



INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

PÄIKESEPARGI KATSESTENDI KOOSTAMINE

DESIGN OF A SOLAR PARK TEST BENCH

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Kaarel Kuresoo

Üliõpilaskood: 185114EAAB

Juhendaja: Toomas Vinnal, insener

Tallinn 2022

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

“18” mai 2022

Autor: Kaarel Kuresoo

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö esitatud nõuetele

“18” mai 2022

Juhendaja: Toomas Vinnal

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”20..... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Kaarel Kuresoo

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Pääkesepargi katsestendi koostamine,

mille juhendaja on Toomas Vinnal,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

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

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

_____ (kuupäev)

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

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Kaarel Kuresoo

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Päikesepargi katsestendi koostamine

Kuupäev:
18.05.2022

78 lk (*lõputöö lehekülgede arv koos lisadega*)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): Toomas Vinnal

Töö konsultant (konsultandid): Lauri Kütt

Sisu kirjeldus:

Töö eesmärgiks on projekteerida ja koostada laboratoorne päikesepargi katsestend. Töö juurde kuulub katsestendi põhiseadmete valimine, hankimine ja katsetamine.

Katsestend võimaldab tudengitel analüüsida päikesepargi mõju jaotusvõrgule – stendi saab ühendada laboratoorse jaotusvõrgu mudeli külge. Katsestend loob hea võimaluse inseneritudengitele parema ettekujutuse saamiseks päikeseelektrijaamast ning selle komponentidest.

Lõputöös antakse ülevaade päikeseelektrijaama peamistest komponentidest ning selgitatakse nende ülesannet süsteemis. Lõputöö raames töötatakse välja katsestendi kontseptsioon. Valitakse ja dimensioneeritakse põhiseadmed, kaitsmed, kaablid ja muud olulised komponendid. Koostatakse skeemid ja joonised. Disainitakse päikesepaneelide kaldenurga muutmise mehhanism.

Tulevikus saab edasi arendada katsestendi alalistoiteallika juhtimissüsteemi.

Märksõnad: päikeseelektrijaam, katsestend, fotoelektriline süsteem, inverter, ohutus

ABSTRACT

<i>Author:</i> Kaarel Kuresoo <i>Title:</i> Design of a solar park test bench	<i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis
<i>Date:</i> 18.05.2022	<i>78 pages (the number of thesis pages including appendices)</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology <i>School:</i> School of Engineering <i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Toomas Vinnal <i>Consultant(s):</i> Lauri Kütt	
<p><i>Abstract:</i></p> <p>The purpose of this bachelor's thesis is to design a PV solar park test bench. Designing the solar park test bench includes selecting, obtaining and testing of main components.</p> <p>The solar park test bench enables students to analyse how solar park influences distribution grid. It is possible to connect solar park test bench to the distribution grid labor model. The solar park test bench creates a good opportunity for engineering students to have a better understanding of a solar park and its components.</p> <p>An overview of solar park components and their function is given in the second part of the thesis. Part of the thesis is creating a concept for designing the test bench. Thesis includes choosing appropriate components for the test bench. In order to change the tilt angle of PV panels, it was necessary to design a mechanism.</p> <p>In the future it is possible to develop a control system for the dc supply.</p>	
<i>Keywords:</i> photovoltaic power station, test bench, photovoltaic system, inverter, safety	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Päikesepargi katsestendi koostamine
Lõputöö teema inglise keeles:	Design of a Solar Park Test Bench
Üliõpilane:	Kaarel Kuresoo, 185114
Eriala:	Elektroenergeetika ja mehhatroonika bakalaureusetöö
Lõputöö liik:	Toomas Vinnal, insener
Lõputöö juhendaja:	
Lõputöö kaasjuhendaja: (ettevõtte, amet ja kontakt)	
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	2022/2023 2022/2023 Sügis
Lõputöö esitamise tähtaeg:	18.05.2022

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Töö käigus projekteeritakse päikesepargi stend, mis võimaldab analüüsida päikesepargi mõju jaotusvõrgule ja anda tudengitele hea võimalus õppida tundma päikesepargi komponente ja nende tööpõhimõtet. Valisin selle teema, kuna päikeseenergeetika pakub huvi. Stendi koostamine aitab mul projekteerimisprotsessi läbi teha ning saada aru kuidas süsteem toimib. Lisaks mulle meeldib mõte olla kasuks uutele tudengitele, kes saavad näitliku ja hea õppevahendi.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on projekteerida ja ehitada päikesepargi katsestend.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Katsestendi kontseptsiooni (põhimõtte, skeem ja komponendid) koostamine.
Katsestendi projekteerimine ja ehitamine.
Katseseadme ohutuse tagamine ja kaitseahelad.

4. Lähteandmed

Lähteandmeteks on nõuded, mis tulenevad standarditest ja normdokumentidest, stendi ühilduvus jaotusvõrgu mudeliga ja päikesepargi väljundvõimsus. Lähteandmed töötatakse välja koostöös Lauri Küttiga.

5. Uurimismeetodid

Stendi projekteerimiseks vajalikud ohutusnõuded ja muud nõuded saadakse asjakohastest standarditest.

Töö eesmärgi saavutamiseks kasutatakse TalTech-i NRG laboreid ja seadmeid, et katsestendi ehitamisel esinevad probleemid lahendada.

Kasutatakse joonestamistarkvarasid, et luua mudeleid ja skeeme.

6. Graafiline osa

Joonistel on põhimõtteskeemid ja elektriskeemid. Töös kasutatakse pilte seadmetest. Tabelitena tuuakse välja seadmete elektrilised parameetrid ja erinevate päikeseelemendite tehnoloogiate võrdlus.

Graafiline osa kajastub peamiselt põhiosas, aga suuremad joonised on lisades.

7. Töö struktuur

1. Lõputöö lühikokkuvõte
2. Abstract
3. Lõputöö ülesanne
4. Eessõna
5. Lühendite ja tähiste loetelu
6. Sissejuhatus
7. Teoreetiline alus, päikeseelektrijaam ning selle komponendid
8. Katsestendi projekteerimine ja lähteandmed
 - 8.1. Katsestendi põhimõtteskeem ja kontseptsioon
 - 8.2. Nõuded stendile
 - 8.3. Katsestendi seadmete ja komponentide valik
 - 8.4. Katsestendi CAD mudel
 - 8.5. Katsestendi elektriskeem
9. Katsestendi koostamine
10. Katsestendi testimine
11. Mõõtetulemused ja analüüs
 - 11.1. Mõõtmine
 - 11.2. Tulemused ja analüüs
12. Kokkuvõte ja järeldused
13. Kasutatud kirjandus
14. Lisad

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Kasutan raamatuid, teadusartikleid, lõputöid ja muid internetist kättesaadavaid teaduslike materjale.

1. Green Rhino Energy Ltd., Electrical characteristics of PV modules. 2016
URL:http://www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/pv_electronics.php

2. Karl-Erik Laasma, „Maapaigaldusega päikeseelektrijaama rajamise juhend“, bakalaaurusetöö
3. Stuart Bowden, Christiana Honsberg, PVCDROM
URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/welcome-to-pvcdrom>
4. M.Meldorf, H.Tammoja, Ü.Treufeldt, J.Kilter „Jaotusvõrgud“, 2007

9. Lõputöö konsultandid

Lauri Kütt

10. Töö etapid ja ajakava

1. Kontseptsiooni paika panemine ja lähteandmed – 09.11.21
2. Kavand ja CAD joonis katsestendist – 15.11.21
3. Vajalike seadmete ja komponentide valimine ning tellimine – 15.11.21
4. Katsestendi koostamine – 01.03.22
5. Katsestendi testimine – 02.03.22
6. Töökindluse ja parandamisvõimaluste analüüs – 03.03.22
7. Katsestendi vigade likvideerimine ja täiustamine – 15.03.22
8. Katsestendiga mõõtmiste tegemine ja mõõtmiste analüüs – 20.03.22
9. Teoreetilise osa kirjutamine – 10.04.22
10. Töö tulemuste kirjeldus ja järeldused – 25.04.22
11. Kokkuvõtte kirjutamine – 25.04.22
12. Töö esimene versioon valmis – 25.04.22
13. Juhendajale läbilugemiseks saatmine – 26.04.22
14. Paranduste sisseviimine – 04.05.22
15. Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine – 06.05.22
16. Töö lõplik versioon valmis - 18.05.22

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	11
1. SISSEJUHATUS.....	12
1.1 Päikeseelektrijaama näide.....	13
1.1.1 Päikesepaneelid	13
1.1.2 Vaheldi – inverter.....	13
1.1.3 Paigaldis	14
2. TEOREETILINE TAUST	16
2.1 Päikesepargi komponendid ja nende ülesanne	16
2.1.1 Päikeseelement ja päikesepaneel	18
2.1.2 Inverter	26
2.1.3 Alalisvoolumuundurid.....	27
3. KATSESTENDI PROJEKTEERIMINE.....	28
3.1 Nõuded katsestendi koostamiseks ja ohutus.....	28
3.2 Lähteandmed, kontseptsioon ja skeem	30
3.3 Põhiseadmed.....	33
3.3.1 Katsestendi raam	33
3.3.2 Inverter ja seadistamine	34
3.3.3 Liitumiskilp ja arvesti	37
3.3.4 Fotoelektriline moodul ja selle kinnitamine	37
3.3.5 Alalistoiteallikas	39
3.4 Seadmete paigutus stendil ja disain	41
4. ABITOITE- JA OHUTUSAHELATE PROJEKTEERIMINE	43
4.1 Pistikühendused ja nende kavandamine.....	43
4.2 Kaablid.....	44
4.3 Juhistikusüsteemid ja erisus katsestendil	46
4.4 Ohutuskeem ja selle komponendid	47
5. MÕÕTEÜLESANNE JA TALITLUSE UURIMISEKS VAJALIKUD LISASEADMED ...	52
5.1 Elektrilised mõõtmised	52
5.2 FE imitaatori välja töötamine.....	54
KOKKUVÕTE	58

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	59
LISAD	62

EESSÕNA

Idee koostada päikesepargi katsestend, tuli töö autoril sügissemestri alguses kui kaalukausil olid erinevad lõputöö teemad. Autor rääkis ideest oma programmijuhile Lauri Küttile, kes aitas teema ja töö täpsemini defineerida.

Suur tänu Lauri Küttile, kes oli töö koostamisel suureks abiks.

Autor tänab oma juhendajat Toomas Vinnalit koostöö eest.

Lisaks suur tänu ettevõtetele AS Harju Elekter ja Enefit Connect OÜ, et saite olla abiks vajalike komponentide hankimisel.

1. SISSEJUHATUS

Päikeseelektrijaamad koguvad üha rohkem populaarsust seoses rohepöörde ning kõrgete energiahindadega – koduomanikul on hea võimalus vähendada elektriarveid ja panustada rohelisemasse elektritootmisesse. Päikeseelektrijaam on olemuselt võrdlemisi ohutu, selle sisendenergia on piiramatult ning keskkonnasõbralik.

Päikeseelektrijaamade põhikomponentide – fotoelektrilist energiamuundust teostavate päikesepaneelide ja saadud elektrienergiat võrku andmiseks sobilikuks muundavate inverterite hinnad on langustrendis. Paigaldamiseks saadaolevate paneelide võimsused kasvavad, üksikute päikesepaneelide võimsused ulatuvad kuni 800 W-ni, kusjuures tüüpiliseks võimsuseks on saanud 300-400 W. Päikesepaneeli hind võimsusühiku kohta on vahemikus 0,25 – 0,7 €/W sõltuvalt tehnoloogiast.

Päikeseelektrijaama komponentide tundmine ning nende tööpõhimõtte mõistmine tuleb tulevasele elektriinsenerile kasuks – jätkusuutlikule energiatehnoloogiale üleminekuks on tarvis kompetentseid spetsialiste. Komponentide tööpõhimõtte mõistmine eeldab, et tudeng tunneb elektrotehnika aluseid ning põhilisi elektrilisi suurusid. Reaalsete seadmetega päikesepargi katsestend aitab kaasa parema arusaama tekkimisele fotoelektrilisest süsteemist. Töö eesmärgiks on koostada katsestend, millega on võimalik läbi viia laboratoorseid tööd. Katsestendi juurde kuuluvad mõõteahelad, millega saab teostada laboratoorseid mõõtmisi.

Projekteerides luuakse võimalus ühendada päikesepargi katsestend labori jaotusvõrgu mudeliga. Päikesepargi katsestendi ühendamisel labori jaotusvõrgu mudeliga on võimalik uurida päikeseelektrijaama mõju jaotusvõrgu elektri kvaliteedile ja pingeniivoo muutustele. Labori jaotusvõrgu katsestendi ehitamine on töö kirjutamise ajal pooleli ja sellega autor oma lõputöös ei tegele.

Päikesepargi katsestendiga on võimalik päikesepaneelidele langeva valguskiirgusele vastava väljundkarakteristiku imiteerimine alalistoiteallikaga, mis toidab võrguinverterit. Seejuures on võimalik analüüsida valguskiirguse ja varjude mõju inverteri väljundile ja efektiivsusele. Alalistoiteallika juhtimine vastavalt reaalse paneeli väljundile on omaette teema ja selle välja töötamine ei ole selle töö peamine eesmärk.

Peamine rõhk töös on katsestendi projekteerimine, seadmete valimine ning ehitamine. Stendi projekteerimisel tuleb arvestada, et stend oleks varustatud kõikide oluliste turvaelementidega.

1.1 Päikeseelektriijaama näide

Antud lõputöös kajastatud katsestend on kujundatud reaalse 3 kW-se nimiväljundvõimsusega fotoelektrilise (edaspidi FE) päikeseelektriijaama alusel. Esiteks kujundatakse reaalse seadmetega näidisjaam. Näidisjaam on sisustatud ettevõtte Pesatron OÜ [1] esitatud informatsioonile tuginevalt.

1.1.1 Päikesepaneelid

Vaadeldakse tootja Canadian Solar monokristallilist FE-st moodulit CS3L-375MS, mille nominaalvõimsus on 375 W ja mõõtmed on 1765x1048x40 mm [2]. FE-se mooduli täpsemad andmed on lisades (vt Lisa 9). Ühe mooduli pindala saab mõõtmete järgi arvutada:

$$S = a \cdot b = 1,765 \cdot 1,048 \approx 1,85 \text{ m}^2$$

kus, S – FE-se mooduli pindala, m^2

a – FE-se mooduli pikkus, m

b – FE-se mooduli laius, m

Päikeseelektriijaamades kasutatakse FE-se sektsiooni üledimensioneerimist, mis tähendab, et FE-se sektsiooni väljundvõimsus on suurem kui inverteri väljundvõimsus. Üledimensioneerimist kasutatakse, et tagada ka varjulisema päeva puhul inverteri maksimaalne väljundvõimsus.

Inverterite andmelehtedes on kirjas, kui suur on maksimaalne FE-se sektsiooni võimsus ja moodulijada maksimaalne pinge. Näidisjaama puhul on üledimensioneerimine 25%. See saavutatakse kui ühendatakse jadamisi kümme 375 W-se nimivõimsusega FE-st moodulit:

$$P_{FE} = P_{max} \cdot N = 375 \cdot 10 = 3750 \text{ W} = 3,75 \text{ kW}$$

kus, P_{FE} – FE-se moodulisektsiooni maksimaalne võimsus, W

P_{max} – FE-se mooduli maksimaalne võimsus, W

N – FE-ste moodulite arv

1.1.2 Vaheldi – inverter

Päikeseelektriijaama tarvis valitakse Fronius Symo 3.0-3-S 3-faasiline inverter. Inverter võimaldab ühendada 6000 W ulatuses FE-si moduleid [3]. Lisaks tuleb kontrollida inverteri maksimaalset sisendpinget ja suurimat lühisvoolu. Inverteri maksimaalne sisendpinge on 1000 V [3]. Lihtsuse mõttes arvestame FE-se mooduli maksimaalseks

pingeks avatud ahela pinge standartsete katsetingimuste juures. Jadamisi ühendatud FE-ste moodulite maksimaalne avatud ahela pinge:

$$U_{max} = U_{OC, STC} * N = 410 * 10 = 410 V$$

kus, U_{FE} – FE-se moodulisektsiooni maksimaalne võimsus, V

U_{max} – FE-se moodulisektsiooni maksimaalne pinge, V

N – FE-ste moodulite arv

Seejuures on tagatud ka piisav varu, kui tegelik pinge peaks olema suurem kui 410 V. Kuna FE-sed moodulid on ühendatud jadamisi, on genereeritav lühisvool võrdne ühe FE-se mooduli maksimaalse lühisvooluga, mis on 11,61 A, inverteri maksimaalne lühisvool on 24 A [3]. Seega selline FE-ste moodulite konfiguratsioon on sobiv. Nüüd tuleb arvutada FE-ste moodulite kogupindala, et arvestada kui suur peab olema katusepind.

