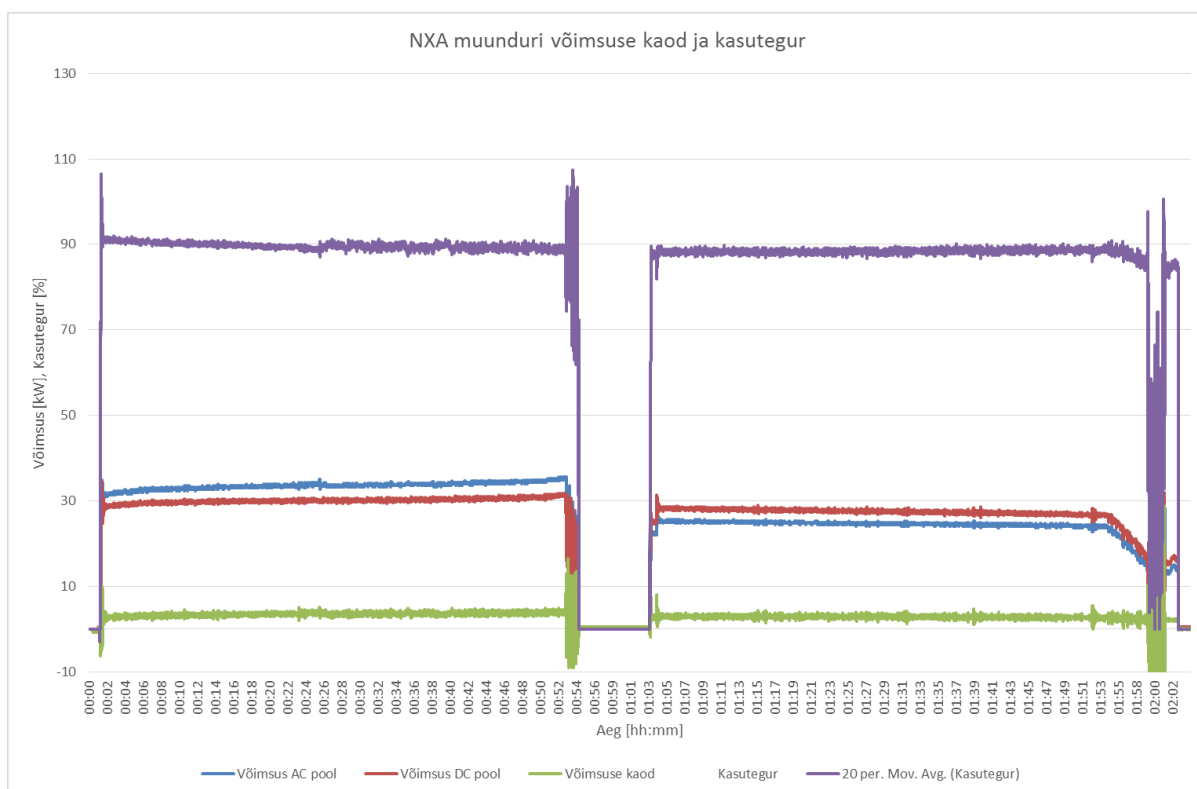
Joonis 7.18 Omatarbe võimsuse kaod.

Ülal toodud graafikust on näha, et erinevate tegevuste ajal varieerub omatarbe võimsuse tarbimine 340...400W vahel. Lülitite FX ja Q01 sisselülitamise ajal tekkisid tarbitava võimsuse hüpped 460W väärtuseni, mida ei võeta arvesse lühiajalise sündmuse tõttu.

Kuna erinevate tegevuste ajal on võimsuse tarbimiserinevuse suurus suhteliselt väike ja süsteemi täistsükli läbivaatamisel kompenseeritakse laadimis- ja tühjendamistegevusel tekkivat erinevust, siis kasutame omatarbe võimsuseks 390W. Arvestada tuleb ka sellega, et omatarbe tarbijat pingestatakse liinijuhtmetest L1 ja L2. Lihtsustamise huvides jagame omatarbe võimsuse kolme faasi vahel, mis annab meile omatarbe võimsuseks faasis 130W.

7.5.1.3 NXA AC/DC muunduri kaod

NXA muunduri võimsuse kaod arvutatakse laadimis- ja tühjendamistegevuse täistsükli katsetuse ning lisamõõtmise ajal saadud tulemuste alusel. Nende andmete põhjal oli koostatud NXA muunduri võimsuse kadude ja kasuteguri graafik, mis asub joonisel 7.19.



Joonis 7.19 NXA muunduri võimsuse kaod ja kasutegur

Graafikult on näha, et nii laadimis- kui ka tühjendamistegevusel on NXA muunduris tekivad võimsuse kaod suhteliselt samal tasemel. Tühjooksu ajal kasutatakse kogu NXA muunduriga tarbitavat võimsust selle omatarbeks, jahutuseks ning alalisvoolu poolel pinge hoidmiseks akude pingel tasemel. Kasuteguri väärtus kukub nullini. Seda põhjendatakse sellega, et samal ajal ei toimu laadimist või tühjendamist ehk mingit kasulikku tööd ei tehta. Mõnel ajahetkel ületab kasuteguri väärtus 100% piiri, mis on tegelikult võimatu ja põhjustatud mõõtevigadest tulenevast ebatäpsusest ning aegade mittekooskõlastamisest erinevate graafikute kokkupanemisel.

Töö käigus saadud andmete põhjal võib öelda, et NXA muunduri kasuteguriks võib lugeda:

- Laadimisel – 89,4% (võimsuse kaod ca 3500W)
- Tühjendamisel – 88,4% (võimsuse kaod ca 2800W)

7.5.1.4 Aku elementides tekkivad kaod

Laadimis- ja tühjendamistegevuse käigus eraldatakse akude sisetakistuse tõttu kaovõimsust. Akude sisetakistust võib põhjendada aku sees olevate metallide, sisekomponentide, materjalide kontakti, keemiliste reaktsioonide kiiruse ning ka aku ühenduste tagajärjega. Kasutades Ohmi seadust (7.1) ja võimsuse valemit (7.2), võib aku sees tekkivate võimsuse kadude väärtust avaldada valemiga (7.3):

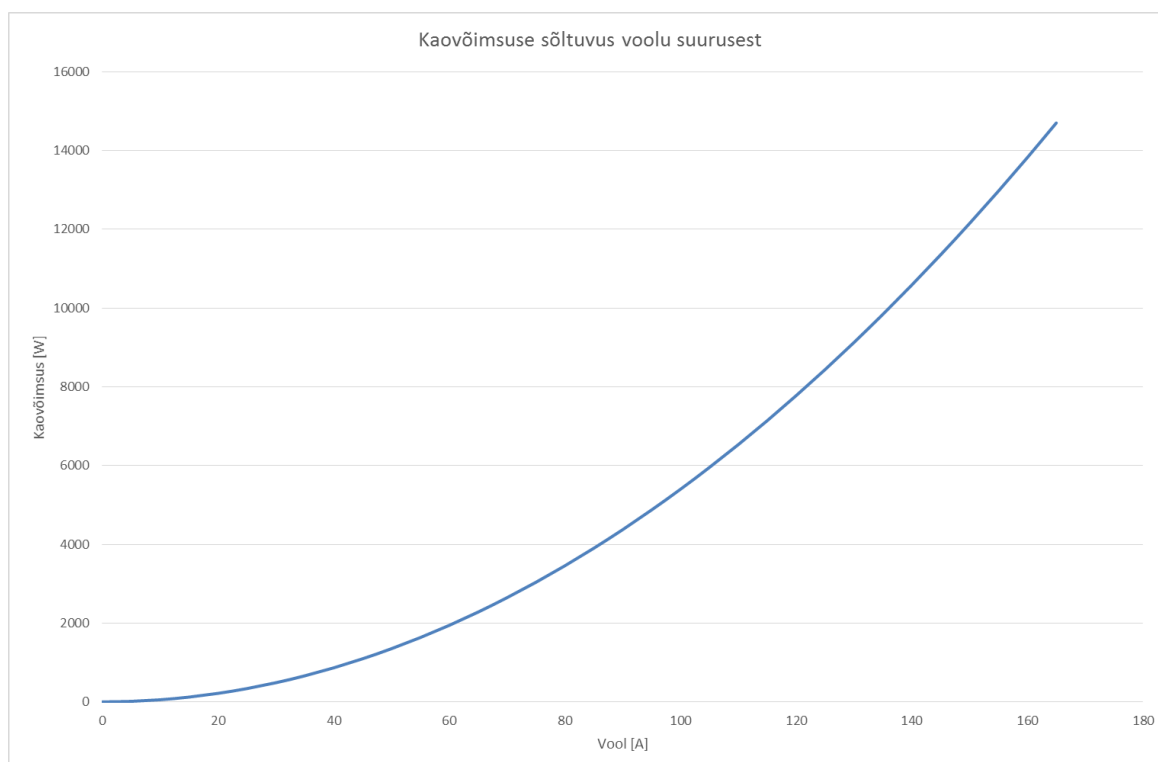
$$I = \frac{U}{r} \quad (7.1)$$

$$P = U \cdot I \quad (7.2)$$

$$P = I^2 r \quad (7.3)$$

kus: P - aku sisetakistusel hajuv võimsus,
 r - aku sisetakistus,
 I - laadimis- või tühjendamisvool.

Valemist on näha, et muutumatu takistuse korral sõltub aku sees eraldatav võimsus (sisetakistusel hajuv võimsus) otseselt laadimis- ja tühjendamisvoolude suuruselt. Sisetakistusel eralduv kaovõimsuse sõltuvus voolu suuruselt on graafiliselt esitatud joonisel 7.20.



Joonis 7.20 Kaovõimsuse sõltuvus voolu suurusest

7.5.2 Efektiivsuse arvutamine

Prototüübi efektiivsuse all mõeldakse laadimis- ja tühjendamistegevuse kasutegurit, mis omakorda avaldub kasuliku energia ja tarbitud energia suhtena. Meie juhul võib süsteemi kasuteguri jagada kaheks osaks:

- Kasutegur süsteemi laadimisel
- Kasutegur süsteemi tühjendamisel

Arvestades eraldustrafo, omatarbe, NXA muunduri ja akukapi seadmetes tekkivate võimsuse kadusid, koostame kolm valemit prototüübi laadimise (7.4), tühjendamise (7.5) ning täistsükli (7.6) efektiivsuse ehk kasuteguri määramiseks:

$$\eta_{\text{laadimisel}} = \frac{P_{\text{akusse}} - \Delta P_{\text{aku}}}{P_{\text{akusse}} + P_{\text{ML}} + P_{\text{ETL}} + P_{\text{OT}}} \quad (7.4)$$

$$\eta_{\text{tühjendamisel}} = \frac{P_{\text{akudest}} - P_{\text{MT}} - P_{\text{ETT}} - P_{\text{OT}}}{P_{\text{akudest}} + \Delta P_{\text{aku}}} \quad (7.5)$$

$$\eta_{\text{tsüklil}} = \frac{P_{\text{akusse}} - \Delta P_{\text{aku}}}{P_{\text{akusse}} + P_{\text{ML}} + P_{\text{ETL}} + P_{\text{OT}}} \cdot \frac{P_{\text{akudest}} - P_{\text{MT}} - P_{\text{ETT}} - P_{\text{OT}}}{P_{\text{akudest}} + \Delta P_{\text{aku}}} \quad (7.6)$$

kus: η - kasutegur,

P_{aku} - aku keemiasse salvestuv või sealt eralduv võimsus,

$P_{\text{ML}}, P_{\text{MT}}$ - jõumuunduri kaovõimsus laadimisel ja tühjendamisel,

$P_{\text{ETL}}, P_{\text{ETT}}$ - eraldustrafo kaovõimsus laadimisel ja tühjendamisel,

P_{OT} – omatarbele kasutatav võimsus,

ΔP_{aku} - aku kaovõimsus (sisetakistuselt hajuv võimsus), mis leitakse valemiga (7.3).

Prototüüpi salvestatud ja sealt vabastatud võimsuste väärtuseid mõõdetakse akukapi klemmidel ning aku sees tekkivad võimsuse kaod jäävad sel juhul arvestamata. Ülaltoodud valemite lahutatakse laadimistegevusel akudes tekkivad võimsuse kaod akudesse salvestatud võimsuse väärtusest ja tühjendamisel liidetakse vabastatud võimsusele juurde.

Kuna laadimise, tühjendamise ning täistsükli katsetuse ajal kõiguvad saadud tulemused +/- 3...5% ulatuses, siis kasuteguri arvutamiseks olid võetud keskmestatud lähteandmed. Prototüübi kasuteguri arvutamiseks olid kasutatud 40A juures täitsükli katsetuse ajal saadud tulemused, kuna antud katsetus hõlmab nii laadimist kui ka tühjendamist. Arvutuse algandmed on toodud tabelis 7.4.