1.1.3 Paigaldis

Kogupindala sõltub lisaks paneelide pindalale ka paneelide vahekaugustest, mis on tingitud nõuetest ja paigalduskonstruktiooni omadustest. Kui arvestada, et ühe paneeli pindala on 1,85 m² ja paneele tuleb 10 tükki, siis võiks kogupindala olla:

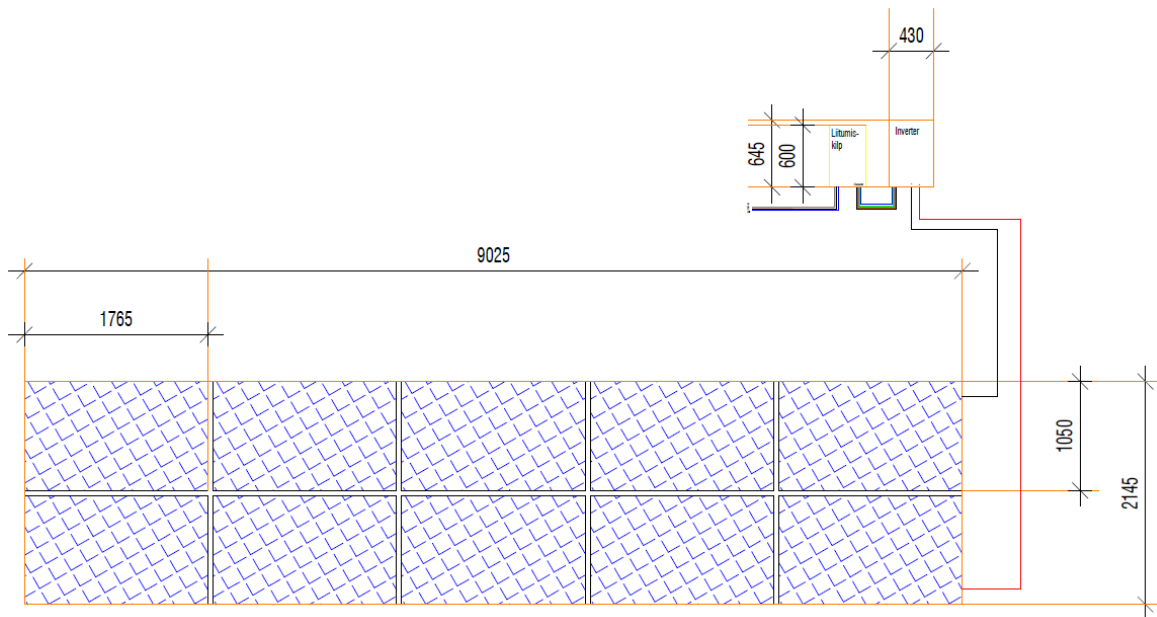
$$S_{kogu} = S * N = 1,85 * 10 = 18,5 \approx 20 m^2$$

kus, S – FE-se mooduli pindala, m²

N – FE-ste moodulite arv

S_{kogu} – FE-se moodulisektsiooni kogupindala

Joonisel 1.1 on näha näidisjaama koos mõõtmetega. Joonisel on kujutatud FE-st moodulisektsiooni, inverterit, liitumiskilpi ja juhtmeid. Lihtsuse mõttes pole paneelide vahelise ühendusi ja konstruktsioone kujutatud. Sellise süsteemi maksumus koos konstruktsioonide, liitumisega on ca 4000 €. Kui panna juurde veel projekt ja dokumentatsioon, siis võib summa olla ca 5000 €. Sõltub kui palju tööd ise ära teha ning kui kalliks osutub elektriliitumine.



Joonis 1.1 Näidisjaama mõõtmed

Parema ettekujutuse saamiseks kasutatakse pilti reaalsest päikesepargist, mille nimivõimsus on 3,3 kW (vt Joonis 1.2). Päikesepargis kasutatakse 15 FE-st moodulit nimivõimsusega 220 W.



Joonis 1.2 Päikeseelektrijaam nimivõimsusega 3,3 kW

2. TEOREETILINE TAUST

Teises peatükis antakse ülevaade FE-se päikeseelektrijaama olulisematest komponentidest ja selgitatakse nende tööpõhimõtet ja ülesannet FE-ses süsteemis. Samuti tuuakse välja erinevate päikeseelektrijaamade liigid. Põhirõhk on päikeseelemendil ja selle aseskeemil ning aseskeemi parameetritel. Selgitatakse päikeseelemendi väljundparameetrite sõltuvust sisendparameetritest ning tuuakse välja päikeseelemendi voolu-pinge ja pinge-võimsuse graafikud.

2.1 Päikesepargi komponendid ja nende ülesanne

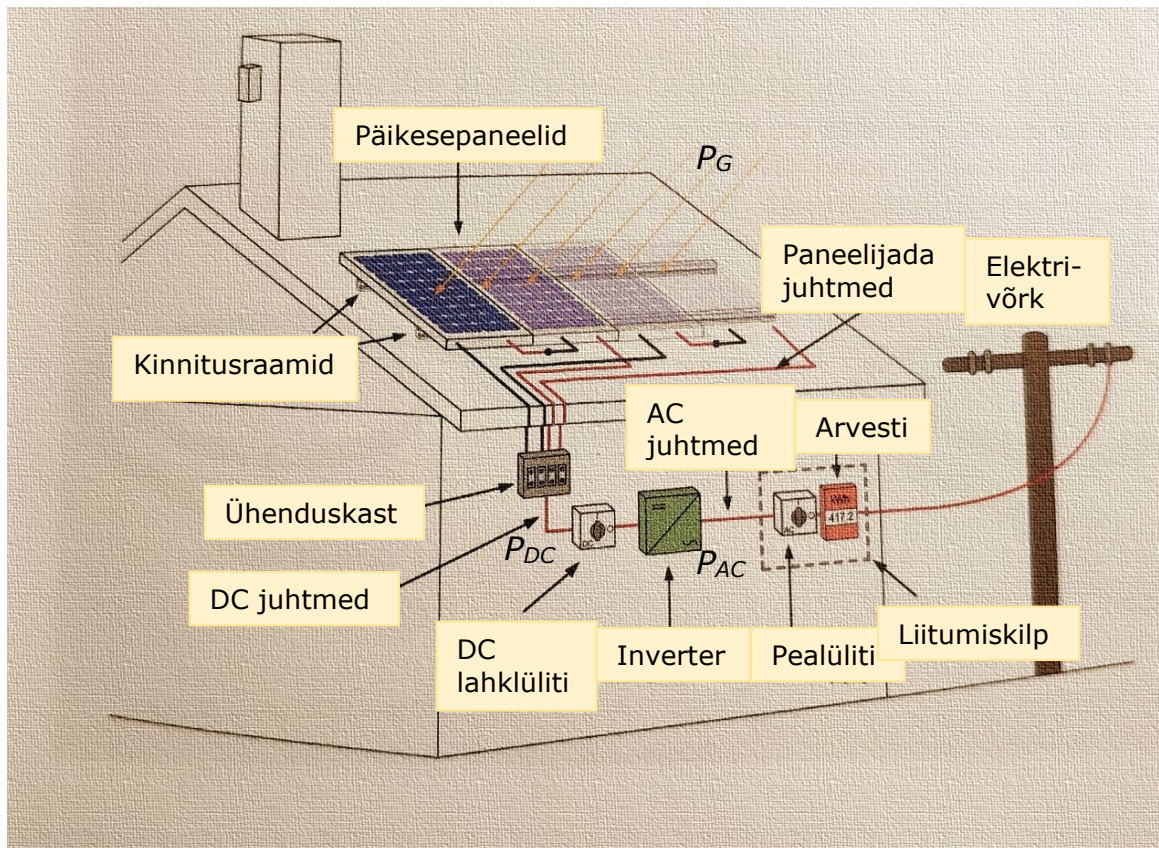
Energiamuundamise seisukohast on kaks peamist tehnoloogiat, mida kasutatakse päikeseelektrijaamades: fotoelektrilistel moodulitel põhinev jaam ja päikesekiirguse toimel töötav soojuselektrijaam, kus kasutatakse peegleid, et koondada valguskiirgus soojendatavale kehale, mis toodab auru ja paneb tööle turbiini. Selle töö raames käsitletakse fotoelektrilisi päikeseelektrijaamasid.

Päikeseelektrijaamad rajatakse kas võrguühendusega või võrguühenduseta. Võrguühenduseta ehk *off-grid* süsteemi puhul tarbitakse toodetud elekter koha peal ära ning elektrivõrku elektrienergiat ei edastata. Võrguühenduseta süsteeme kasutatakse tavaliselt koos akusalvestusega ja diisलगeneraatoriga kohtades, kuhu võrguühenduse loomine pole majanduslikult otstarbekas – elektriliitumine maksab 50 000€ või rohkem. Sel juhul võib süsteemis olla keskne muunduriseade, mis erinevaid toiteallikad ning akud süsteemis ühendab või eraldiseisvad muundurid iga seadme juures.

Võrguühendusega ehk *on-grid* süsteemi puhul ühendatakse FE moodulijada võrguinverteri külge, mille abil saab tarbimisest üle jääva elektrienergia edastada võrku. Lisaks saab liigitada päikeseelektrijaamasid nende paigaldusviisi alusel: maapaigaldisega päikeseelektrijaam või katusele paigaldatud päikeseelektrijaam. Maapaigaldisega jaamade eeliseks on paremad jahutustingimused, mis tagavad paneelide parema efektiivsuse, puuduseks kallim paigaldus ja eraldi maa-ala vajadus.

Päikeseelektrijaama peamisteks komponentideks on inverter, FE-sed moodulid ning nende kinnitused, ühendusjuhtmed, jaotuskilbid, alalisvoolu ja vahelduvvoolu kaitsmed (vt Joonis 2.1) [4]. Lisaks võib olla veel erinevaid andureid, valvekaameraid ja sideliideseid vastavalt vajadusele. Suurte päikeseelektrijaamade, mille nimiväljundvõimsus on üle 200 kW-i, juurde kuulub ka alajaam. Alajaamas võib olla kas madalpinge või keskpinge liitumispunkt, vastavalt võimsusele. Kuna

päikeseelektrijaama tähtsaim osa on FE moodul, siis selle kohta antakse detailsem ülevaade. FE-ste moodulite kinnituste erinevaid tüüpe oma lõputöös ei käsitle, kuna ei oma töö seisukohast väärtust. FE-se mooduli parameetrite tundmine on antud töö seisukohalt oluline – vaja on aru saada FE-se mooduli voolu-pinge karakteristikust, paneeli parameetrite mõju voolu-pinge karakteristikule, et oleks võimalik välja töötada alalistoiteallika juhtimissüsteem.



Joonis 2.1 Päikeseelektrijaama komponendid [4]

Fotoelektrilise päikeseelektrijaama talitlust peamiselt määravad suurused on:

- Sisendvõimsus (P_G) – päikese kiirgusvoog, mis sõltub kiirgusintensiivsusest [W/m^2] ja kasutatava FE-se mooduli kasulikust pindalast [m^2].
- FE-se moodulisektsiooni väljundvõimsus (P_{DC}) – kõikide FE-ste moodulite summaarne elektriline võimsus, mis sõltub sektsiooni pingest (U_{DC}) ja voolust (I_{DC}). Väljundvõimsus on seotud energiamuundamise kasuteguriga (η_{FE}), mis sõltub kasutatavast FE-sest moodulist.
- Inverteri väljundaktiivvõimsus (P_{AC}) – on seotud 3 faasi voolude (I_{3f}) ja pingetega (U_{3f}) ning võimsusteguriga ($\cos \varphi$). Inverteri väljundaktiivvõimsus sõltub samuti energiamuundamise kasutegurist (η_{inv}).

2.1.1 Päikeseelement ja päikesepaneel

Päikeseelemendid ehk fotoelemendid (ingl. k *solar cell* või *photovoltaic cell*) on seadmed, mis toodavad päikesekiirgusest elektrit. Päikeseelemendid töötavad fotogalvaanilise efekti abil, mis on seotud fotoelektrilise efektiga, mille teooria töötas välja Albert Einstein 1921. aastal [4].

Fotoelektriliseks efektiks kutsutakse olukorda, kui valguse abil lüüakse teatud metallidest või pooljuhtidest välja elektrone – seda otseselt fotoelementides ei toimu ja seal toimub teistsugune füüsikaline protsess. Fotogalvaaniline efekt tähendab sisuliselt seda, et kaks erinevate omadustega materjali, mis on paigutatud üksteisele väga lähedale, tekitavad pinge materjalide liitekohas, kui materjale tabab piisavalt suure energiaga elektromagnetkiirgus. Fotoelementide tuumaks on pooljuhtmaterjalist pn-siire. [5]

Pooljuhtmaterjalid on olulised, et neelata võimalikult palju footoneid ja seega valgusenergiat. Footon on valgusosake, täpsemalt elektromagnetkiirguse kvant. Footoni energia on seotud tema lainepikkuse ja Plancki konstandiga vastavalt valemile [6]:

$$E_{\text{footon}} = h * f = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

kus E_{footon} – elektromagnetkiirguse(ka footoni) energia, J,

h – Plancki konstant, $6,26 \cdot 10^{-34}$ J*s

f – elektromagnetkiirguse sagedus, Hz

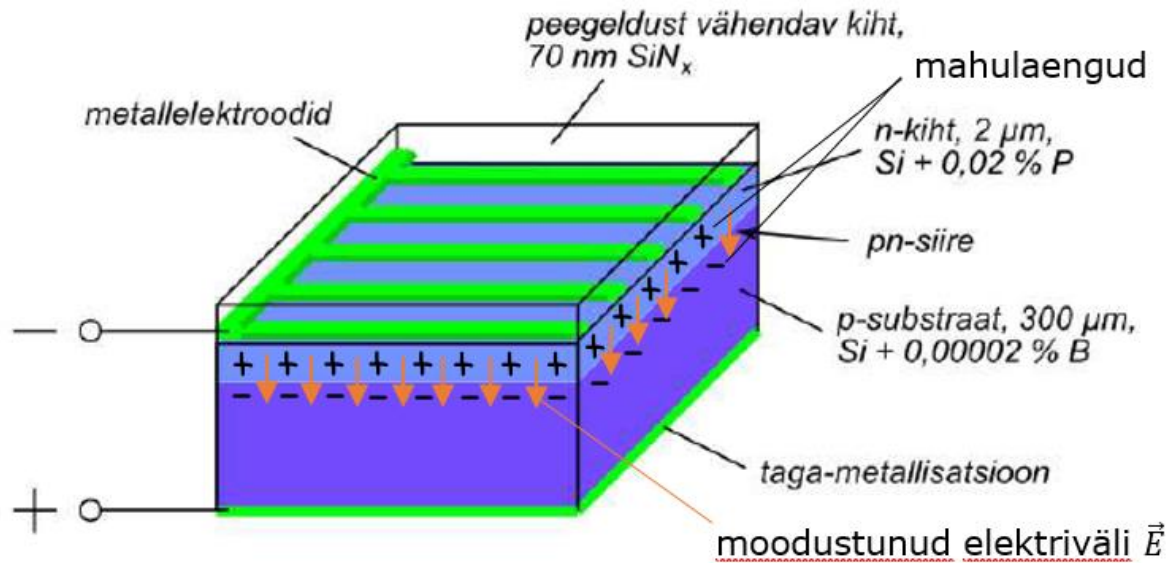
c – valguse kiirus, m/s.

λ – elektromagnetkiirguse lainepikkus, m

Kui footon tabab pooljuhtmaterjali aatomituuma, moodustub elektron-auk paar. Aatomituuma, kust elektron välja löödi, jääb alles vaba koht ja seda nimetatakse auguks.

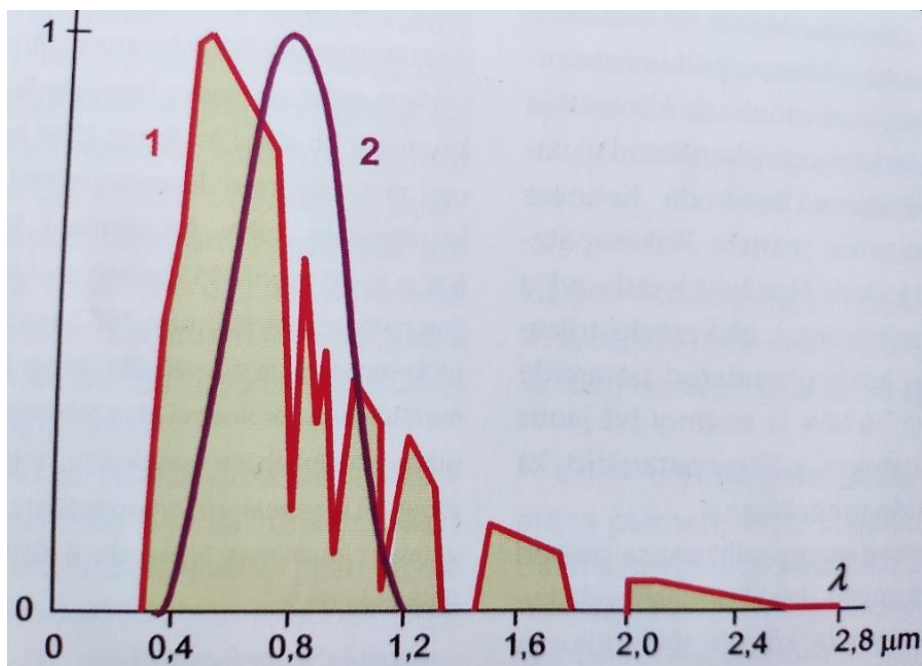
Tänu erinevatele lisanditele nagu fosfor ja boor, saab tekitada pooljuhtmaterjalis piirkondi, kus on elektronide liiasus (n-tüüpi pooljuht) või elektronide puudujääk (p-tüüpi pooljuht). Sellist ainete lisamist nimetatakse dopeerimiseks ja sellega muudetakse räni elektrijuhtivust. Kui need piirkonnad üksteise lähedale paigutada saadakse n- ja p-tüüpi pooljuhi üleminekupiirkonda pn siire (vt Joonis 2.2). Tänu pooljuhtide laengute erinevusele tekib laengukandjate difusioon, mille tulemusel moodustub pn-siirde üleminekupiirkonda ruumlaeng. Ruumlaeng tekitab elektrivälja \vec{E} , mis ei lase edasisel osakeste difusioonil jätkuda. Tekkinud elektrivälja paneb valguskvandi toimel elementis

vabanevad elektronid ja augud liikuma elektroodide poole – mille tulemusel tekib pinge. Kui päikeseelemendi elektroodid ühendada tarbijaga tekib vool. [7]



Joonis 2.2 Päikeseelemendi ristlõige [8]

Peamised faktorid, mis on olulised fotoelemendi disaini juures ning mõjutavad efektiivsust, on elemendi pinna peegelduvus, laengukandjate kogumise efektiivsus ja parasiitakistused. Pooljuhtidele on iseloomulik elektrijuhtivuse tugev sõltuvus lisaainetest (ebapuhtusest), kristalse struktuuri korrapärasusest ja väliskeskonna mõjudest. [5]