Tabel 7.4 Kasuteguri arvutuse algandmed

P_{akusse}	30100	P_{akust}	26500
I_{akusse}	40,9	I_{akust}	38,8
P_{ML}	3500	P_{MT}	2800
P_{ETL}	1300	P_{ETT}	500
r_{aku}	0,54	P_{OT}	130

Paneme algandmed ülal esitatud valemitesse (7.4...7.6) ja arvutame süsteemi kasutegurid välja:

$$\eta_{laadimisel} = \frac{30100 - 40,9^2 \cdot 0,54}{30100 + 3500 + 1300 + 130} = 0,833$$

$$\eta_{tühjendamisel} = \frac{30100 - 40,9^2 \cdot 0,54}{30100 + 3500 + 1300 + 130} = 0,844$$

$$\eta_{tsükkel} = \frac{30100 - 40,9^2 \cdot 0,54}{30100 + 3500 + 1300 + 130} \cdot \frac{26500 - 2800 - 500 - 130}{26500 + 40,9^2 \cdot 0,54} = 0,7$$

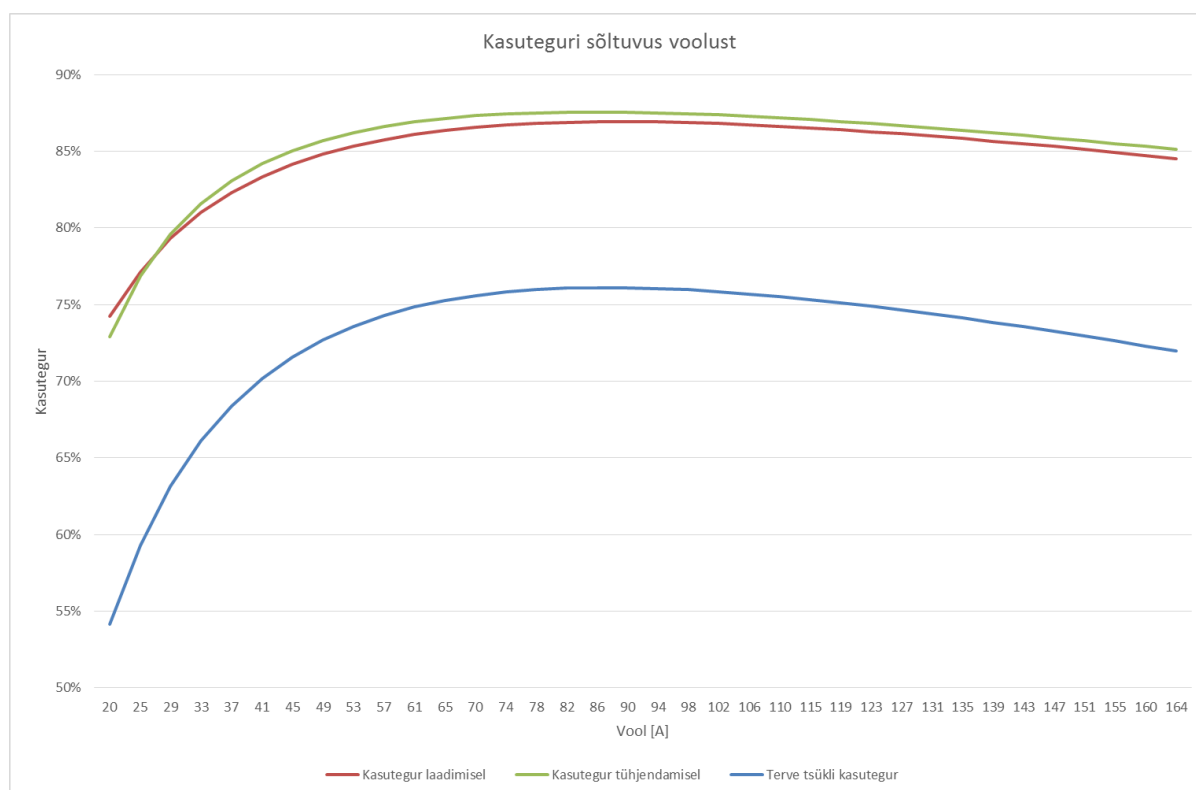
Saadud tulemust võrdleme katsetuse ajal vabastatud ja tarbitud energia mahu suhtega (7.7). Käesolevad energia mahtude andmed olid mõõdetud prototüübi ja TTÜ võrgu liitumiskohas multimeetri vahendusel.

$$\eta_{tsükkel} = \frac{E_{vabastatud}}{E_{tarbitud}} \quad (7.7)$$

$$\eta_{tsükkel} = \frac{80100kWh}{107900kWh} = 0,74$$

Multimeetri andmete põhjal leitud kasuteguri väärtus erineb veidi valemist (7.6) arvutatud väärtusest. Seda vahet võib põhjendada kasuteguri arvutamiseks võetud keskmestatud andmetega ja seadmete mõõteveaga süsteemi kadude arvutamisel.

Kasuteguri arvutamiseks kasutatud valemist on näha, et kasuteguri mõjuvaks muutujaks on laadimis- või tühjendamisvool. Voolu muutmisel muutub nii edastatava energia maht kui ka akudes eraldatav kaovõimsuse suurus. Sõltuvuse visualiseerimiseks oli koostatud kasuteguri voolust sõltuvuse graafik, mis on toodud joonisel 7.21.