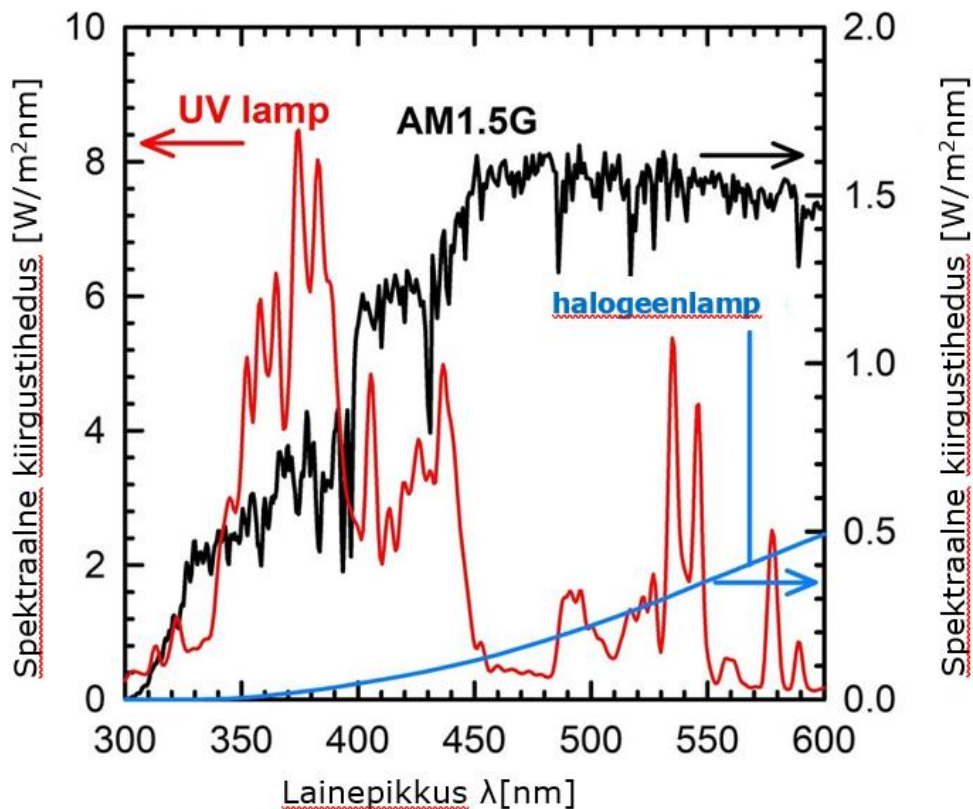
Joonis 2.3 Päikesekiirguse suhteline spektraaljaotus Maa pinnal(1, lihtsustatult) ja tüüpilise ränifototelemendi spektraalkarakteristik(2). [9]

Fotoelemendi kasutegurit mõjutab suurel määral vastuvõetava kiirguse spekter. Igal fotoelemendil on erisugune spektraalkarakteristik, mis näitab missuguse lainepikkuse juures töötab fotoelement kõige efektiivsemalt. Suurema sagedusega elektromagnetkiirgus omab suuremat energiat. Pooljuhid suudavad kinni püüda vaid teatud sagedusega elektromagnetlaineid. Kogu valguskiirguse spektrit ei suuda fotoelement elektrienergiaks muundada – see osa tekitab kadusid (vt Joonis 2.3) [9].

Samuti on igal valgusallikal talle omane spektraalse kiirgustiheduse jaotus. Spektraalne kiirgustihedus näitab võimsustihedust (W/m^2) kindlal valguskiirguse lainepikkusel.

Päikese spektraalne kiirgustihedus sõltub õhu massi koefitsiendist (AM), mis iseloomustab reaalse päikesekiirguse optilise teekonna erinevust olukorrast, kus päikesekiirgus langeb maapinnale otse seniidist. AM koefitsiendi saab arvutada valemiga $1/\sin(\alpha)$, kus α on päikese kõrgusnurk. [10]

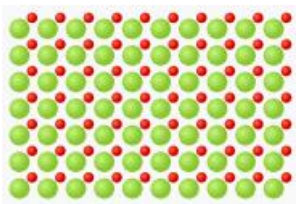
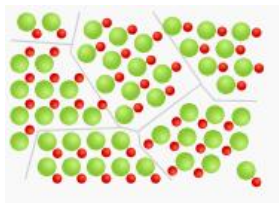
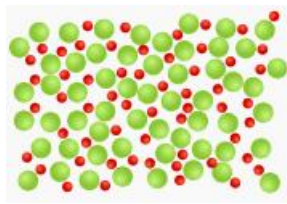

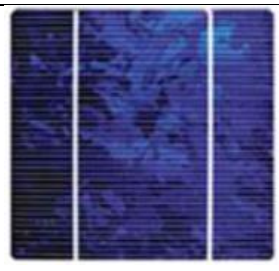

Kuna halogeenlambi spektraalne kiirgustiheduse jaotus ja intensiivsus erineb oluliselt päikesest, mõjutab see fotoelemendi väljundit (vt Joonis 2.4). Sellega tuleb arvestada ka katsestendi alalistoiteallika juhtimissüsteemi disainimisel päikesepaneelide väljundi järgi. Joonisel 2.4 on paremal skaalal halogeenlambi ja AM1,5 vastava päikesekiirguse spektraalne kiirgustihedus ning vasakul UV lamp.



Joonis 2.4 Päikesekiirguse ja halogeenlambi spektraalse kiirgustiheduse jaotus [11]

Kõige enam levinud pooljuhtmaterjal, mida fotoelementides kasutatakse on räni (Si) [5]. Räni kasutatakse, sest tema füüsikalised omadused annavad parima elektrilise efektiivsuse, räni on odav ja seda leidub maakoos palju. Fotoelementides kasutatakse erineva kristallstruktuuriga räni – peamised mida kasutatakse on polükristalne, monokristalne ja amorfne (vt Tabel 2.1).

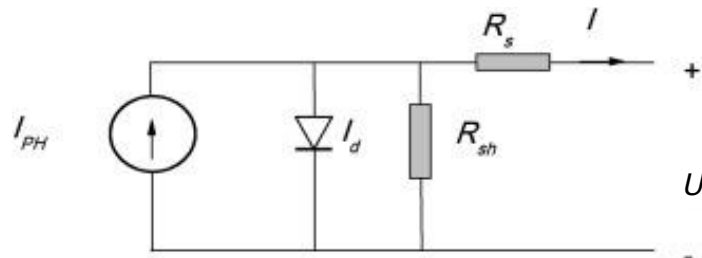
Tabel 2.1 Erineva kristallstruktuuriga fotoelementide võrdlus [12] [13] [14]

Omadus	Monokristalne	Polükristalne	Amorfne
Struktuur	Üks suur kristall 	Klastritega 	Sümmeetria puudub 
Efektiivsus	16-23%	15-20%	6-9%
Materjalikulu	Suur	Keskmine	Väike
Eluiga	Vähemalt 25 aastat	Vähemalt 25 aastat	Kuni 25, tavaline 10-20 aastat
Pilt			

Fotoelement pole ei vooluallikas ega pingevaldkas, vaid tema väljundkarakteristikut iseloomustab voolu-pinge kõver, mille iseloomulik kuju tuleneb päikeseelemendis oleva paikneva pn-siirde ebalineaarsusest. Päikeseelemendi elektrilise väljundi iseloomustamiseks kasutatakse erinevaid aseseeme.

Üks levinumaid ja lihtsamaid on 1 diodi mudel. Antud aseseem võimaldab üsna täpselt kirjeldada elemendi väljundkarakteristikut. 1 diodi aseseemis on 4 komponenti: vooluallikas (vooluga I_{PH}), Shockley võrrandiga defineeritud diod (vooluga I_D),

röötakistus R_{sh} ja jadatakistus R_s (vt Joonis 2.5). Fotogalvaaniline vool I_{PH} sõltub päikeseelemendi lühisvoolust, valguskiirguse intensiivsusest, päikeseelemendi temperatuurist ja päikeseelemendi temperatuuritegurist. [15]



Joonis 2.5 Päikeseelemendi aseskeem [15]

Päikeseelemendi 1 diodi mudel [16]:

$$I = I_L - I_D - I_{sh} \quad (2.2)$$

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{U + I \cdot R_s}{m \cdot U_T}} - 1 \right) \quad (2.3)$$

$$I_{sh} = \frac{U + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (2.4)$$

$$U_T = \frac{kT}{e} \quad (2.5)$$

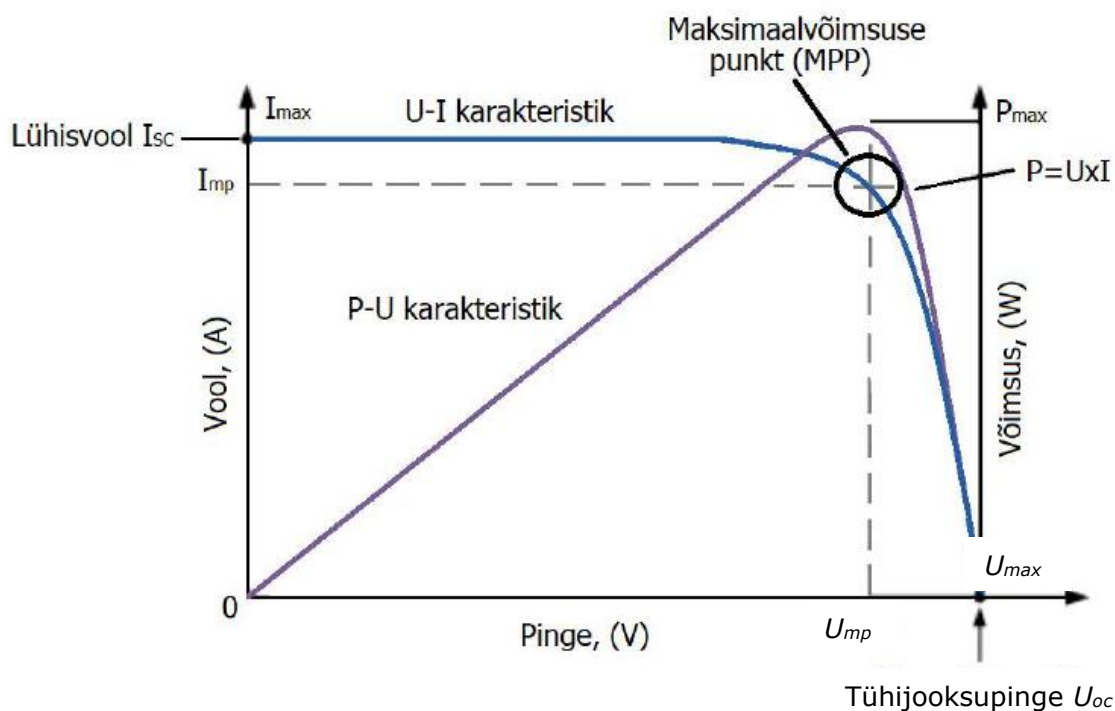
- kus U – päikeseelemendi väljundpinge, V
 I – päikeseelemendi väljundvool, A
 I_L – fotogalvaaniline vool, mida fotoelement genereerib, A
 I_D – diodi läbiv vool, A
 I_{sh} – röötakistust läbiv vool, A
 R_{sh} – röötakistus, Ω
 R_s – jadatakistus, Ω
 I_0 – vastupingestatud diodi küllastusvool, A
 U_T – termopinge, V
 T – absoluutne temperatuur, K
 m – diodi ideaalsustegur, ühikuta
 e – elektroni laeng, C
 k – Boltzmanni konstant, J/K

Valem 2.3 on Shockley diodi võrrand, mis määrab ideaalsele diodile omase U-I karakteristikku diodi päri- või vastu pingestamisel. Shockley diodi võrrand annabki päikeseelemendile omase ebalineaarse väljundkarakteristiku, kuna sisaldab

eksponentfunktsiooni päikeseelemendi väljundvoolust ja -pingest. Eksponent sisaldab ka termopinget U_T , mis tekib pn-siirdes temperatuuri mõjul – seega mõjutab temperatuur päikeseelemendi väljundit. Samuti on sisse toodud ideaalsustegur m , kuna reaalse diodi võrrand erineb ideaalsest. $U + I \cdot R_s$ on diodile langev pinge.

Päikeseelemendi volt-amper karakteristik iseloomustab päikeseelemendi voolu ja pinget sõltuvust. Volt-amper karakteristik on oluline, kuna selle abil hinnatakse FE-ste moodulite väljundvõimsust. Joonisel 2.6 on näha päikeseelemendi erinevaid tööpunkte:

- I_{sc} – lühisvool, A
- U_{oc} – tühijooksupinge, V
- I_{mp} – maksimaalse võimsuspunkti vool, A
- U_{mp} – maksimaalse võimsuspunkti pinge, V
- P_{max} – maksimaalne võimsus, W



Joonis 2.6 Päikeseelemendi voolu-pinge karakteristik [17]

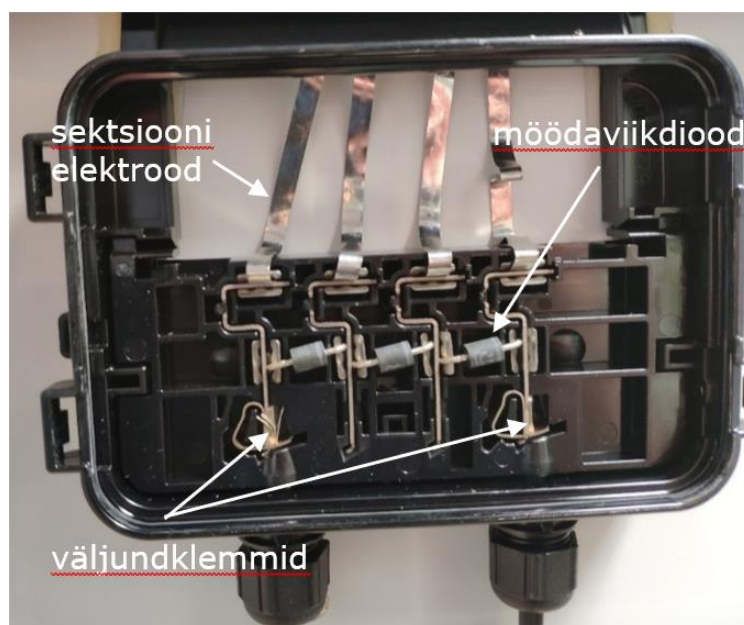
Kui fotoelemendi klemmid lühistada genereerib fotoelement lühisvoolu I_{sc} , mille väärtus sõltub elemendi ehitusest ja tüübist. Lühisvoolu väärtus on otseselt seotud päikesekiirguse intensiivsusega. Kui päikeseelemendi klemmidele ei ole tarbijaid ühendatud on pinge klemmidel maksimaalne ja sellist pinget kutsutakse tühijooksupingeks U_{oc} . Mõlemal juhul fotoelement võimsust ei genereeri.

Fotoelemendi maksimaalne võimsus (P_{max}) saavutatakse U-I karakteristik pölv juures. Kuna ühe päikeseelemendi tühijooksupinge on 0,5-0,6 V ja võimsus 1,5-5 W, siis selleks, et saaks suuremat väljundvõimsust tuleb fotoelemente ühendada omavahel jadamisi ja rööbiti. Jadamisi ühendades kasvab pinge ja rööbiti ühendades vool. Kokku

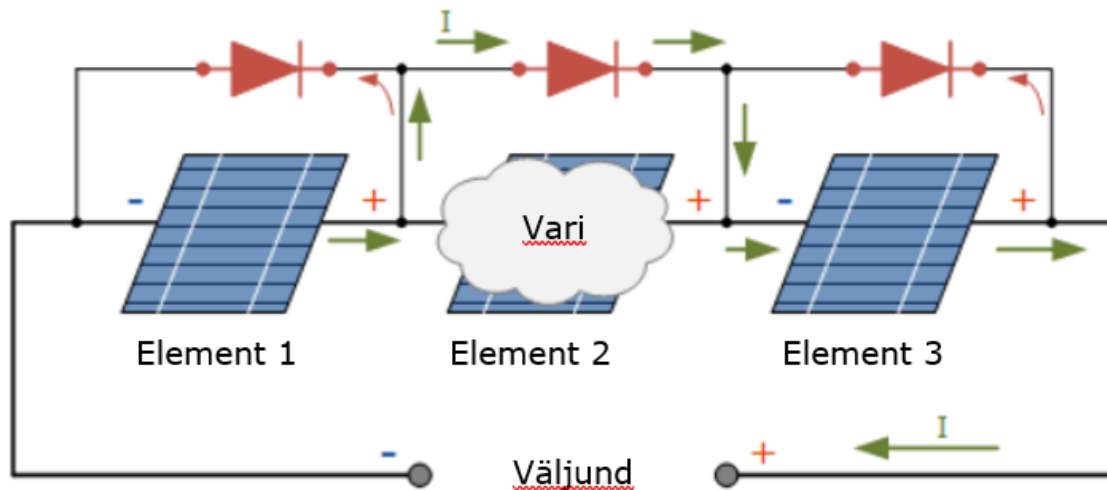
pandud elemendid koos konstruktsiooniga moodustavad fotoelektrilise mooduli ehk päikesepaneeli. [7]

Isegi väike vari FE-se mooduli peal võib vähendada väljundvõimsust 80-90%, mõjutades seejuures ka kogu moodulijada väljundvõimsust. Vari ühel FE-sel elemendil piirab kogu FE-se mooduli sees olevate teiste fotoelementide voolu vastavalt varju suurusele ning varjuga osa võib üle kuumeneda. [5]

Kui päikesepaneel on varjudeta, siis on paneeli U-I kõver samasuguse kujuga nagu päikeseelemendil – sama kehtib ka FE-ste moodulijadade ning sektsioonide puhul. FE-sel moodulil on klemmikarbis lisaks ka möödaviikdiodid (vt Joonis 2.7), et paneeli varjumisel saaks läbi diodi vool varjatud paneeli osast mööda voolata. Möödaviikdiodide arv mõjutab oluliselt paneeli U-I kõverat ning paneeli efektiivsust.



Joonis 2.7 Päikesepaneeli klemmikarp



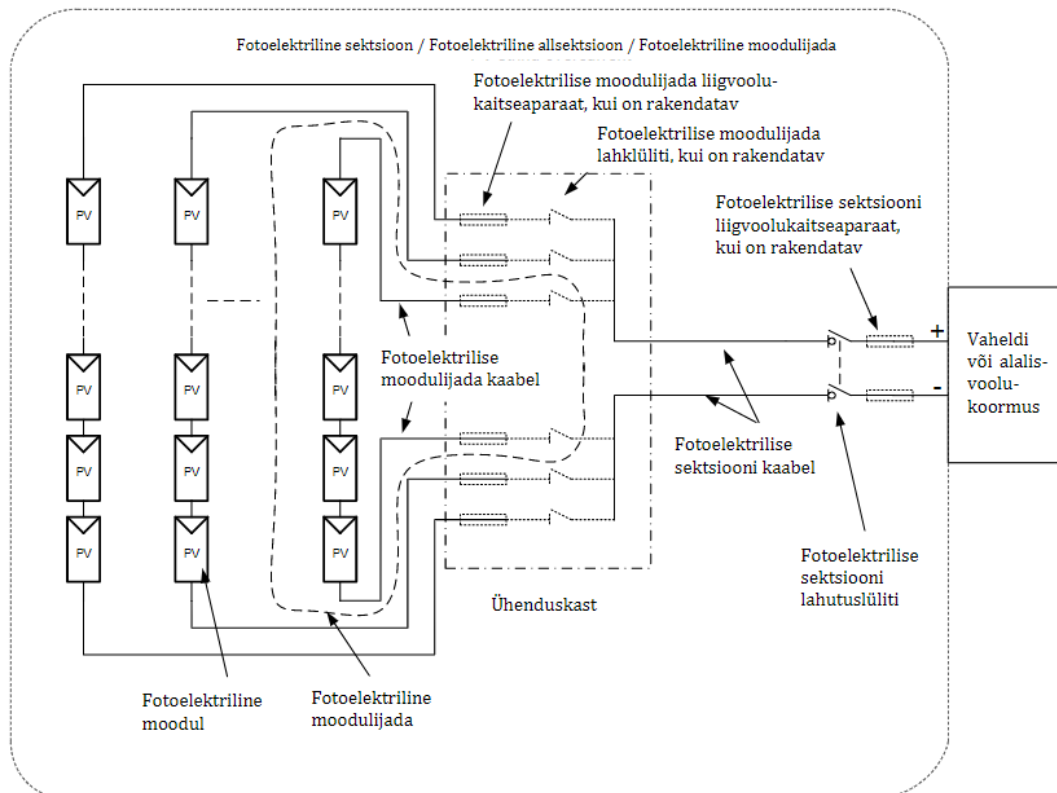
Joonis 2.8 Mõõdaviikdioodi põhimõte [18]

Jadaühenduse puhul on vool kõigis ahela fotoelementides sama. Päikeseelemendi varjumisel muutub tema takistus väga suureks ja vool valib alati väiksema takistusega teekonna, milleks on teekond läbi mõõdaviikdioodi, mis ühendatakse paralleelselt fotoelemendiga (vt Joonis 2.8). Joonisel 2.7 on näha 60-st fotoelemendist koosneva päikesepaneeli klemmikarpi, kus asuvad mõõdaviikdioodid, fotoelementidelt tulevad elektroodid ja väljundklemmid, mille külge on ühendatud päikesepaneeli kaablid. Mõõdaviikdioode on 3, iga 20 elemendise jada kohta 1 diod. Ühe jada varjumisel toodavad tänu diodile teised elemendijadad edasi.

Selleks et tagada FE-ste moodulite töö maksimaalse võimsuspunkti juures on kasutusel maksimaalse võimsuspunkti jälgimine (ing k – *maximum power point tracking* ehk *MPPT*). Maksimaalse võimsuspunkti jälgimine on implementeeritud nii inverterites kui ka alalisvoolumuundurites, nagu näiteks laadimiskontroller. *MPPT* põhimõte on alalispoole takistuse muutmine sellise väärtuse juurde, et saavutada maksimaalse võimsusele vastav pinge U_{mpp} .

Jadamisi ühendatud FE-sed moodulid moodustavad FE-se moodulijada. Rööbiti ühendatud FE-sed moodulijadad moodustavad FE-se sektsiooni. Joonisel 2.9 on välja toodud FE-se süsteemi komponendid ja struktuur.

FE-ste moodulite omavahelisel võrdlemisel tuleks vaadata kindlasti elektrilist efektiivsust. Päikesepaneeli elektriline efektiivsus on määratletud kui siseneva valgusenergia võimsuse ja paneeli elektrilise võimsuse suhe. Paneeli efektiivsust mõõdetakse standardsete testtingimuste juures (STC), mille puhul välistemperatuur on 25 °C, õhu massi koefitsient on AM1,5 ja valguskiirguse intensiivsus on 1000 W/m² kohta. Selline valguskiirguse intensiivsus on realselt väga harva esinev, seetõttu paneel töötab üldiselt väiksema efektiivsusega. [4]



- Elemendid, mis ei pruugi olla nõutavad
- - - Ümbris
- - - Süsteemi või allsüsteemi piir

Joonis 2.9 Fotoelektrilise süsteemi komponendid [19]

Päikeseelektrijaama seadmete valikul on olulised fotoelektrilise mooduli elektrilised parameetrid: maksimaalne võimsus (P_{max}), tühijooksupinge (V_{oc}), lühisvool (I_{sc}), maksimaalne süsteemi pinge ja maksimaalne kaitse suurus. Nende alusel toimub inverteri valik, kaitseseadmete valik, juhtmete ja samuti jaotuskilpide valik.

2.1.2 Inverter

Inverter ehk vaheldi on elektrimuundur, mis muundab alalisvoolu vahelduvvooluks ning vajadusel sünkroniseerib elektrivõrguga – seega on inverter päikeseelektrijaama üks tähtsamaid osasid. Võrguühenduseta lahenduste puhul pole võrguga sünkroniseerimine vajalik ja seega on seade odavam. Inverteri peamine ülesanne on energia muundamine, lisaks on päikeseelektrijaama inverteril lisaülesandeid – maksimaalse võimsuspunkti jälgimine (MPPT), süsteemi monitooring, reaktiivvõimsuse reguleerimine ja infoedastus andmesideliidestega. Inverterid toodetakse nii 1-faasilisi kui 3-faasilisi. 1-faasilisi invertereid kasutatakse madalamate võimsuste juures, kuna liiga suur vool 1-faasis tekitab suure voolude asümmeetria 3-faasilises süsteemis, mille tulemusel on häiritud

elektrivõrgu töö. Samuti on oluline, et inverter ei tekitaks liigselt vooluharmonikuid. [6]

Võrguga ühendatud inverteri ehk võrguinverteri puhul peavad seadme väljundparameetrid vastama Elektrilevi OÜ nõuetele, et inverteri saaks ohutult Elektrilevi jaotusvõrku ühendada.

Elektrilevi nõuded inverterile lähtuvad Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiividest 2014/35/EU ja 2014/30/EU ning inverter peab täitma Euroopa Komisjoni määruse 2016/631/EU artikkel 13 nõudeid. Inverter peab omama vastavusmäärgist vastavalt määrusele (EC) nr 765/2008. Lisaks peab inverter võimaldama Vabariigi Valitsuse määruse „Elektrisüsteemi toimimise võrgueeskiri“ nõuete täitmist. [20]

Lisaks 12 tuuakse välja erinevate inverteri tüübid. Töös on kasutusel string inverter, kuna see on enimlevinud lahendus fotoelektrilistes süsteemides.

2.1.3 Alalisvoolumuundurid

Päikeseelektrijaama osaks võib olla ka MPPT laadimiskontroller. Alalisvoolumuundurite peamine kasutus on akude laadimine. MPPT laadimiskontroller kontrollib päikesepaneeli väljundpinget, seejärel korrigeerib päikesepaneeli väljundpinget, et saavutada maksimaalne võimsus ehk rakendab maksimaalse võimsuspunkti jälgimist. Seejärel kontrollib seade aku pinget ja sätib muunduri väljundi selliseks, et tagada suurim laadimisvool akudele. Samuti saab MPPT laadimiskontrollerite külge ühendada alalisvoolu tarbijaid.

Alalisvoolumuundurid leiavad rohkem rakendust just võrguühenduseta süsteemide juures, kuna seal kasutatakse tihtipeale akusid. Lisaks kasutatakse MPPT seadmeid suurte paneelijadade efektiivsuse tõstmiseks – inverteri külge otse ühendatud pikk paneelijada võib olla mõnest kohast varjatud ja seega mõjutab see oluliselt kogu moodulijada U-I kõverat ja maksimaalset võimsuspunkti.

Lisaks müüakse ka alalisvoolumuundureid, mida saab paigaldada üksikutele paneelidele, et parandada MPPT-ga üksikute paneelide efektiivsust.

3. KATSESTENDI PROJEKTEERIMINE

3.1 Nõuded katsestendi koostamiseks ja ohutus

Katsestendi tehniliste nõuete sisend saadi programmijuhilt. Katsestendi juures olulised aspektid:

- Katsestendi ohutu käit
- Katsestendil on võimalik sooritada mõõteülesanded, millised on seotud päikeseelektrijaama talitlustingimustega
- Katsestendi saab ühendada laboris arendatava jaotusvõrgu mudeli külge, et uurida, kuidas mõjutab inverteri väljund jaotusvõrku ja selle parameetreid
- Katsestendi seadmed ja komponendid peaksid olema võimalikult sarnased reaalses päikeseпаркides kasutatavale
- Katsestendi saab kasutada ka vihmase ilmaga või pimedal ajal.
- Katsestend oleks varustatud mudeliga päikesepaneelidest, mis võimaldaks tutvuda praktiliste paneelide väljundiga kaldenurka muutes.
- Katsestend on laboratoorses oludes lihtsasti teisaldatav – eelistatult ratastele paigutatuna
- Katsestendi juhtimine peaks olema võimalikult lihtne ja robustne.

Et katsestendi saaks laboriseadmena ohutult ja praktiliselt kasutada, saab juhisteks ja nõueteks kasutada normdokumente ja standardeid. Õppestendi juures on oluline, et ei oleks ligipääsu ohtlikele pingealtele osadele ja oleks tagatud ohutu seadme välja lülitamine hädaolukorras või õnnetuse korral.

Standard EVS-EN 61140:2016 käsitleb elektriohutust ja kaitset elektrilöögi eest. Standardis tuuakse välja olulised terminid ja kaitseklasside liigitus.

Standard EVS-EN 50110-1:2013 käsitleb elektripaigaldiste käitu, kus defineeritakse ära olulised mõisted ja põhimõtted ohutuse tagamiseks üldisemalt kõigis elektripaigaldistes. Samuti kirjeldatakse töötoiminguid ja maandamist. Stendi koostamisel tuleks jälgida standardi põhimõtteid ja kaardistada ohud katsestendi juures.

Standard EVS-HD 60364-1 käsitleb madalpingelisi elektripaigaldisi. Katsestendi juurde kuuluvad elektriseadmed on madalpingelised ehk alla 1000 V vahelduvpinge ja 1500 V alalispinge. Lisaks on FE moodulite juures väikepinge, mis on standardi järgi kas alla 50 V vahelduv- või 120 V alalispinget. Standard määrab üldisemalt ära elektripaigaldiste projekteerimise, ehitamise ja kontrolli. Standard sisuks on erinevate ohuallikate ja nende ohtude kaitseks mõeldud meetodite liigitus.

EVS 50160:2010+A1+A2+A3:2019 - Avalike elektrivõrkude pingetunnussuurused.

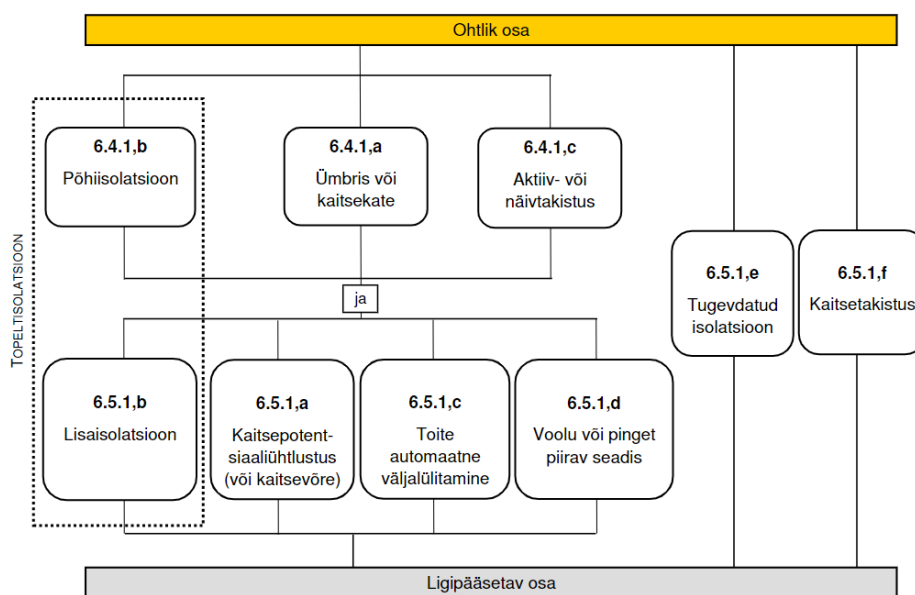
Standard käsitleb avalikes võrkudes lubatud aeglase pingemuudu väärtusi. Aeglased toitepinge muutused ei tohi ületada $\pm 10\%$ nimipingest U_n . Juhtmete isolatsioon on valitud õppestendi juures esinevate pingete järgi. Inverteri poolel tuleks arvestada $\pm 20\%$ nimipingest U_n , kuna inverteri ühendamisel jaotusvõrgu mudeliga võivad pinged tõusta, tingituna suurest takistusest jaotusvõrgu mudel liini parameetrites.

EVS-HD 60364-7-712:2016 - Madalpingelised elektripaigaldised. Osa 7-712: Nõuded eripaigaldistele ja -paikadele. Fotoelektrilised süsteemid.

Standard käsitleb põhilisi termineid seoses fotoelektriliste süsteemide ja nende osadega. Selgitatakse erinevate kaitseaparatuuride vajalikust ja valiku kriteeriume.

EVS-EN 61010-1:2010 - Ohutusnõuded elektrilistele mõõtmis-, juhtimis- ja laboratooriumiseadmetele. Osa 1: Üldnõuded.

Paneb paika katsestendi ohutuse seisukohalt meetmed, kuidas kaitsta ligipääsetavaid osi ohtliku pinge eest. Joonisel 3.1 on kujutatud erinevad meetmed, et tagada kaitse elektrilöögi eest.



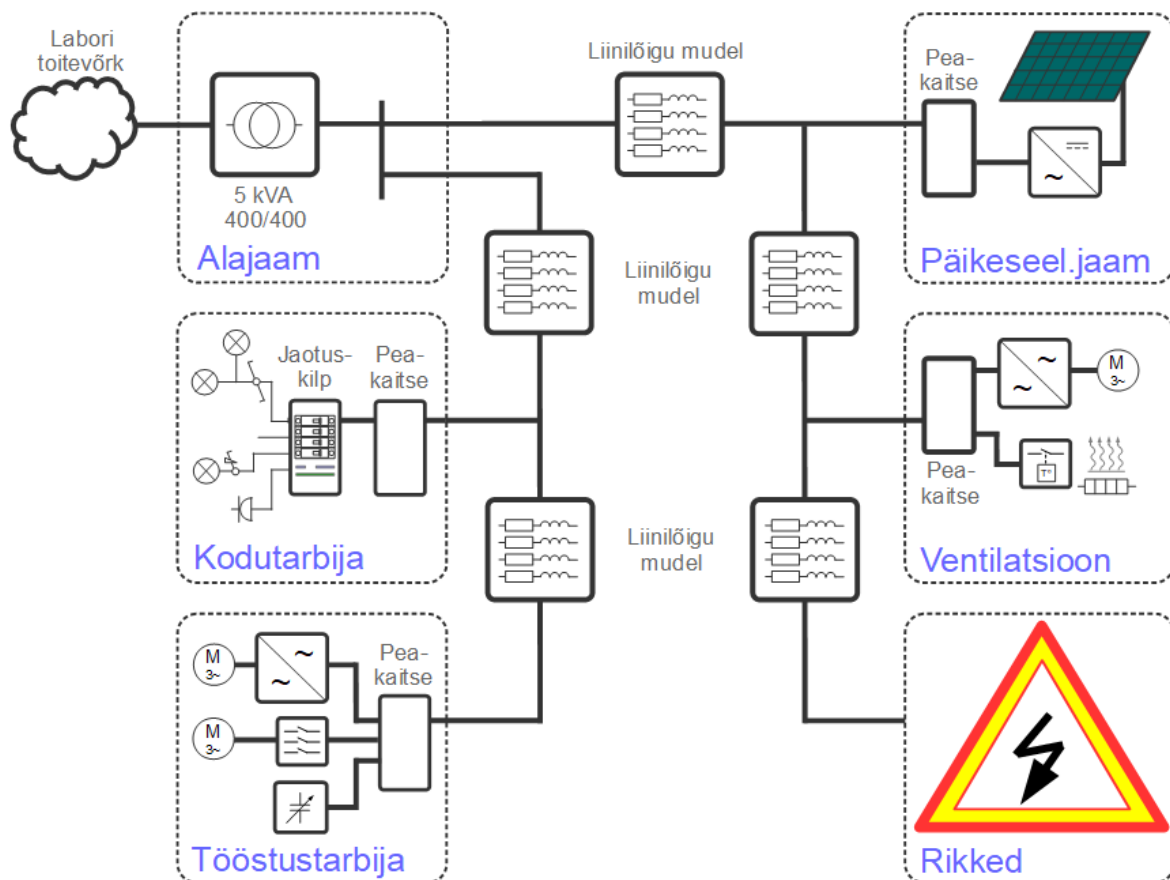
Joonis 3.1 Kaitsemeetme korraldus kaitseks elektrilöögi eest [21]

3.2 Lähteandmed, kontseptsioon ja skeem

Katseseadme projekteerimiseks lahendatavad küsimused ja teemad:

- Dimensioneerida seadmete võimsused
- Dimensioneerida ja valida kaablid ning kaitselülitid
- Projekteerida ohutus- ja abitoite ahelad
- Kavandada ühendused ja mõõtepunktid
- Seadistada inverter
- Sisustada liitumiskilp
- Kavandada fotoelektrilise süsteemi imitaator
- Kavandada mehhanism FE moodulite kaldenurga muutmiseks
- Kujundada stand

Projekteeritud labori jaotusvõrgu mudeli alajaamas, mille toitele saab päikesepargi katsestendi ühendada, on 5 kVA-se näivvõimsusega ja 400/400 V astmetega 3-faasiline trafo. Selle järgi valiti ka päikesepargi katsestendi inverteri võimsus. 3 kW-ne FE süsteem on piisava väljundvõimsusega, et viia jaotusvõrgu mudelis näiteks võrgu talitluspinge tõusuni – juhul kui võrguelementide takistused on piisavalt suured. Joonisel 3.2 on kujutatud jaotusvõrgu mudeli skeem.