Joonis 7.21 Kasuteguri sõltuvus laadimis- ja tühjendamisvoolust

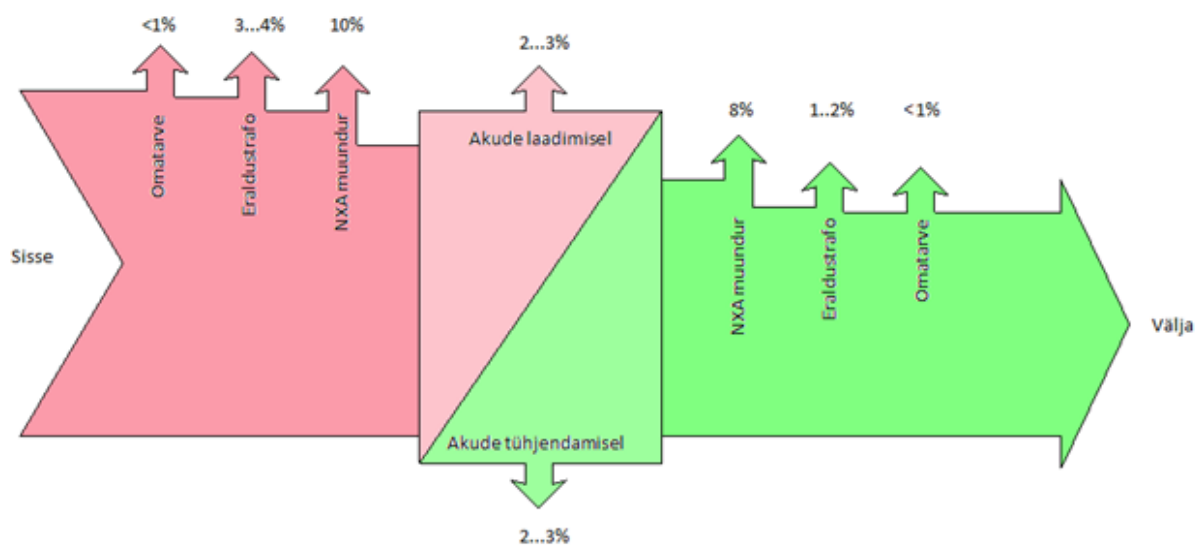
Saadud andmete põhjal võib teha järelduse, et laadimis- ja tühjendamisvoolu suurenemisega tõuseb ka kasuteguri väärtus enda maksimaalse väärtuseni. Kasuteguri maksimumi saavutatakse ca 90A juures, mis on $\eta = 86,9\%$ laadimisel ja $\eta = 87,5\%$ tühjendamisel ning $\eta = 76,1\%$ täistsükli korral. Kui laadimis- või tühjendamisvool kasvab üle 90A, siis hakkab prototüübi kasutegur langema. Siit võib avaldada laadimise ja tühjendamise optimaalse voolu $I_{opt}=90A$, millega aku laadimisel või tühjendamisel on laadimis-ja tühjendamistsükli kasutegur maksimaalne.

Akude laadimisel või tühjendamisel optimaalsest voolust I_{opt} väiksema vooluga, hakkab süsteemi kasutegur langema sellepärast, et omatarbe, eraldustrafo ja jõumuunduri võimsuse kaod jäävad sõltumata aku laadimis- ning tühjendamisvoolust praktiliselt samaks, hakates väikese vooluga aku laadimisel või tühjendamisel kasutegurit alla kiskuma. Akude laadimisel või tühjendamisel optimaalsest voolust I_{opt} suurema vooluga, hakkab süsteemi kasutegur vähenema aku sisetakistusel r tekkiva võimsuse kadude kasvamise tõttu.

Nii väikse mahtuvusega akude laadimist ei ole praktiliselt võimalik optimaalse vooluga teostada, kuna sellisel juhul ei võimalda *BMS* süsteem elementide liiga suurt pingete ebahühtlust kompenseerida. Arendatava alajaama energia salvestamiseks hakatakse kasutama suurema mahtuvusega akusid, mis võimaldab nii laadida kui ka tühjendada suuremate voolude juures.

7.5.3 Energia jaotamine

Põhinedes süsteemi võimsuste kadude ja kasuteguri arvutamisel saadud andmetel oli tulemuste visualiseerimiseks koostatud energia jaotuse diagramm, mis on toodud joonisel 7.22.



Joonis 7.22 Energia jaotuse diagramm

Diagrammilt on näha, et suuremat osa energiast ehk 8...10% kulutatakse NXA muunduri kadudele. Seda võib seletada sellega, et jõumuunduri nimivõimsus (176kW) on tunduvalt suurem kui tegelik laadimisel ja tühjendamisel kasutatav võimsus. Süsteemi alakoormuse puhul läheb nii võimsa muunduri jahutus ja omatarve liiga kaalukaks, mis omakorda tõmbab kasuteguri alla.

Prototüübi katsetusel tekivad suhteliselt suured kaod elektrienergia eraldustrafo läbimisel. Enamikel juhtudel varieeruvad eraldustrafo de kasuteguri väärtused vahemikus 98...99 %. Prototüübis kasutatava eraldustrafo kasutegur 95...98% on põhjustatud massiivsest südamikust, mis toob omakorda kaasa suured tühijooksukaod. Kasutades suurema kasuteguri väärtusega eraldustafot võib parandada kogu süsteemi tootlikkust.

Laadimis- ja tühjendamistegevuse ajal varieerus akuelementide sees tekkivate võimsuskadude suurus vahemikus 2...3%. Akude laadimis- ja tühjendamisvoolu suurenemisega kasvab ka akude sisetakistusel hajuv võimsus.

Käesolevas peatükis esitatud tulemuste alusel võib teha järelduse, et energiasalvesti laadimis- ja tühjendamistegevuste maksimaalse kasuteguri saavutamiseks peavad nii akupatareid kui ka jõumuundur olema valitud vastavalt vajadusele. Energiasalvesti laadimis- ja tühjendamistegevuse kasuteguri suurendamiseks tuleb kasutada võimalikult väikeste kadudega jõumuundurit ja akusid. Akude võimsuste kadude vähendamiseks on tarvis valida võimalikult väiksema sisetakistusega akuelemente. Jõumuunduri valimisel tuleb arvestada mitte ainult selle jõuahelas esinevate kadudega, vaid ka muunduri enda jahutamiseks ning juhtimiseks minevate kadudega.

Kokkuvõte

Käesoleva lõputöö ülesandeks oli uurida akupatareidel töötava energiasalvestiga alajaama ehitust ja tööpõhimõtet ning olemasoleva prototüübi abil katseliselt määrata Li-ioon energiasalvesti laadimis- ja tühjendamiskarakteristikud. Uurimise ja katsetuse käigus saadud teadmiste põhjal esitati laienduse võimalused süsteemi võimsuse suurendamiseks ning energiasalvesti kasuteguri väärtused erinevate tegevuste korral.

Magistritöö käigus vaadeldi traditsiooniliste võrkude kasutamisega seotud probleeme. Tarkvõrkude kasutuselevõtmine võimaldab tänapäevaste vajadustega seotud väljakutsete ning probleemide lahendamist. Põhinedes töö käigus tehtud uuringutele olid esitatud põhilised võrkude arengusuunad ja toodud välja nendest tulenevad eelised.