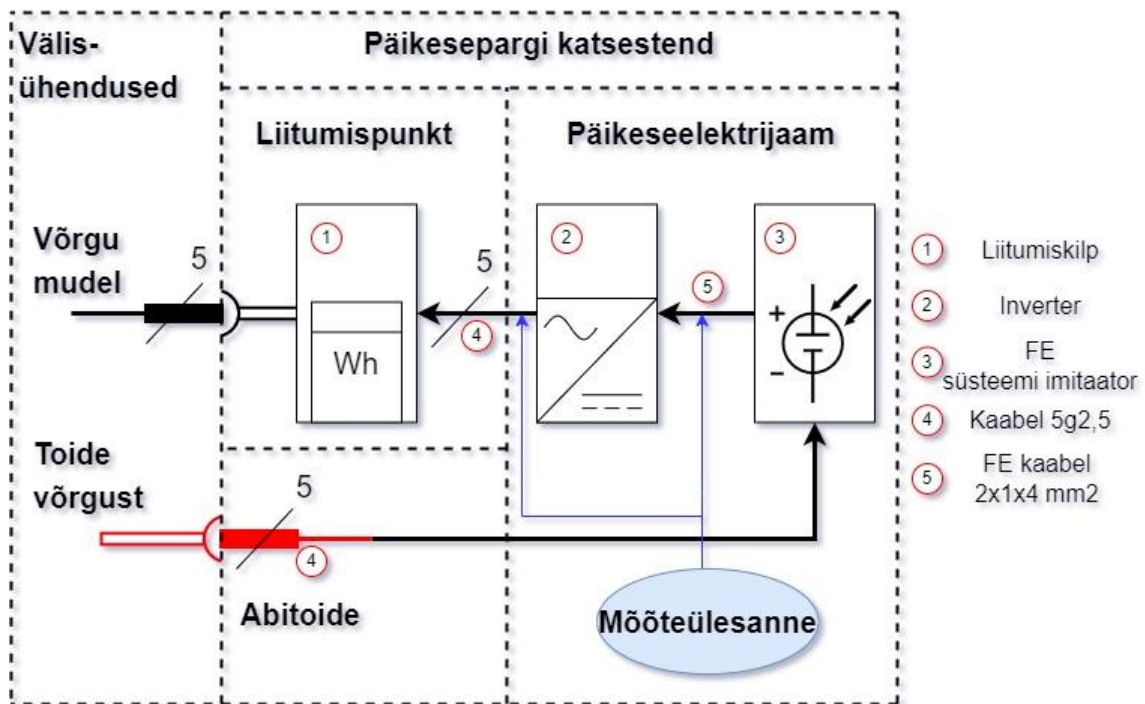
Joonis 3.2 Labori jaotusvõrgu mudeli skeem

Tulenevalt sissejuhatuse alapeatükis toodud reaalse päikesepargi mõõtmetest pole võimalik ega otstarbekas sellises koguses FE-ste moodulite paigaldamine laborisse. FE-ste moodulite töötamine nimiväljundvõimsusel eeldab standardsetele katsetingimustele vastavat kiirgusintensiivust, milleks on 1000 W/m^2 . Sellise kiirgusintensiivuse saavutamine laboris tähendab suures koguses tehislake valgusallikaid. Kui arvestada 20 m^2 -se pinnaga vastavalt alapeatükis 1.1 arvatutule, siis on vaja kiirgusvoogu $20\,000 \text{ W}$, mille spekter on päikese spektriga sarnane.

Oleks küll võimalik paigaldada paneelid näiteks TalTechi NRG maja katusele ja vedada ühenduskaablid laborisse, kuid selline laboriseade läheks väga kalliks maksma ning sel juhul ei saaks laboriseadet kasutada pimedal ajal. See on üks üsna oluline kriteerium, sest suur osa õppetööst ülikoolis toimub just sügis-talvisel perioodil.

Et oleks võimalik ikkagi päikeseparki emuleerida, saab kasutada väiksema võimsuse ja mõõtudega FE-si mooduleid, MPP muundurit ja koormust. Selleks, et emuleerida FE-st süsteemi tuleb kasutada FE-ste moodulite väljundit, et juhtida alalistoiteallikat. Alalistoiteallika väljundparameetrid tuleb valida vastavalt inverteri sisendparameetrite piirangutele. FE-stele moodulitele vajalik valguskiirgus tekitatakse halogeenlampidega või reaalselt päikesekiirgust kasutades, kui see on võimalik. FE-ste moodulite kaldenurkasid saab vastava mehhanismiga muuta, et näha valguskiirguse langemisnurga mõju mooduli väljundile. Nii FE-ste moodulite valgustamiseks kui ka alalistoiteallika toitmiseks on ette nähtud abitoide 3 faasilise 16 A -se jõupistikuga elektrivõrgust.

Katseseade koosneb kolmest peamisest osast: fotoelektrilise süsteemi imitaator, inverter ja liitumispunkt (vt Joonis 3.3). Fotoelektrilise süsteemi imitaator oma elementidega moodustab 3 kW -se fotoelektrilise sektsiooni, mille väljundit juhitakse vastavalt reaalsele fotoelektrilise moodulite väljundile. 3 kW -se sisendvõimsuse annab süsteemi alalistoiteplokk, mis saab toite elektrivõrgust. Katseseadme oluline osa on ohutusahelad, mida põhimõtteskeemil selguse loomiseks pole kujutatud.

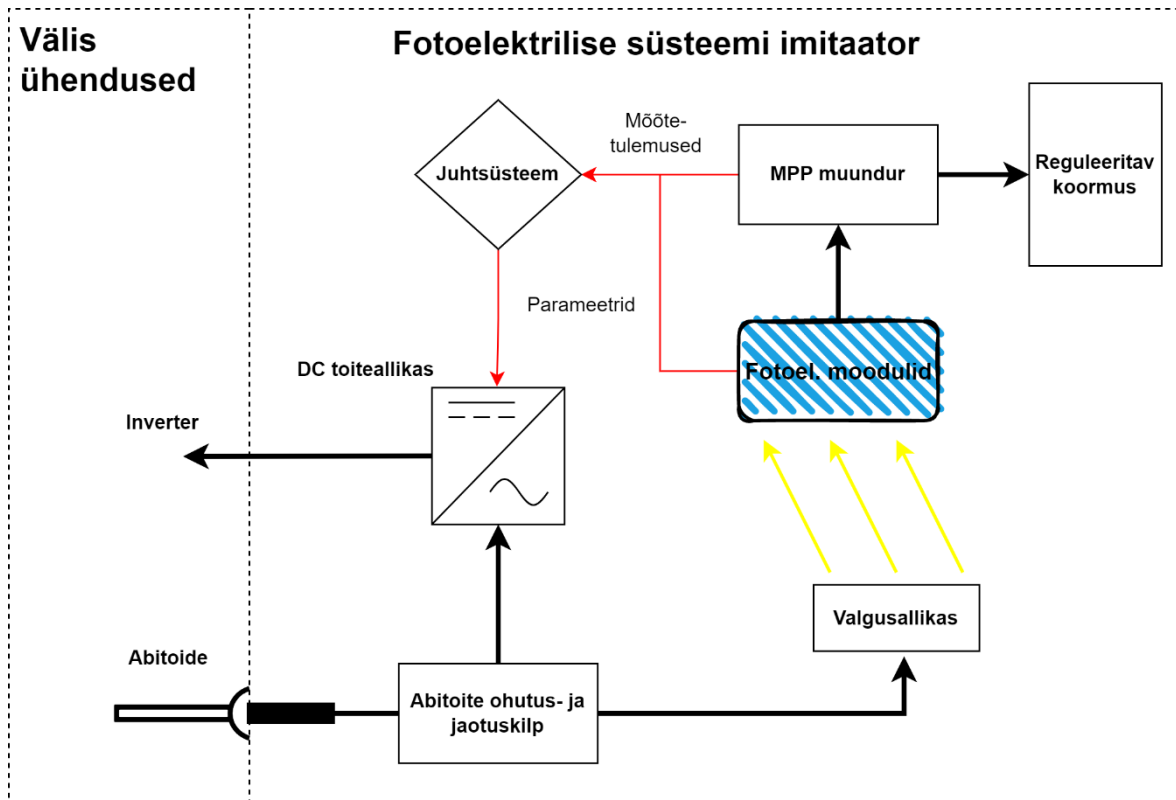


Joonis 3.3 Katseseadme põhimõtteskeem

Katsesendi juurde kuulub mõõtmisülesanne, mis tähendab 3 faasiliste vahelduv- ja alalispingete ning vahelduv- ja alalisvoolude mõõtmist. Täpsem laboriülesande sisu selgub pärast katsesendi valmimist. Vahelduvpinge ja -voolu mõõtmiseks kasutatakse ABB M2M võrguanalüsaatorit koos voolutrafodega. Lisaks luuakse võimalus mõõta vajalike suurusi ampertangide ja välise multimeetriga, selle jaoks kasutatakse 4 mm-seid „banaan“-tüüpi pistikuid pinge mõõtmiseks ja juhtmeaasasid ampertangide jaoks.

Katseseade on väliselt ühendatud 3-faasilise 16 A-se jõupistikuga abil nii labori jaotusvõrgu mudeliga kui ka kohaliku elektrivõrguga. Eristuseks kasutatakse jaotusvõrgu mudeli pistikühenduse juures musta värvi pistikühendust.

Joonisel 3.4 on kujutatud FE-se süsteemi imitaatori alamsüsteemi. Alamsüsteemi moodustavad: MPP muundur, FE-sed moodulid, reguleeritav koormus, juhtsüsteem alalistoiteallika juhtimiseks, valgusallikas, alalistoiteallikas ja välisühendused. Punase joonega on tähistatud sisendid alalistoiteallika juhtimiseks ja jämeda joonega vooluahelad.



Joonis 3.4 Fotoelektrilise süsteemi imitaatori põhimõtteskeem
Katsesendi skeem on lisades(vt Lisa 2).

3.3 Põhiseadmed

3.3.1 Katsesendi raam

Katsesendi raam sai valitud vastavalt sellele, millised raamid ja metallkonstruktsioonid olid TTÜ NRG majas olemas. Kuna üks ratastel 19 tolline standardraam oli vaba ja sobis töö jaoks mõõtmetelt, valiti see. Katsesendi külge saab kinnitada erinevaid riuleid ja metallplaate komponentide kinnitamiseks. Raami alusplaadi mõõdud on 710x600 mm.

Raami standard EVS-EN 60297-3-100:2009 käsitleb 19 tolliste elektroonikakomponentidele mõeldud raamide mõõtmeid. Tabelis 3.1 tuuakse välja raami peamised mõõdud.

Tabel 3.1 Raami mõõdud [22]

Raami kõrgus (mm)	2000
Ava kõrgus (mm)	1778

Laius (mm)	600
Sügavus (mm)	300

3.3.2 Inverter ja seadistamine

Inverteri valimisel analüüsiti esmalt kas valida 1-faasiline või 3-faasiline inverter. Elektrivõrgud talitlevad 3-faasiga ja suur osa päikeseparke on varustatud 3-faasilise inverteriga. Lõplik otsus valida 3-faasilise inverter lähtus sellest, et 3-faasilise inverteriga saab realistlikumalt uurida mõju jaotusvõrgu mudelile, mis on samuti 3-faasiline. Valik toimus koostöös programmijuhiga vastavalt vahenditele, mida sai inverteri ostuks kasutada. Üks oluline kriteerium oli ka tarneaeg.

Töö jaoks valiti vähima võimsusega 3-faasiline inverter, milleks osutus tuntud tootja Froniuse, Symo 3.0-3-S võrguinverter. Valik lähtus ka inverteri liideste olemasolust, et saaks võimalikult palju infot inverterist kätte. Inverteri peamised elektrilised parameetrid on tabelis 3.2. Inverter kuulub ka Elektrilevi OÜ poolt heakskiidetud inverterite nimekirja. Odavamaid ja sama hea kvaliteediga invertereid ei õnnestunud leida.

Tabel 3.2 Inverteri põhilised elektrilised andmed [3]

Parameeter	Väärtus
Võrguühenduse tüüp	3~ NPE 400/230, 3~ NPE 380/220 V
MPP jälgijate arv	1
Maksimaalne sisendvool paneelidelt, I_{DC}	16 A
Maksimaalne lühisvool paneelidelt, I_{SC}	24 A
Lubatud alalispinge vahemik, $U_{DC\ mpp}$	150-1000 V
Inverteri käivitumiseks vajalik pinge, $U_{DC\ start}$	200 V
Nominaalsisendpinge, $U_{DC,r}$	595 V
Maksimaalne võimsus FE moodulitelt, $P_{DC\ max}$	6 kW
Nimiaktiivvõimsus, $P_{AC,r}$	3 kW
Maksimaalne näivvõimsus, $P_{AC\ max}$	3 kVA
Nimiväljundvool, $I_{AC\ nom}$	4,4 A
Sagedus, f_r	50/60 Hz
Võimsustegur, $\cos\ \varphi$	0,7-1, induktiivne/mahtuvuslik
Maksimaalne efektiivsus, η_{max}	98%
Kaitseklass	I klass

I klassi tarviti (vt Joonis 3.5) põhikaitseks (kaitse elektrilöögi eest rikkevabas olukorras) on põhiisolatsioon ja rikkekaitseks on seadmete pingeltide osade ühendamine kaitsejuhiga. Lisaks tuleb isoleermaterjalist puutevõimalikud osad, mis on ette nähtud

haaramiseks, katta topeltisolatsiooniga – isolatsioon ümber faasijuhi ja lisaks teine isolatsioon ümber faasijuhtide. [23]



Joonis 3.5 I klassi tarviti tingmärk [23]

Joonisel 3.6 näeb inverteri esipaneeli koos ekraaniga. Ekraani all on puudetundlikud nupud menüüs navigeerimiseks ja ekraani kõrval vasakul on näha põlemas kollast valgusdiodi. Ekraani all, musta katepaneeli taga on erinevate liideste pordid.



Joonis 3.6 Fronius Symo 3.0-3-S

Lisaks on näha inverteri alusplaati, millega kinnitatakse inverter seina või muu konstruktsiooni külge. Alusplaadi alumises osas on ühendusklemmid alalis- ja vahelduvvoolu kaablitele ning alalisvoolupoole lahklüliti.

Inverter on varustatud lahklülitiga inverteri alalispinge poolel, et oleks võimalik FE-sed moodulid inverterist eraldada, kui on vaja inverterit hooldada või vahetada. See nõue on ka standardis EVS-HD 60364-7-712:2016.

Lahklüliti vastab IEC 60947-3:2020 *Low-voltage switchgear and controlgear* standardile. Inverter tarbib ooterežiimis alla 3 VA-i näivvõimsust, alla 3 var-i

reaktiivvõimsust ja alla 1 W-i aktiivvõimsust [24]. Inverteri reaktiivvõimsust saab reguleerida, selleks on vaja minna nn salajasse menüüsse. Salajase menüüle ligipääsuks on vaja taotleda salakoodi Froniuse tehniliselt kasutajatoelt. [25]

Inverteri peamine osa ehk jõuelektronika koos korpusega käib alusplaadi peale ja tänu klemmidele ühendub alusplaadiga. Alusplaadi ülemises osas on inverteri kinnitamiseks vajalikud avad. Inverteri jahutuseks on kasutusel õhkjahutus, mille ventilaatoreid reguleeritakse vastavalt koormusele. Inverter koos korpusega kaalub 16 kg. Inverteri korpus on IP65 kaitseastmega, mis tähendab, et inverter on tolmukindel ja võimeline taluma veejugasid kõikidest suundadest. Inverter töötab temperatuurivahemikus -25 kuni 60 °C. [24]

Inverteril on palju erinevaid liideseid, mille kaudu on võimalik inverteriga luua sideühendus ja saada infot võimsuse ning teiste parameetrite kohta. Inverteri saab ühendada internetivõrku, kas juhtmevaba ühenduse loomisega või Ethernet kaabliga otse võrku ühendades.

Inverteri seadistamine toimus kasutusjuhendi järgi. Inverteri seadistamiseks tuli ühendada inverter 3 faasilise 16 A-se jõupistikuga NRG hoone 322b ruumi laboriseadme külge ning juhtme teised otsad inverteri vahelduvpoole ühendusklemmide külge. Alalistoiteallika alalistoitekaablid tuli ühenda inverteri alalispoole ühendusklemmide külge. Kui inverterile anda vahelduvvoolupoolelt toide, lülitub inverter sisse ja saab hakata seadet konfigureerima.

Inverteri esmakordsel käivitamisel tuleb seadistada nõutud parameetrid: esmalt tuli valida keel, seejärel riik ja sagedus(Eesti, 50 Hz), siis kellaeg ja kuupäev. Lülitades alalistoiteallika sisse, tekib kohe pinge alalispoole klemmidele ja seejuures peab olema ettevaatlik, kuna alalistoiteallika maksimaalne väljundpinge on 425 V.

Kui inverteri lahküliti sulgeda, hakkab inverter tööle, kui alalispinge on vähemalt 200 V. Enne kui inverter hakkab võrku elektrit edastama, kontrollitakse olulisi võrgu parameetreid nagu pinge ja sagedus.

Inverteril on kolm signaallampi: roheline – näitab, et inverter töötab ja edastab võrku elektrienergiat, kollane – näitab et seade töötab, aga võrku elektrit ei tooda(ooterežiim, tarkvara uuendus või madal alalispinge) ja punane – seadmel on toide olemas, võib tähendada ka seadme viga.

3.3.3 Liitumiskilp ja arvesti

Liitumiskilp pole otseselt päikeseelektrijaama osa, kuid ilma võrguettevõtja nõuetekohase liitumiskilbita pole võrku võimalik elektrit edastada. Liitumiskilbis asub tarbija liitumispunkt, kus toimub elektrienergia mõõtmine ning millega piiritletakse kust lõpeb võrguettevõtja elektripaigaldis ja kust algab kliendi elektripaigaldis. Elektrienergia mõõtmiseks on arvesti, mis elektritootmise puhul peab mõõtma mõlemasuunalist reaktiiv- ja aktiivenergiat.

Töös on kasutusel 3-faasiline P2P (*Point-to-Point*) kahepoolse mõõtmisega arvesti ehk kombiarvesti. P2P puhul kasutatakse GPRS andmeside, et edastada andmeid mõõtepunktist keskhaldussüsteemi [26]. Töös kasutatud arvesti mudel on ZMF110CBtFs2, see võimaldab mõõta aktiiv- ja reaktiivenergiat mõlema suunaliselt (vt Lisa 4).

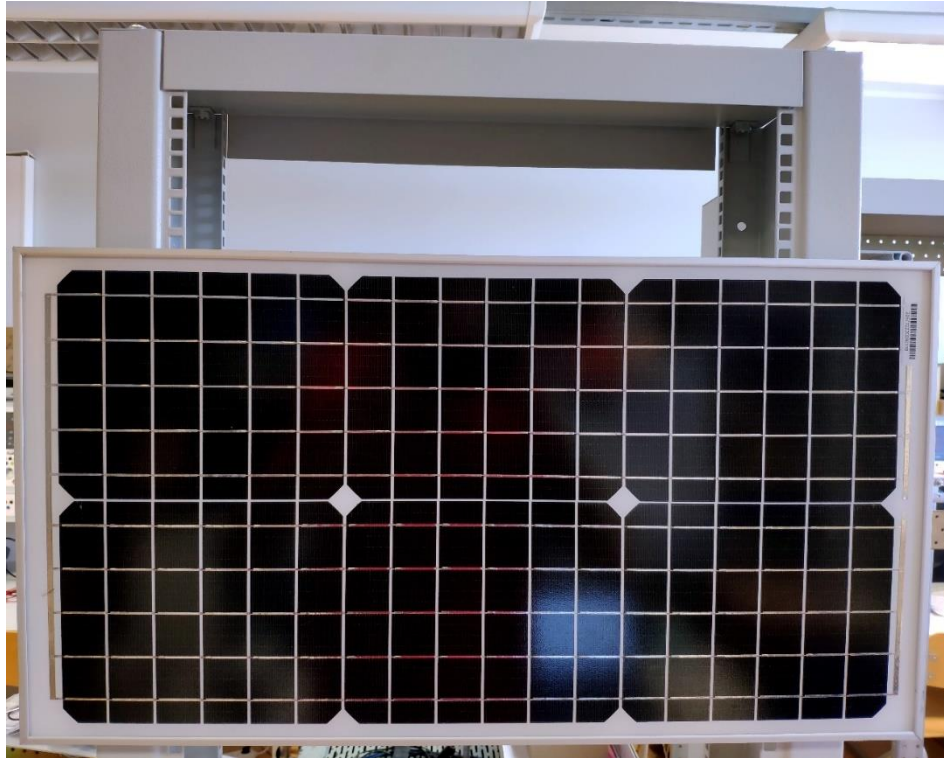
Lisaks on liitumiskilbis võrgupoolne kaitselahutuslülit (pealüliti) ja peakaitse. Pealüliti eesmärk on kaitselahutuse tagamine, et oleks võimalik kilbi juures ohutult töötada. Peakaitse määrab liitumispunkti läbilaskevõime ja reageerib rikkele. Peakaitse näol on tegemist C- või B- tunnusjoonega moodulkaitselülitiga.

Väiketootjate ehk kuni 25 kW tootjate puhul kasutatakse samasugust liitumiskilpi nagu tarbijatel. Kilpi lisatakse kahepoolsele toitele viitavad ohusildid, kaitselahutuslülit tarbija kaabli ühendusklemmide asemel ja tootmisele vastav arvesti. Üle 25 kW tootmisüksuste puhul kasutatakse tootja liitumiskilpe.

Töös kasutatakse Harju Elektri standardset 1-kohalist liitumiskilpi, mis on mõeldud postile paigaldamiseks. Kilbis on koht arvestile, pealüliti, PEN latt, koht peakaitsele ja kliendi kaabli ühendusklemmid. Kilbi all on näha kaabli läbiviike (vt Lisa 1).

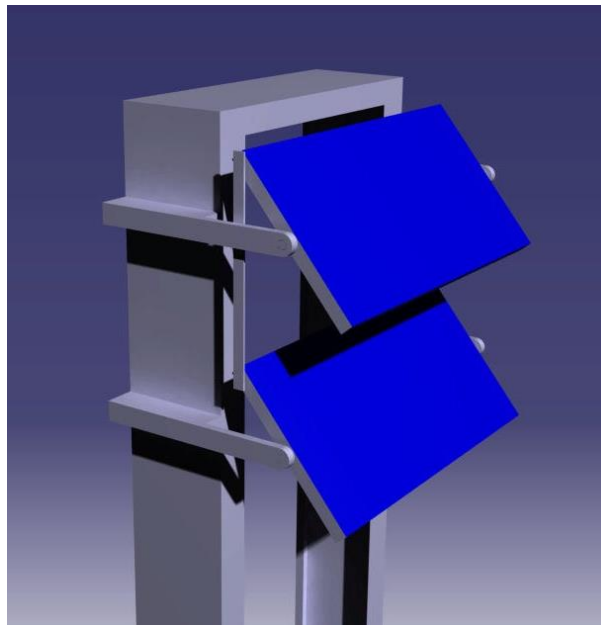
3.3.4 Fotoelektriline moodul ja selle kinnitamine

FE-se mooduli valik lähtus raami mõõtmetest. Kasutatav FE moodul ei tohiks olla märkimisväärselt suurem kui raami laius, et oleks võimalik disainida moodulitele mehhanism, millega saaks moodulite kaldenurka võimalikult lihtsalt muuta. Raami laius on 600 mm ja paneeli pikkus 650 mm. Paneel on asetatud raamile horisontaalselt. Kasutatavaks mooduliks valiti CELLEVIA POWER CL-SM30M (vt Joonis 3.7). Moodul on 30 W-se nimivõimsusega ja koosneb 36 fotoelemendist (vt Lisa 3). Katsestendile tuleb 2 sellist moodulit, mille kaldenurkasid saab paralleelmehhanismi abil koos muuta.



Joonis 3.7 Valitud FE moodul stendil

Joonisel 3.8 on kujutatud FE-ste moodulite kinnitamiseks ja kaldenurkade muutmiseks mõeldud mehhanismi kavand. Täpsem konstruktsiooniline lahendus selgub, kui on paigas stendi teiste komponentide täpsem paigutus.



Joonis 3.8 Fotoelektriliste moodulite kinnitamise kontseptsioon

3.3.5 Alalistoiteallikas

Alalistoiteallika valik lähtus asjaolust, et oli vaja piisavalt suurt sisendalalispinget, et Froniuse inverter looks ühenduse võrguga ja hakkaks teostama energiamuundust. Alalistoiteallika väljundvõimsus pidi olema vähemalt 3 kW, et inverter töötaks nimivõimsusel. Samuti oli oluliseks valikukriteeriumiks, et alalistoiteallika pinget ja voolu saaks arvuti abil juhtida. Valimisel tuli arvestada tarneaegadega, et oleks aega seadet katsetada.

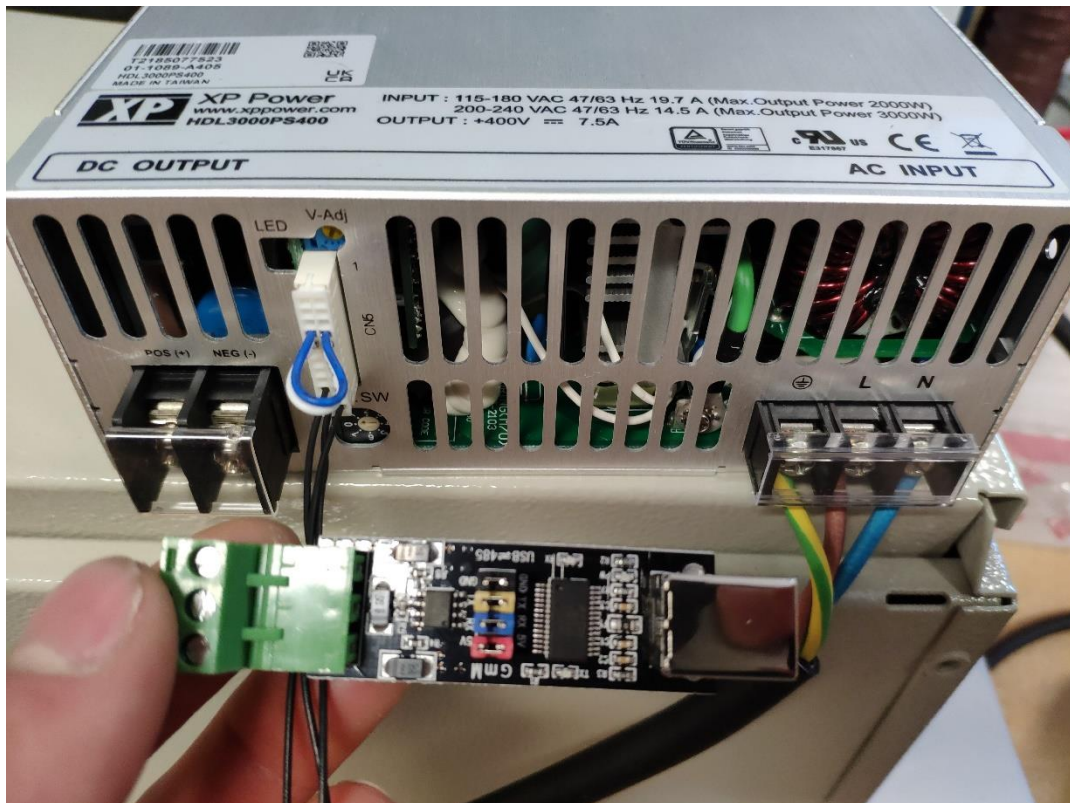
Niisiis sai valitud XP Poweri HDL3000PS400, mille parameetrid on toodud tabelis 3.3.

Tabel 3.3 XP Power HDL3000PS400 andmed [27]

Parameeter	Väärtus
Sisendpinge vahemik	90-264 V
Maksimaalne sisendvool	14,5 A
Võimsus	3000 W
Väljundpinge vahemik	150-400 V
Väljundvool	7,5 A
Voolu ja pinge reguleerimisulatus	0-105%
Efektiivsus(230V ja max. koormuse juures)	92%

Maksimaalse sisendvooluga peab arvestama kaitsmeid dimensioneerides, kuna see vool on kõige suurem koormusvool katsestendi juures. Alalistoiteallikat saab juhtida I²C ja RS485 liidestega. Otsustati kasutada RS485 liidest, kuna selle abil juhtimine tundus lihtsam.

Joonisel 3.9 on näha alalistoiteallika tagapaneel, kus asuvad vahelduv- ja alalispinge ühendusklemmid, signaalvalgusdiodid, juhtimiseks vajalik port CN5 ja adresseerimise valikuks potentsiomeeter. Viimane potentsiomeeter on vajalik mitme alalistoiteploki eristamiseks, et juhtida neid paraleeltöö korral. Roheliselt põlev signaalvalgusdiodid annab märku, kas alalistoiteploki väljund on pingestatunud või mitte. [27]

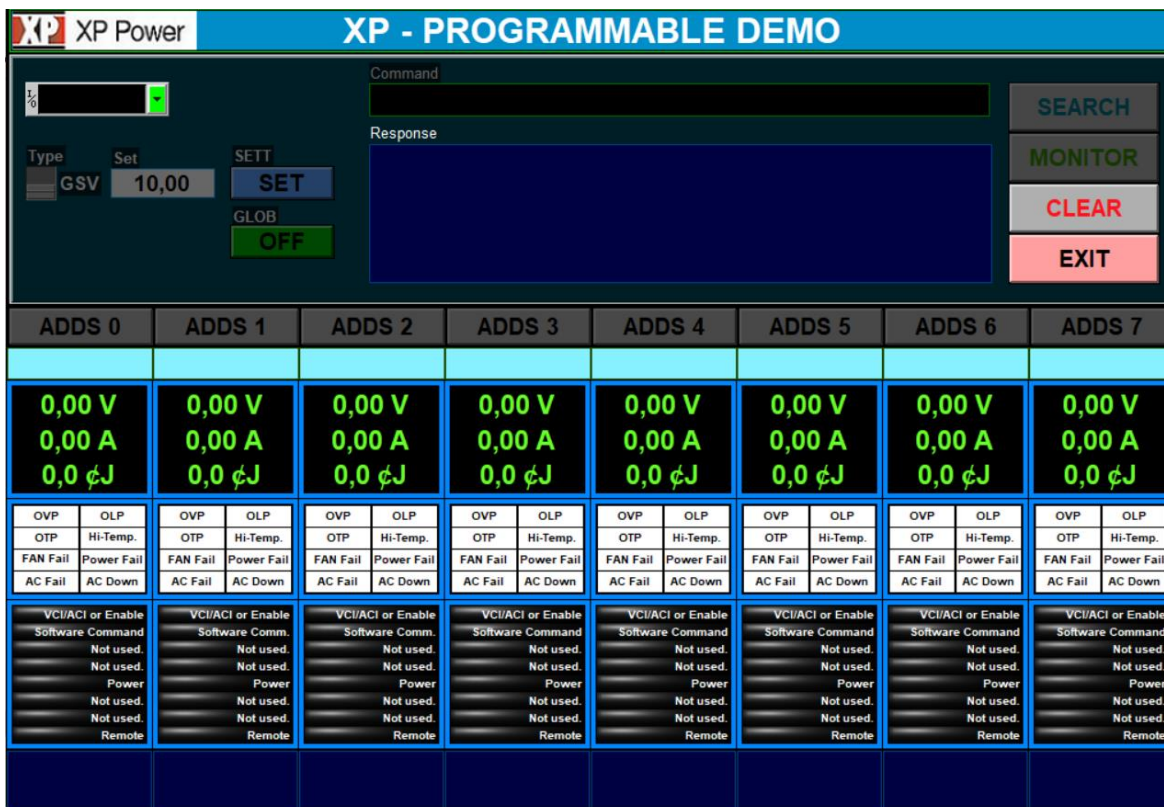


Joonis 3.9 Valitud alalistoiteallikas XP Power HDL3000PS400 koos RS485 juhtimisliidesega

Alalistoiteallika pinget ja voolu saab juhtida analoog- või digitaalsignaalidega. Pinget saab fikseeritud vahemikus reguleerida ka potentsiomeetriga V-Adj, mis asub toiteplokki tagapaneelil valgusdiodi kõrval. Tehasest on reguleeritud peale 400 V väljundpinge, mida saab 6,25% ulatuses reguleerida üles ja alla potentsiomeetriga. Autor katsetas pinget potentsiomeetriga reguleerimist, seda infot andmelehes ei olnud.

Joonis 3.9 esiplaanil on näha RS485/USB üleminekut, mille abil saab alalistoiteallikat arvutiga juhtida. Alalistoiteallika juhtimiseks on programm graafilise

kasutajaliidesega (vt Joonis 3.10). Programmi abil saab reguleerida allika väljundpinget ja -voolu.