Töö käigus käsitleti energiasalvestuse süsteeme, mis on üks põhilistest arenenud võrkude elementidest. Analüüsides enimlevinud elektrienergia salvestamise tehnoloogiat oli välja selgitatud, et mikrovõrgu rakenduse jaoks sobivad kõige paremini akupatareidel töötavad süsteemid (*ESS*), mis põhinevad pliiakudel ja liitium-ioon akudel. Samuti vaadati läbi turul juba olemasolevad akupatareidel töötavad elektrienergia salvestamissüsteemid ja toodi välja nende kasutamise plussid.

Arendatava süsteemi tööprintsipi paremaks mõistmiseks vaadeldi täpsemalt alajaama kasutamise eesmärke ja uuriti võtmeseadmete kasutamise otstarvet ning karakteristikuid. Samuti toodi välja seadmete omavahelised seosed lihtsustatud plokk skeemiga ja nende seadmete paigutus alajaama korpuses.

Käesolevas magistritöös uuriti *ESS* mooduli töötamise printsiipe ja kirjeldati üksikasjalikult selles toimuvaid tegevusi plokk skeemide baasil. Siinkohal analüüsiti tegevuste käigus töö parameetrite valiku põhimõtteid ja nende muutmisest tulenevaid tagajärgi süsteemis.

Kasutades *ESS* tegevuste uurimise käigus saadud teadmisi ja mikrovõrgule esitatud tehnilisi nõudeid, koostati mikrovõrkudes toimuvate põhiliste protsesside algoritmid *ESS* süsteemi juhtimiseks. Käesolevad protsessid võimaldavad mikrovõrgu rakenduse opereerimist autonoomses režiimis põhinedes selle parameetritel. Koostatud protsesside plokk skeemide

alusel kirjeldati põhjalikult režiimi valiku põhimõtteid ja laadimis- ning tühjendamisprotsesside algoritme.

ESS süsteemi ehituse uurimisel ja põhjaliku tegevuste algoritmide ning mikroõrgu protsesside analüüsimisel koguti andmeid edasitöötlemiseks. Saadud andmete põhjal oli pakutud 2 varianti *ESS* süsteemi nimivõimsuse laiendamiseks vahemikus 150kW kuni 10MW. Nende variantide võrdlev analüüs võimaldas jagada nad kahte gruppi vastavalt laiendatavale võimsusele.

Tänu olemasolevale mikroõrku ühendatud prototüübile, viidi läbi erinevad testid selleks, et määrata süsteemi laadimis- ja tühjendamiskarakteristikud elektrienergia salvestamisel. Katsetuse käigus jälgiti prototüübi laadimis- ja tühjendamistegevuse juhtimisloogika täitmist, mis tagab prototüübi töötamise optimaalses režiimis. Katsetuste tulemuste põhjal arvutati *ESS* optimaalsed laadimis- ja tühjendamisvoolud ning teostati süsteemi efektiivsuse arvutus. Saadud andmed võeti arvesse mikroõrgu rakenduses toimuvate protsesside algoritmide koostamisel *ESS* süsteemi juhtimiseks.

Läbiviidud uuring näitas, et elektrienergia salvestamissüsteem on väga oluline uute moderniseeritud võrkude jaoks. Elektrienergia salvestamissüsteemi kasutamine annab uued võimalused ja on perspektiivne element olemasolevate võrkude moderniseerimisel.

Töö käigus saadud tulemused lähevad kasutusse päikeseelektrijaama arendatava süsteemi mikroõrku integreerimisel. Uuringu käigus saadud andmed on kasulikud *ESS* süsteemi võimsamate moodulite ja mitut moodulit kasutavate laiendatud süsteemide projekteerimisel. Käesoleva töö alusel võib koostada plaani elektrienergia salvestamissüsteemide edasisteks uuringuteks, mis aitavad teha mikroõrguga tööd efektiivsemaks ja autonoomseks.

Käesolevat tööd võib samuti kasutada õppevahendina olemasoleva energiasalvesti prototüübi ehituse ja tööprintsibi ning selle omavahelise seose TTÜ mikroõrguga uurimiseks.

Kirjandus

- [1] D. Biggar ja M. Hesamzadeh, The Economics of Electricity Markets, 2014.
- [2] W. Yu, G. Wen, X. Yu, Z. Wu ja J. Lü, Bridging the gap between complex networks and smart grids, 2014.
- [3] F. P. Sioshansi, Smart Grid - Integrating Renewable, Distributed and Efficient Energy, 2012.
- [4] N. Jenkins, J. Ekanayake ja G. Strbac, Distributed Generation, 2010.
- [5] C. Bayliss ja B. Hardy, Transmission and Distribution Electrical Engineering (4th Edition), 2012.
- [6] „Electrical engineering portal,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://electrical-engineering-portal.com/in-front-of-the-third-electrical-systems-revolution-in-united-states>. [Kasutatud 28 11 2015].
- [7] D. N. Hatziargyriou, Microgrids: Architectures and Control, First Edition, 2014.
- [8] S. Chowdhury, S. Chowdhury ja P. Crossley, Microgrids and Active Distribution Networks, 2009.
- [9] L. Zhang, Y. Dong, Z. Chen, X. Xie, H. Sun ja Z. Liu, „AN INTEGRATED CONTROL STRATEGY OF BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM IN MICROGRID,“ 2013.
- [10] P. Droege, Urban Energy Transition - From Fossil Fuels to Renewable Power, 2008.
- [11] J. Controls, „Battery Energy Density,“ 2014.
- [12] ABB, „EssPro™ Energy Storage Grid Substation. The power to control energy.,“ 2014.
- [13] Siemens, „The modular energy storage system for a reliable power supply.,“ 2014.
- [14] Samsung, „Energy Storage Solutions. Smart Solution for a Green World.,“ 2014.
- [15] Alstom, „MaxSine eStorage. An innovative and efficient solution to renewable integration and grid stability.,“ 2014.
- [16] „Grid Solutions,“ GE & ALSTOM ENERGY, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.gegridsolutions.com/alstomenergy/grid/microsites/grid/about-us/smart-grid/components-of-the-smart-grid/power-electronics/index.html>. [Kasutatud 28 11 2015].
- [17] G. E. Company, „GE Power & Water. Purpose Built Enclosures.,“ 2015.