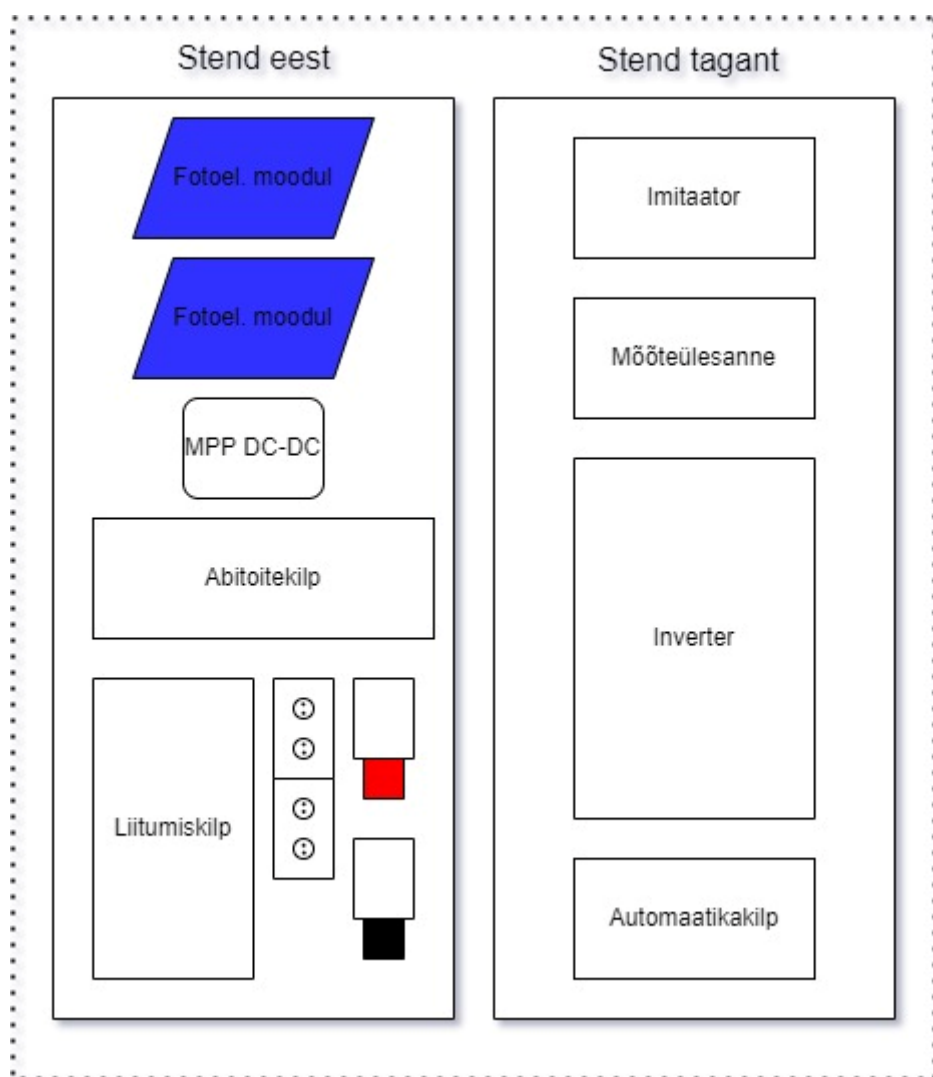


Joonis 3.10 Alalistoiteallika juhtimiseks vajalik programm

Autor katsetas ka programmi abil juhtimist, kuid ei õnnestunud seda korrektselt tööle saada, sest programm andis veateate jadapordi valimisel.

3.4 Seadmete paigutus stendil ja disain

Stendile seadmete ja komponentide paigutamiseks kaaluti erinevaid alternatiive. FE-si mooduleid valgustatakse hõõglampidega ja see tekitab märkimisväärselt soojust, seetõttu võiksid inverter ja alalistoiteallikas olla teisel pool stendi, et vältida ülekuumenemist. Alalistoiteallikas koos juhtahelaga paigutatakse eraldi korpuse sisse, et tagada ohutus. Alalistoiteallika korpus disainitakse ise 3D-modelleerimistarkvaraga ja prinditakse 3D-printeriga välja. Korpusesse tuleb jätta avad allika jahutuse jaoks. Liitumiskilbi juurde paigutatakse jõupistik ja -pesa ning pesad ka lampide jaoks (vt Joonis 3.11). Joonisel pole kujutatud täpset juhtmete asetust, kuna see selgub töö tegemise käigus. Juhtmete paigutamisel peetakse silmas ohutust, samas pööratakse tähelepanu ka esteetilisele välimusele. Mõõteülesande karpi kavandatakse mõõteahelad ja -otsad vajalike suuruste mõõtmiseks, sellest täpsemalt alapeatükis 5.1.



Joonis 3.11 Seadmete paigutus stendil

4. ABITOITE- JA OHUTUSAHELATE PROJEKTEERIMINE

Abitoiteahelate ülesanne on tagada elektritoide halogeenlampidele, alalistoiteallikale, juhtimissüsteemile, stendi koosseisus olevatele mõõteseadmetele ja motoriseeritud lülitile. Koormusvoolud on üsna suured – halogeenlampidele ja alalistoiteallikale vajaliku võimsuse tarvis on vaja 3 faasilist 16 A-st ühendust.

Ohutusahelate ülesanne on katkestada rike korral ahelad ja välistada oht inimesele.

Vastavalt ülaltoodud ülesannetele projekteeritakse ja kavandatakse abitoite- ja ohutusahelad.

4.1 Pistikühendused ja nende kavandamine

Tööstuslike pistikühendusi ja nende nõudeid käsitleb standard EVS-EN 60309-1:2001. See standard käsitleb ühendusi, mille alalis- või vahelduvpinge ei ületa 690 V, vahelduvpinge sagedus ei ületa 500 Hz ja nimivool ei ületa 250 A.

Katsestend on väliselt ühendatud kahe 3 faasilise tööstusliku pistikühendusega. Üks ühendus on 16 A-se pesa ja teine ühendus 16A-se pistiku näol. Pesa on mõeldud labori jaotusvõrgu mudeli ühendamiseks pikendusjuhtmega. Ühendustarvik stendil peab olema just pesa, kuna päikesepargi stend on toitev pool ja labori jaotusvõrgu mudel on koormus – tuleneb EVS-EN 60309-1:2001 nõuetest [28].



Joonis 4.1 Pesa jaotusvõrgu mudeli jaoks [29]

Pistik on päikesepargi stendi abitoiteahelate toitmiseks. Koormuse pool peab olema standardi kohaselt pistikuna [28].

Lisaks on pistiku ja pesa korpuste värvid erinevad, et paremini eristada ühendusi ja teha valesti ühendumine võimalikult keeruliseks. Pesa on musta värvi ja pistik punast värvi

(vt Joonis 4.1 ja Joonis 4.2) – need on samuti pistikühenduste standardi järgi defineeritud värvikoodid [28].



Joonis 4.2 Pistik abitoitele [30]

Halogeenlampidele on ette nähtud standardsed 1-faasilised pistikupesad. Pistikupesadele on ette nähtud rikkevoolukaitse, et kaitsta inimesi ohtliku rikkevoolu eest, mis võib tekkida isolatsioonirike, kere -või maaühenduse tulemusel.

Rikkevool tekib faasi ja maa vahel, normaaltalitusel süsteemi puhul faasi ja maa vahel voolu ei teki ning faasivoolude ja neutraali voolu summa on null. Rikkevoolukaitse tööpõhimõte seisnebki selles, et rikkevool tekitab lisanduva lekkevoolu faasis, kus rike paikneb. Lisanduv lekkevool omakorda tekitab voolude ebabalansi lüliti mõõteahelas, mille tulemusel kaitse reageerib.

4.2 Kaablid

Stendi juures kasutatavate kaablite isolatsioonitase peab vastama elektripaigaldise suurimale nimipingele.

Päikesepaneele omavahel ühendatakse spetsiaalsete kaablitega. Kaablitel on kõrgendatud nõuded tingituna keskkonnatingimustest, kus kaablid paiknevad.

Standardis EN 50618 kirjeldatakse, milliseid kaableid tuleb kasutada fotoelektrilise süsteemide alalisvoolupoolel. Kaablid peavad olema sobilikud kasutamiseks välitingimustes mitmeid aastaid, seetõttu on kaablid halogeenivabad, UV- ja veekindlad. Isolatsioonimaterjalina kasutatakse ristsillatud polüetüleeni(XLPE). Kaablisooned on vasest ja need peavad olema tinatatud. Kui kasutatav kaabel läbib kõik standardis nõutud katsed, siis võib kaablit fotoelektrilises süsteemis kasutada. Standardis tuuakse välja kaablite voolutaluvused vastavalt ristlõikele ja paigaldusviisile (vt Lisa 7). [31]

Fotoelektriliste moodulite ühendamiseks kasutatakse spetsiaalseid pistikühendusi – MC4(Multi-Contact 4 mm). Number 4 tähistab pistiku kontakti läbimõõtu. Ühendused on ilmastikukindlad – IP68 kaitseklass ja UV-kindlus(vt Joonis 4.3). Müüakse 2,5-10 mm² ristlõikega fotoelektriliste kaablite ühendamiseks, nimipingega kuni 1500 V ja nimivooluga 17-50 A. MC4 pistikühendus on üks laialdasemalt kasutatud ühendusviise fotoelektrilistes süsteemides tänu oma heale töökindlusele, väiksele hoolduskulule ja väikestele kadudele. [32]

Katsestendi FE-sed moodulid ühendatakse MC4 pistikutega, et tagada ohutus ja kasutada reaalse päikeseelektrijaama komponente.



Joonis 4.3 MC4 pistikühendus [32]

Vahelduvvoolu kaableid kasutatakse nii liitumiskaabli kui ka inverteri ühenduskaabli näol ning need on vajalikud, et ühendada FE süsteem kohaliku elektripaigaldise või elektrivõrguga. Vahelduvvoolu kaablina kasutatakse kuni 1 kV isolatsiooniga kaableid. Kaableid müüakse nii vasest kui alumiiniumist faasijuhtidega, lisaks eristatakse kiulisi ja mittekiulisi kaableid.

Enim kasutatakse jaotusvõrkudes Draka Keila AXPX jõukaablit, kuna sobib välispaigalduseks, on hea mehaanilise tugevusega ja halogeenivaba. AXPX jõukaablid on 4 soonelised alumiiniumkaablid ristsillatud polüetüleen(XLPE) isolatsiooniga, 3 faasijuhi ja ühe PEN juhiga – seega sobib TN-C juhistikusüsteemi. Ristlõiked, mida Draka Keila pakub on 16-300 mm². 4 soonelist kaablit antud töös ei kasutata. [33]

Inverteri väljundklemmidele ühendatakse 5 sooneline kaabel TN-S juhistikusüsteemi kasutades. Inverteri manuaal lubab kasutada kas vasest või alumiiniumist mittekiulist juhet või vasest kiulist juhet. 5 soonelise kaablite valik on suur. Üks võimalik variant Draka Keila toodangust on XPK vasest jõukaabel, mida pakutakse nii 3, 4 ja 5 soonelisena. Kaablisooned 1,5-10 mm² on mittekiulised, üle 10 mm² on tegemist keerutatud mitmetraadilise vaskjuhtmega. Sobib nii välis- kui sisepaigalduseks ja on halogeenivaba. Nii AXPX kui ka XPK vastavad standartitele IEC 60502-1 ja IEC 60332-1, esimene käsitleb nõudeid konstruktsioonile ja teine on seotud kaabli tulekindlusega. [34]

Päikesepaneelide ühendamiseks MPP muunduriga kasutatakse topeltisolatsiooniga spetsiaalseid ühesoonelisi alaskaableid. Voolutaluvuse poolest võiks kasutada 1,5 mm² ristlõikepindalaga kaableid, kuid sellise ristlõikega kaableid ei müüda, väikseim ristlõige on 4 mm² (vt Joonis 4.4). Vahelduvvoolukaablitena kasutatakse standardseid 5 soonelisi vaskaableid ristlõikega 2,5 mm².

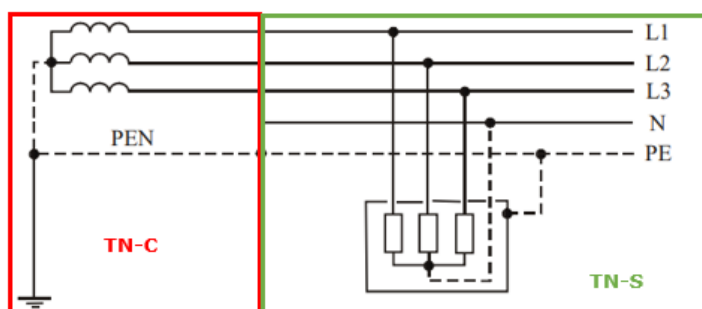


Joonis 4.4 Kasutatav alaskaabel [35]

4.3 Juhistikusüsteemid ja erisus katsestendil

Jaotusvõrgus ja liitumiskilpides on kasutusel 4-juhiline TN-C süsteem (vt Joonis 4.5). Hoonete elektripaigaldises minnakse üle TN-S süsteemile, et tagada parem häiringukindlus. TN-C süsteemi puhul ei saa kasutada rikkevoolukaitset. Kui TN-C süsteemis tekib kereühendus tekib 1-faasiline lühis ja reageerib liigvoolukaitse.

Üleminek ühelt süsteemist teise toimub tavaliselt elektripaigaldise jaotus- või peakilbis, kus on eraldi PE(kaitsemaandus) ja N(neutraal) latid, mis on omavahel ühendatud, mujal seadmetes ja juhtmetes on PE ja N juhid eraldi (vt Joonis 4.5). Kaitsemaanduslatile on PE juhtmega ühendatud kõik paigaldise maandatavad osad, et tagada potentsiaaliühtlustus. See tähendab, et pingeltide osade potentsiaal on ühesugune ja ligikaudu võrdne maa potentsiaaliga. Sel juhul ei teki ohtliku puutepinget erinevate metallosade samaaegsel puutumisel. [23]



Joonis 4.5 TN-C-S süsteem [36]

Et tagada katsestendi ohutus tuleb terve katsestendi ulatuses kasutada TN-S süsteemi. Reaalsetes süsteemides on liitumiskilbis kasutuses TN-C süsteem, katsestendi liitumiskilbis seda rakendada ei saa, sest liitumiskilbist väljuv toitev pool ühendatakse jaotusvõrgu mudeliga 5 soonelise jõupistikuga, kus on PE ja N sooned eraldi.

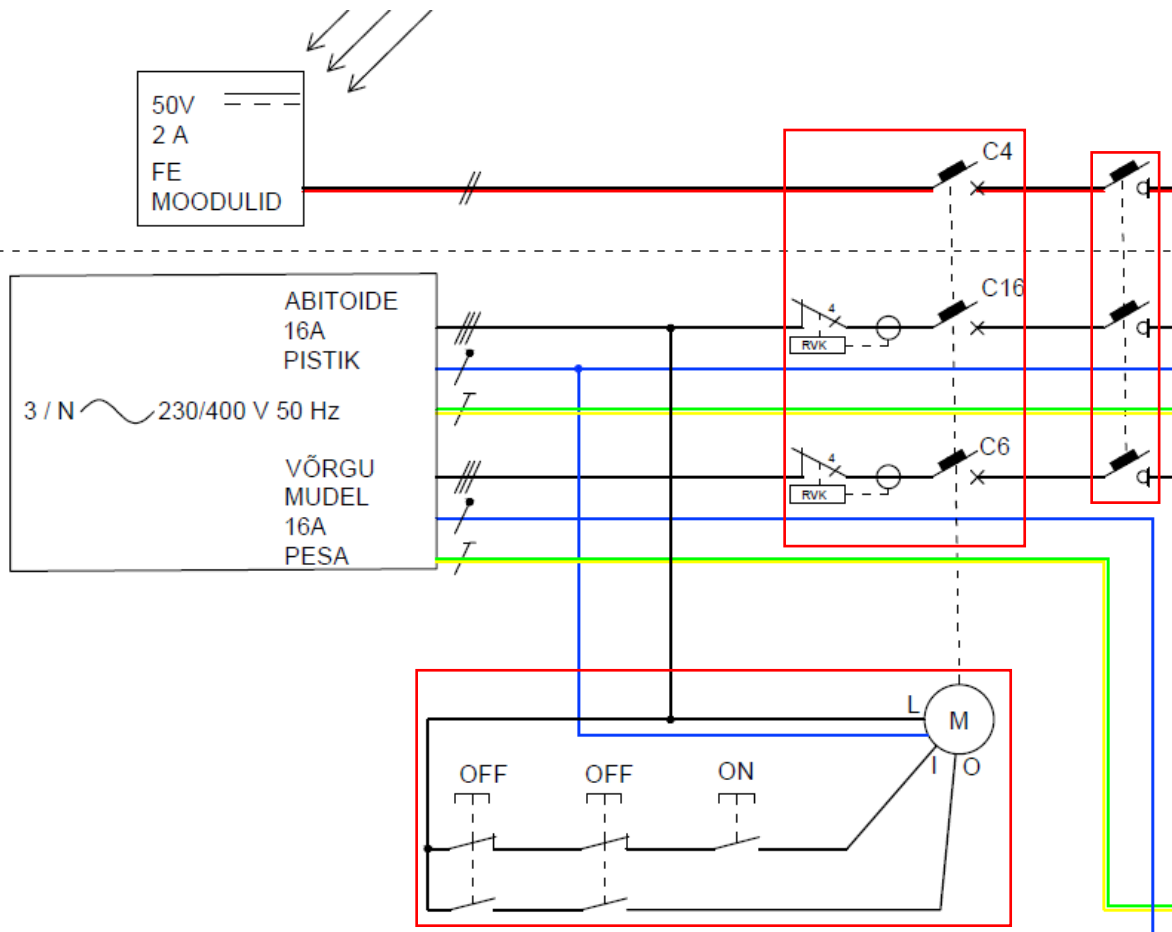
4.4 Ohutusskeem ja selle komponendid

Katsestendi projekteerimisel arvestatakse võimalike ohtlike olukordade tekkimisega seadet kasutades. Katsestendiga töötades võib esineda erinevat tüüpi rikkeid ja nende rikete puhul kasutatakse erinevaid meetmeid, et tagada ohutus rike ilmnemisel.

Tabel 3.4 Rikete tüübid ja vastavad abinõud

Olukorra või rike tüüp	Rakendatav meede
Rikkevool(pingealti osa puutumine)	Rikkevoolukaitse
Lühis	Liigvoolukaitse, kaitselüliti
Avari(mehaaniline või elektriline probleem stendi juures)	Avariilülitid koos mootorajamiga

Stendi ohutuks välja lülitamiseks hädaolukorras on tarvis avariilüliteid, millele vajutades lülitatakse automaatselt kogu stendi toide välja. Avariilüliti lülitamisel lülitatakse mootorajamiga moodulkaitselülitid välja(vt Joonis 4.6 ja Joonis 4.7). Mootorajami toide peab olema pidevalt tagatud, et ohutusautomaatika töötaks. Joonisel 4.6 on punasega välja toodud 3 olulist osa: mootorajam, rikke- ja liigvoolu kombineeritud kaitsmed ning lahklüliti.