- [18] „BATTERY ENERGY STORAGE FOR GRID STABILIZATION,“ AEG Power Solutions, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.aegps.com/en/applications/storage-distribution/battery-energy-storage/>. [Kasutatud 28 11 2015].
- [19] „PowerStack for ESS,“ STB CO., LTD., [Võrgumaterjal]. Available: http://www.stbchip.co.kr/en/contents/product/energy-storage-system.htm?sm=2_2_2. [Kasutatud 28 11 2015].
- [20] „GRID ENERGY STORAGE,“ NEC, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.neces.com/products-services/grid-energy-storage-products/>. [Kasutatud 28 11 2015].
- [21] „Energy Storage Solutions,“ BYD, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.byd.com/energy/ess.html>. [Kasutatud 28 11 2015].
- [22] „Energy Storage Systems,“ Liotech, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.liotech.ru/newsection1450>. [Kasutatud 28 11 2015].
- [23] „Energy Storage System,“ Autarsys, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.autarsys.com/en/product/description-of-autarsys-ess/>. [Kasutatud 28 11 2015].
- [24] N. Kularatna, „Energy Storage Devices for Electronic Systems - Rechargeable Batteries and Supercapacitors,“ 2015.
- [25] W. Shi, J. Jiang, S. Li, S. Lin, P. Lin ja F. Wen, „Applications of Battery Energy Storage System,“ 2010.
- [26] M. T. Lawder, B. Suthar, P. W. C. Northrop, S. De, C. M. Hoff, O. Leitermann, M. L. Crow, S. Santhanagopalan ja V. R. Subramanian, „Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications,“ 2014.
- [27] „NXP Grid Converter,“ Vacon, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.vacon.com/products/AC-Drives/VACON-NXP-Grid-Converter/>. [Kasutatud 28 11 2015].
- [28] „ezPAC SA300 | Satec,“ Satec, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.satec-global.com/ezPAC>. [Kasutatud 28 11 2015].
- [29] „WB-LYP300AHA Lithium-ion Power Battery,“ Thunder Sky Winston Energy Group Limited, [Võrgumaterjal]. Available: http://en.winston-battery.com/index.php/products/power-battery/item/wb-lyp300aha?category_id=176. [Kasutatud 28 11 2015].

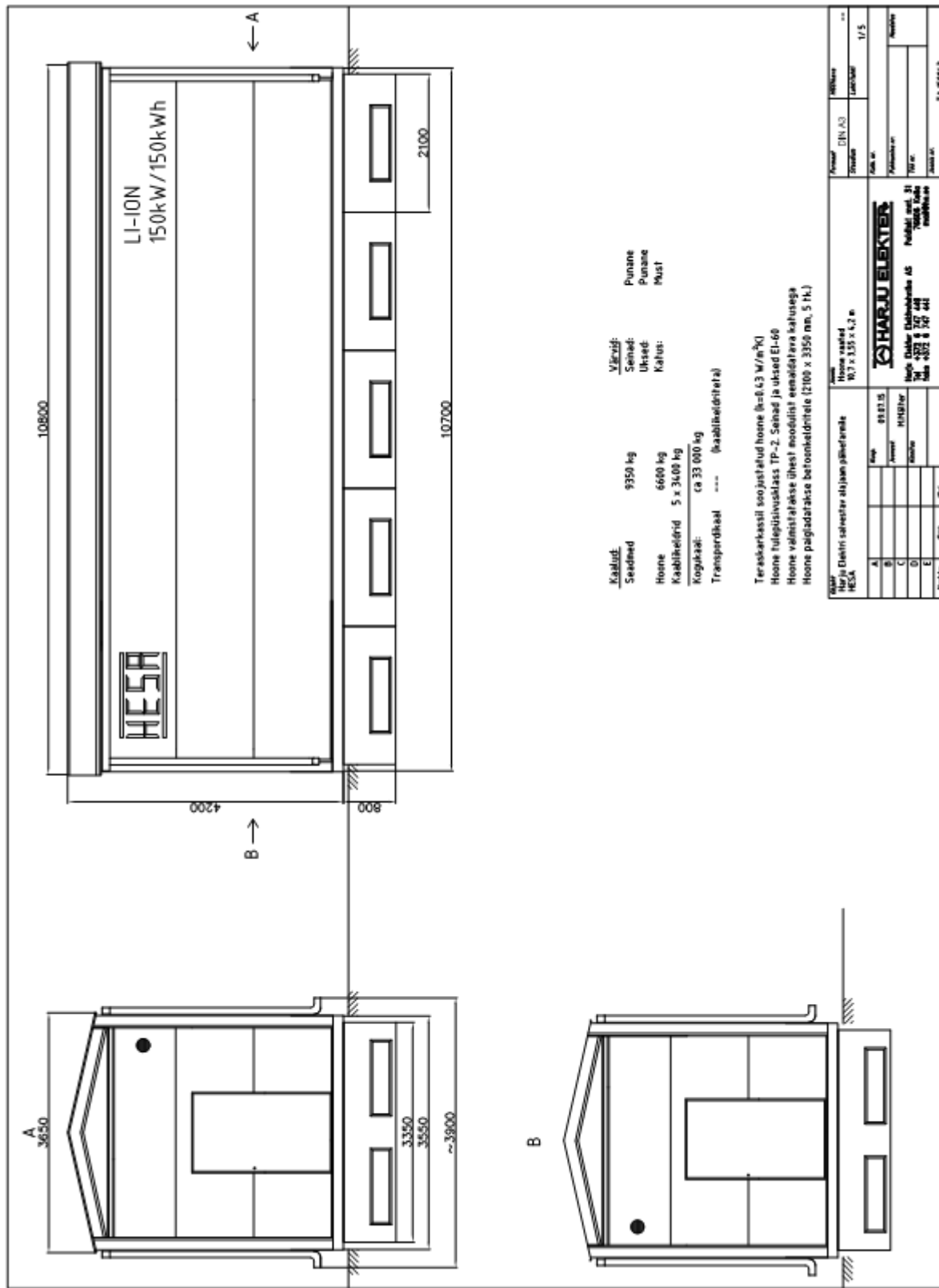
[30] „Orion BMS – Extended Size,“ Orion, [Võrgumaterjal]. Available:
<http://www.orionbms.com/products/orion-bms-extended/>. [Kasutatud 28 11 2015].

[31] F. Badin, Hybrid Vehicles - From Components to System, 2013.

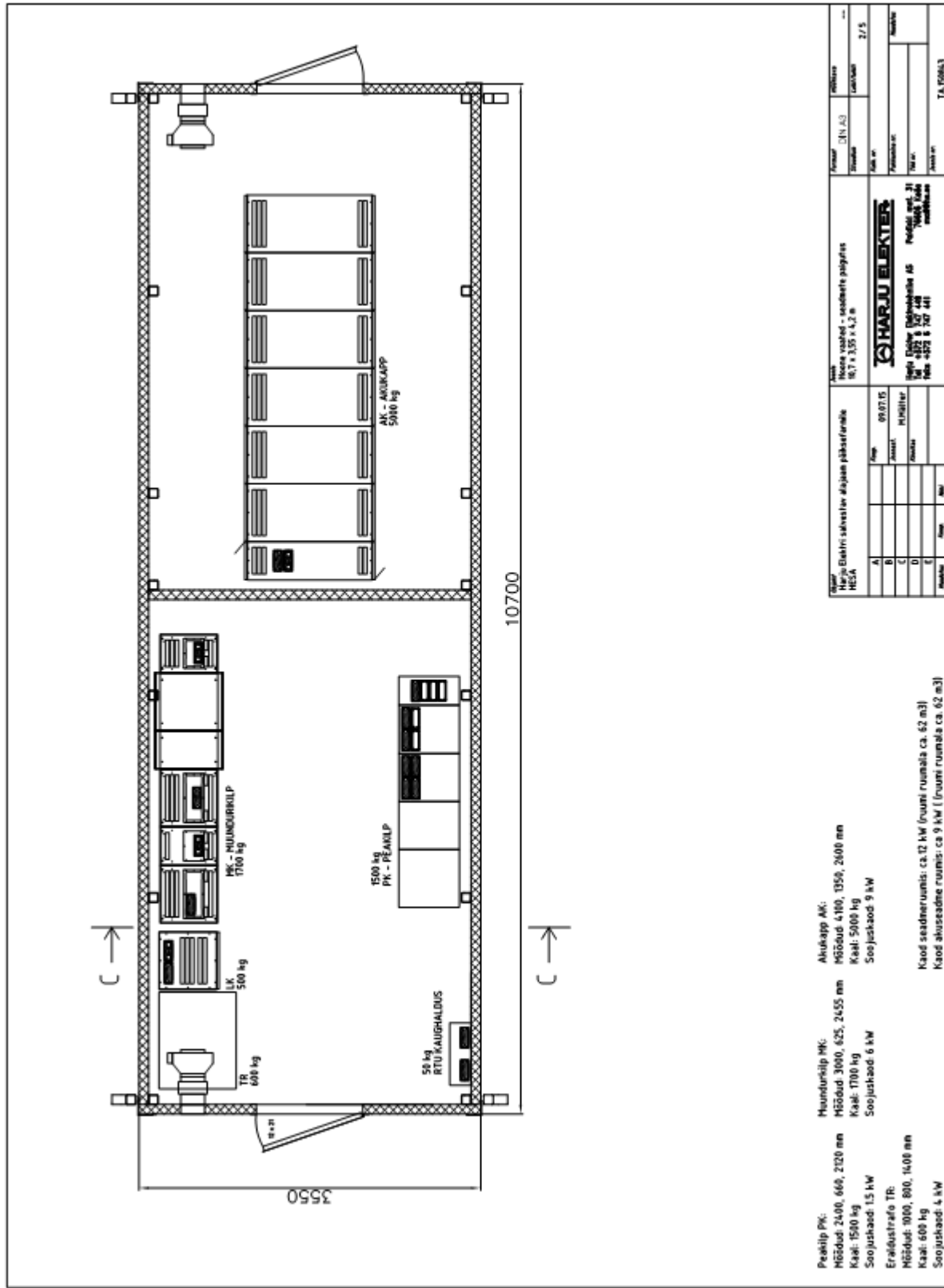
Lisad

1. L.1. Alajaama hoone projekt
2. L.2. Prototüübi 30A vooluga laadimise ja tühjendamise katsetulemused

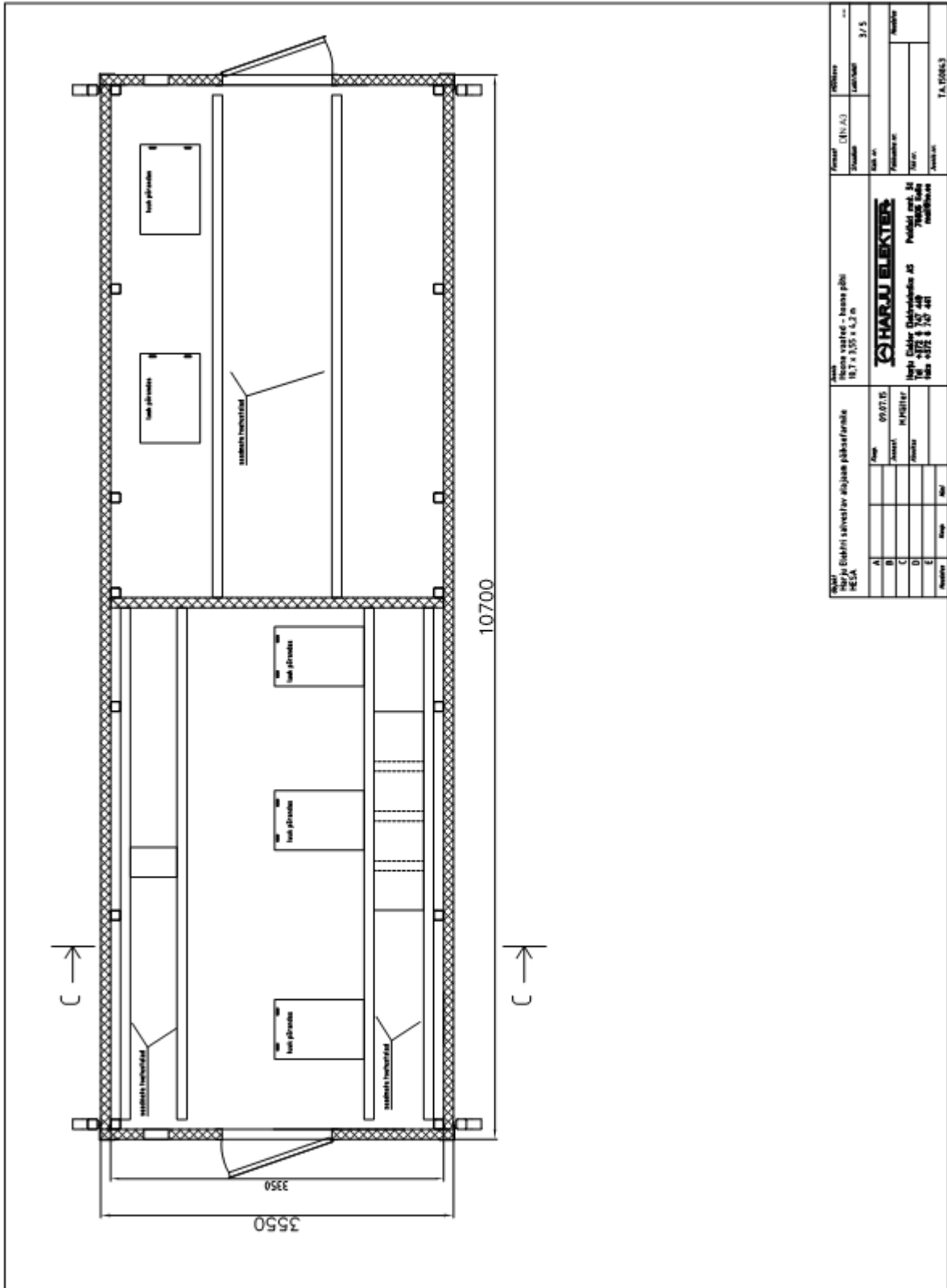
L.1. Alajaama hoone projekt



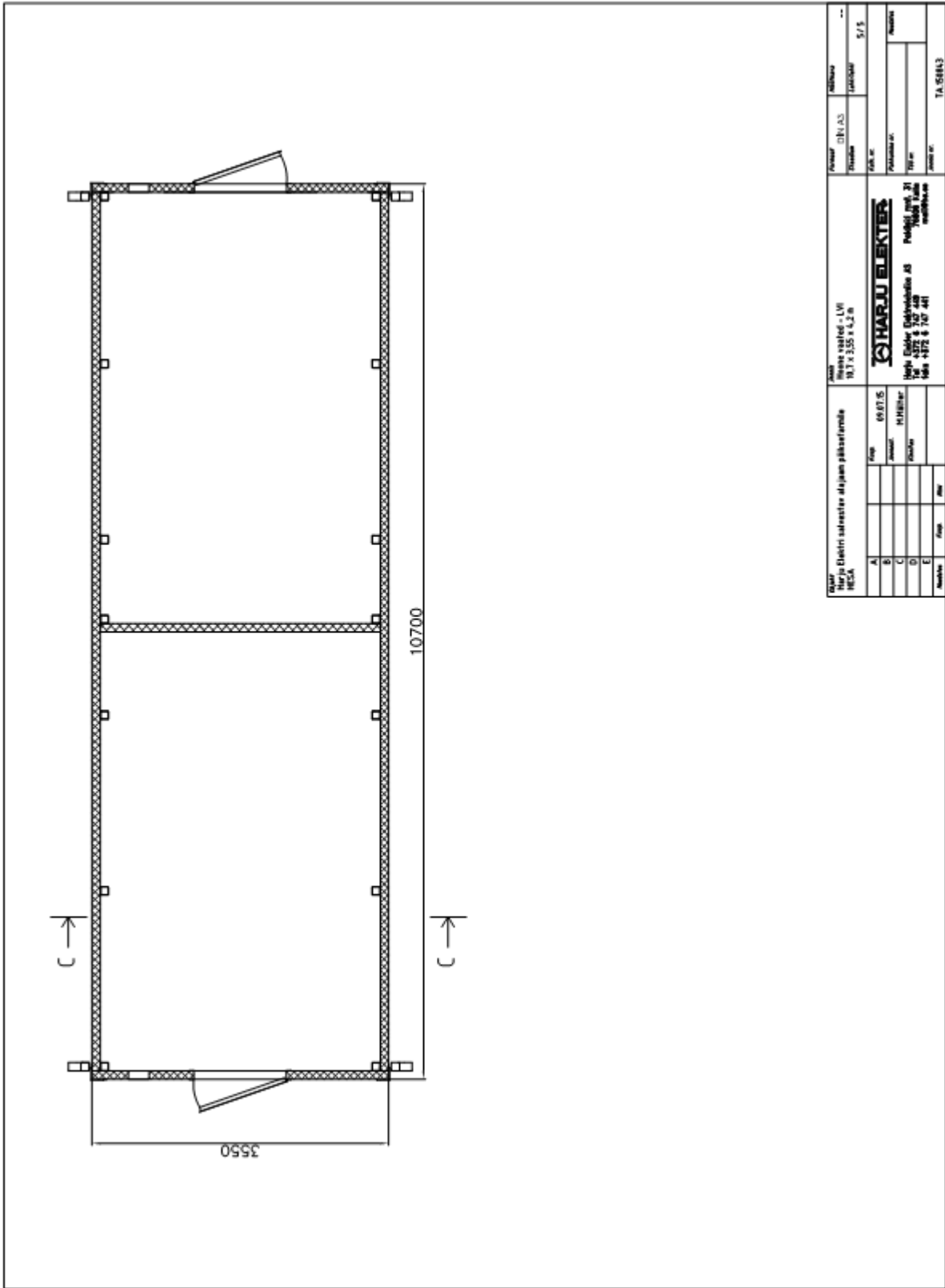
2x18 Tootevõrdus/Väljand/HESHA/HESHA 0001



2 / 29 Tootevõrdlus / Võrdlus / Võrdlus / Võrdlus / Võrdlus



Alus Harju Elektri salvestatav alajäse põhikavand HELLA		Asukoht Niiska vabrik - tootmis pööli 18,7 x 3,35 x 4,2 m		Plokkid (DN, AJ) 3/3/5	
A B C D E Reostus		Kuup 09.07.15	Projektant M Põllit	Kinnitaja M Põllit	Arhitekt M Põllit
IS HARJU ELEKTR Harju Elektri OÜ Kesklinna tee 24 76100 Saue Tel: +372 6 107 107 Faks: +372 6 107 107		Pildid Põllit		Arhitekt M Põllit	
P. A. 1016613					



Nimi: Hirjo Electricin valonkruunujen asennus HESA		Aika: Muutokset - LV 10.11.2025 14.11.2025		Pääty: DRAS Tilaaja: UUSIKATU 5/5	
Koko: 09.11.25 Aika: 11.11.25 Keskä:		Yhteystiedot: HARJU ELEKTR Harjo Electricin valonkruunujen asennus Puhelin: 010 411 21 Faksi: 010 411 21 Sähköposti: info@harju-elektr.fi		Piirustuksen nro.: 10700	
A					
B					
C					
D					
E					
Maailman					
1A-SER13					

Z:\20 Tekniikka\Ajankäyttö\HESA\HESA 0001

L.2. Prototüüpi 30A vooluga laadimis ja tühjendamis katsetulemused