Joonis 4.6 Katsestendi skeemi osa, millega tagatakse ohutus

Mootorajamiga lüliti külge on võimalik ühendada moodulkaitaselüliteid mõlemale poole. Katsestendi kogu toite välja lülitamiseks jaoks on vaja 8 poolust. 3 poolust on jaotusvõrgu mudeli ühenduse, 3 poolust abitoite ühenduse ning 2 poolust FE moodulite jaoks. Selle jaoks tuleb mõlemale poole mootorajamit panna 4 ühepooluseliseid kaitaselüliteid, mis omavahel ühendatakse.

Kui vajutatakse rohelist lüliti ehk ON lüliti, antakse toide läbi motoriseeritud lüliti mootorile, mis lülitab sisse moodulkaitaselüliti. Kui vajutatakse punast ehk OFF lüliti, mootori toide katkeb ja motoriseeritud lüliti tagastub vedruga algsesse asendisse. Joonisel 4.7 on näha motoriseeritud lüliti koos vajalike ON ja OFF lülititega. Avariilülid pannakse stendile kahele poole. Avariilüliti paigaldatakse kollasesse korpusesse, et lüliti oleks selgelt näha. Mootorajami andmeleht on töö lisades (vt Lisa 11).

Rikkevoolukaitsmed on vajalikud nii jaotusvõrgu kui ka abitoite ahelatele, kui peaks tekkima isolatsioonirike või kereühendus, lülitab rikevoolukaitsese toite välja. Ruumi kokkuhoiu tarvis kasutatakse kombikaitselüliteid, millel on rikke- ja liigvoolukaitsese omadused.



Joonis 4.7 Motoriseeritud lüliti koos kaitselülitiga ning sisse- ja välja lülitamiseks mõeldud lülititega

Katsestendi peab varustama ka nõuetekohase kaitselahutuslülitiga – see loob vajaliku mehaanilise eraldatuse ehk kaitselahutusvahemiku, et saaks vajadusel stendi remontida, hooldada või ühendusi muuta.

Selle jaoks oli vaja 8 pooluselise lahküliti, kuna välja on vaja lülitada abitoite ja jaotusvõrgu 3 faasi vahelduvpinge ühendused ja lisaks fotoelektriliste moodulite ahela alalispinge ühendus.

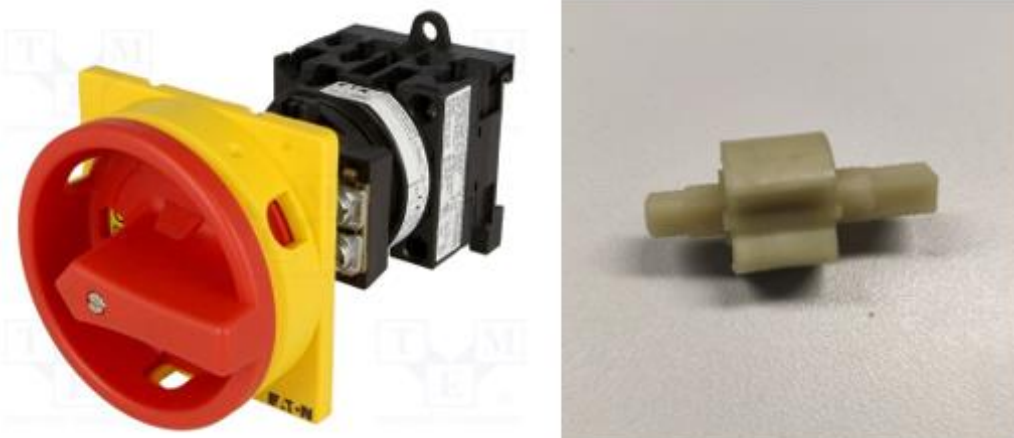
Sobiliku 8 pooluselise lahküliti saadavus on halb ja mõistliku tarneajaga varianti oli raske leida. Seega teise alternatiivse variandina koostati vajalik lüliti konfiguratsioon kahest Eaton T0-2-8900 4 pooluselise lahkülitist (vt Joonis 4.8), põhilised elektrilised andmed on tabelis 3.5. Nimetatud lüliti põhineb sektsioonidel, millised on omavahel ühendatavad sama pöördmehhanismiga. Olemasolev lüliti pöördmehhanismi komponent ei olnud sobilik, sest ei olnud piisavalt pikk, et lülitada mõlema sektsiooni kontaktid ümber. Seega oli vaja pöördmehhanismi tükk ise toota.

Originaal pöördmehhanismi (vt Joonis 4.8) tuli teha natuke pikemaks. Selleks mõõdeti nihikuga vajalikud mõõdud olemasolevalt tükilt ja koostati CATIA V5 modelleerimistarkvaras Catia V5 3D-mudel (vt Lisa 5). Et mudelist jõuda valmistooteni, tuleb modelleerimistarkvaras luua spetsiaalne fail (STL), et 3D-printeri tarkvara saaks luua printimiseks vajaliku koodi. Pärast seda 3D-prinditi esimene prototüüp välja.

Tabel 3.5 Eaton T0-2-8900 lüliti andmed [37]

Poolused	4
Positsioonid	ON-OFF
Tunnusvool, I_u	20 A
Alalisvoolu lahutusvõime, 48 V juures	10 A
Tunnus-talituspinge, U_e	690 V
Impulsspinge taluvus, U_{imp}	6000 V
Lühiajaline tunnus-taluvusvool, I_{cw}	320 A
Vastab standartidele	IEC/EN 60947, VDE 0660, IEC/EN 60204, CSA, Lahklüliti IEC/EN 60947-3 järgi

Esimene 3D-prinditud versioon vajas täiendamist, kuna polnud piisavalt täpne. Seetõttu sai vajalike mõõte korrigeeritud, kuni õnnestus saada piisavalt täpne ja toimiv tükk.



Joonis 4.8 Eatoni lahküliti koos originaal pöördmehhanismi tükkiga [38]

Katsestandiga tööd tehes peab olema selgelt näha, et katsestand on pinge all. Selleks kinnitatakse stendi külge indikaatorlamp. Lambil on 3 värvi, iga värv vastab teatud olekule:

- Roheline – „STOPP“, kogu stand on pingetu
- Kollane – Abitoide sees ja kilbi peakaitse väljas
- Punane – Peakaitse sees või alalistoiteallikas sees

Moodulkaitseülitid ja nende dimensioneerimine

Liinikaitseülitid kaitsevad ahelaid liig- ja lühisvoolu eest.

Liinikaitseülitite valimisel lähtutakse koormusvooludest ja juhtme kestvalt lubatud voolust. Standard EVS-HD 60364-4-43:2010 käsitleb kaitseülitite valikut. Kaitseülitite valimisel peab lähtuma [39]:

$$I_B \leq I_n \leq I_Z \quad (3.1)$$

$$I_2 \leq 1,45 \times I_Z \quad (3.2)$$

Kus, I_B – vooluahela projekteerimisel ette nähtud vool, A

I_n – kaitseaparaadi nimivool, A

I_Z – on juhi kestvalt lubatav vool, A

I_2 – on vool, mis tagab aparadi tõhusa rakendumise etteantud aja jooksul, A

Abitoiteahela suurim koormusvool on alalistoiteallika maksimaalne koormusvool 14,3 A, seega võiks moodulkaitseüliti nimivool olla 16 A. Inverteri suurim väljundvool igas faasis on 4,4 A, seega sobiv moodulkaitseüliti peaks olema nimivooluga vähemalt 6 A. FE-se mooduli koormusvoolu lahutamiseks piisab 4 A-sest kaitseülitist, mis lühisele ei reageeri, kuna FE moodul ei genereeri piisavalt suurt lühisvoolu.

FE moodul talitleb lühisetalitluses probleemideta ja midagi FE-se mooduliga lühise tulemusel ei juhtu. Küll aga tuleks mõne aja möödudes lühis välja lülitada. Selleks kasutatakse vooluandurit ja lülitit, mis reageerib kui lühisvool teatud aja kestnud.

5. MÕÕTEÜLESANNE JA TALITLUSE UURIMISEKS VAJALIKUD LISASEADMED

Mõõteülesanne on koostatud lähtudes päikeseelektrijaama talitlust peamiselt määravatest suurustest ja nende mõõtmise viisidest. Parameetrid olid kirjeldatud peatükis 2.

Lähtudes peatükis 3 esitatud tingimustest peab katsestendiga olema võimalik sooritada tööd ka päikesekiirgusevaestes tingimustes. Selleks on vajalik täiendava süsteemi sisseseadmine, milline imiteeriks paneeli toodangut teatud päikesekiirguse intensiivsuse olukorras.

5.1 Elektrilised mõõtmised

Elektrilisi mõõtmisi saab teha kolmel viisil:

1. Sisseehitatud võrguanalüsaator ABB M2M

Kõik suurused mõõdetakse võrguanalüsaatoriga – vajalikud on voolutrafod.

2. Väline võrguanalüsaator

Jäetakse võimalus ühendada voolutrafo väljund ja pinge mõõtmiseks 4 mm testjuhtmete ühenduspesad välise võrguanalüsaatori külge.

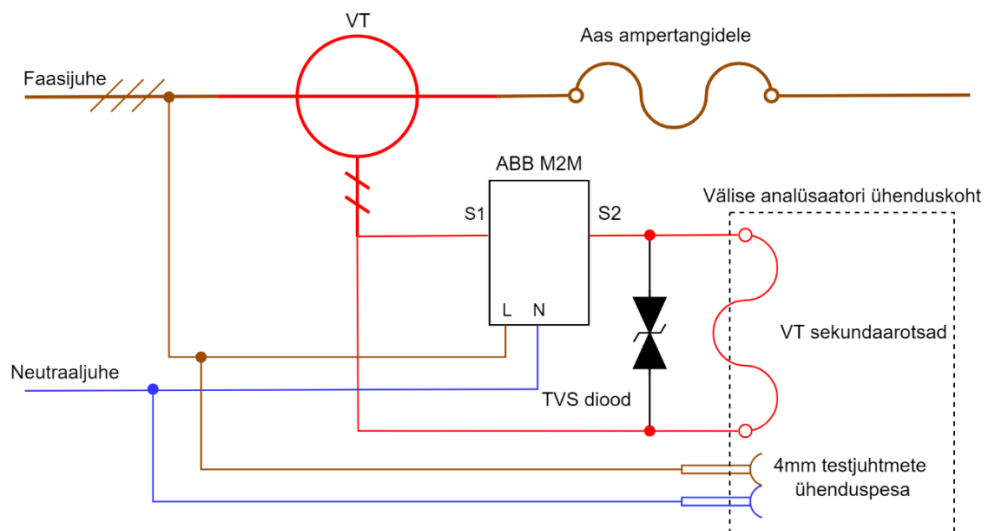
3. Voolude mõõtmine ampertangide ja pingete mõõtmine multimeetriga

Töös kasutatakse ABB M2M võrguanalüsaatorit(vt Joonis 5.1), kuna seade on TTÜ-s olemas ja on sobiliku mõõtetäpsusega $\pm 0,5\%$ pingete ja voolude jaoks. Täpsemad seadme andmed on lisades(vt Lisa 10).



Joonis 5.1 ABB M2M võrguanalüsaator eest ja tagant

Mõõteahelasse jäetakse võimalus ühendada ampertangid ja pinge mõõtmiseks 4 mm testjuhtmete ühenduspesad. Joonisel 5.2 on näidatud, kuidas kavandatakse mõõtmised. Mõõtmisülesande kilpi jäetakse võimalus, et saab ühendada välise analüsaatori mõõtmiste tegemiseks. Banaanipesad on pinge mõõtmiseks ja voolutrafo sekundaarahela saab ühendada välise seadme külge. Supressordiodi ehk TVS diodi kasutatakse, et voolutrafo sekundaarahela avamisel ei tekiks ohtliku pinget, mis voolutrafo rikub. Voolutrafo sekundaarahel peab talitlema lühisetalitluses, et sekundaarmähis ei läheks küllastusse.



Joonis 5.2 Mõõtmisosa skeem

Joonisel 5.3 on näha skeemis kasutatavat 4 mm testjuhtmete ühenduspesa pinge mõõtmiseks.



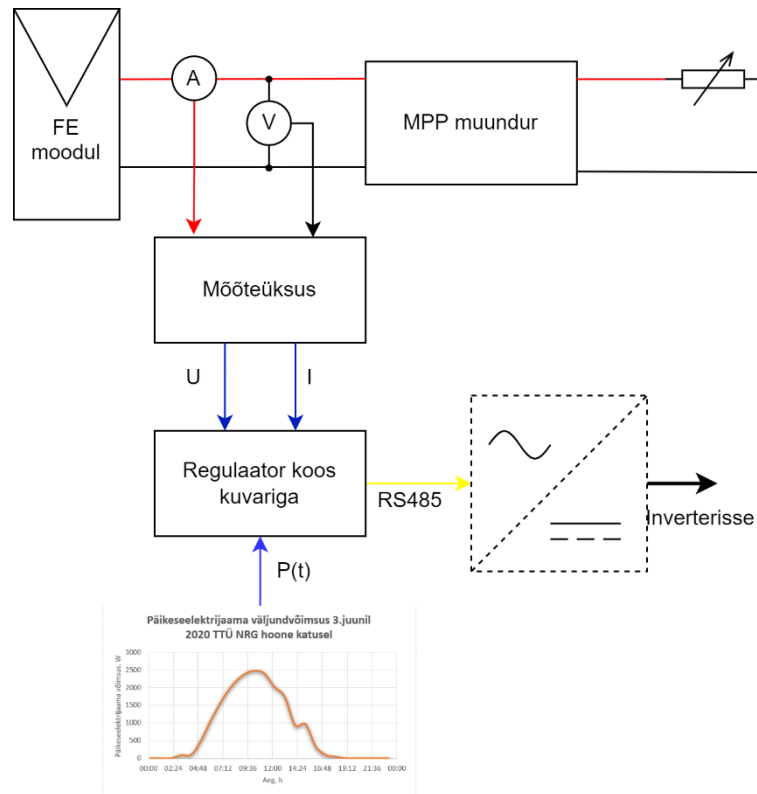
Joonis 5.3 4mm „banaan“-tüüpi testjuhtmete ühenduspesa

5.2 FE imitaatori välja töötamine

Et imiteerida reaalse FE-se süsteemi väljundit tuli välja töötada süsteem, mille abil saab juhtida alalistoiteallikat.

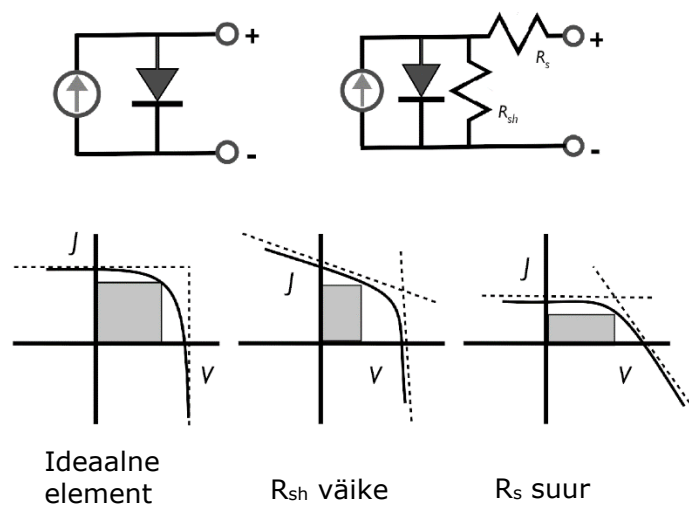
Valitud FE-sed moodulid ühendatakse MPP muunduriga ja FE-sed moodulid töötavad maksimaalse võimsuspunkti režiimis. MPP muunduri väljundklemmidele on ühendatud koormus. FE-se mooduli koormamisel mõõdetakse väljundvoolu ja -pinget ning mõõtetulemused on sisendiks regulaatorile. Regulaatoril on kaks režiimi – sisendina kasutatakse mõõtetulemusi või kindla päeva 3 kW-se jaama väljundvõimsuse graafikut, mis saadakse PVGIS päikesekiirguse andmebaasist.

Regulaator juhib vastavalt sisendsuurustele alalistoiteallika võimsust. Väljundvõimsuse reguleerimine toimub vastavalt FE-ste moodulite maksimaalse võimsuse ja tegeliku võimsuse suhtele. Graafikut kasutades on samuti teada päikeseelektrijaama maksimaalne võimsus ja ühe tunni võimsus, nende jagatis annab suhte, mis määrab alalistoiteallika võimsuse igas tunnis. Kuvarilt näeb kasutatud graafikut või mõõtetulemusi ning alalistoiteallika võimsuse seadesuurust (vt Joonis 5.4).



Joonis 5.4 FE imitaatori struktuur

Kui tellitud FE-sed moodulid jõudsid kohale, tekkis võimalus uurida FE-se mooduli ekvivalentse aseseemi parameetreid R_{sh} ja R_s . Takistuste väärtused on olulised, kuna need mõjutavad paneeli väljundkarakteristikut. Katsetamise eesmärk oli uurida seoseid takistuste ja valgusintensiivsuse osas, et takistuse väärtusi oleks võimalik kasutada alalistoiteallika juhtimisalgoritmi välja töötamiseks. Igal fotoelektrilisel moodulil on talle omane I-U kõver, mille kuju sõltub 1 diodi mudelis kasutatavate takistuse suurustest. Mida suurem rööptakistus ja väiksem jadatakistus, seda väiksemad on kaod (vt Joonis 5.5). Takistused sõltuvad fotoelemendi ehitusest.

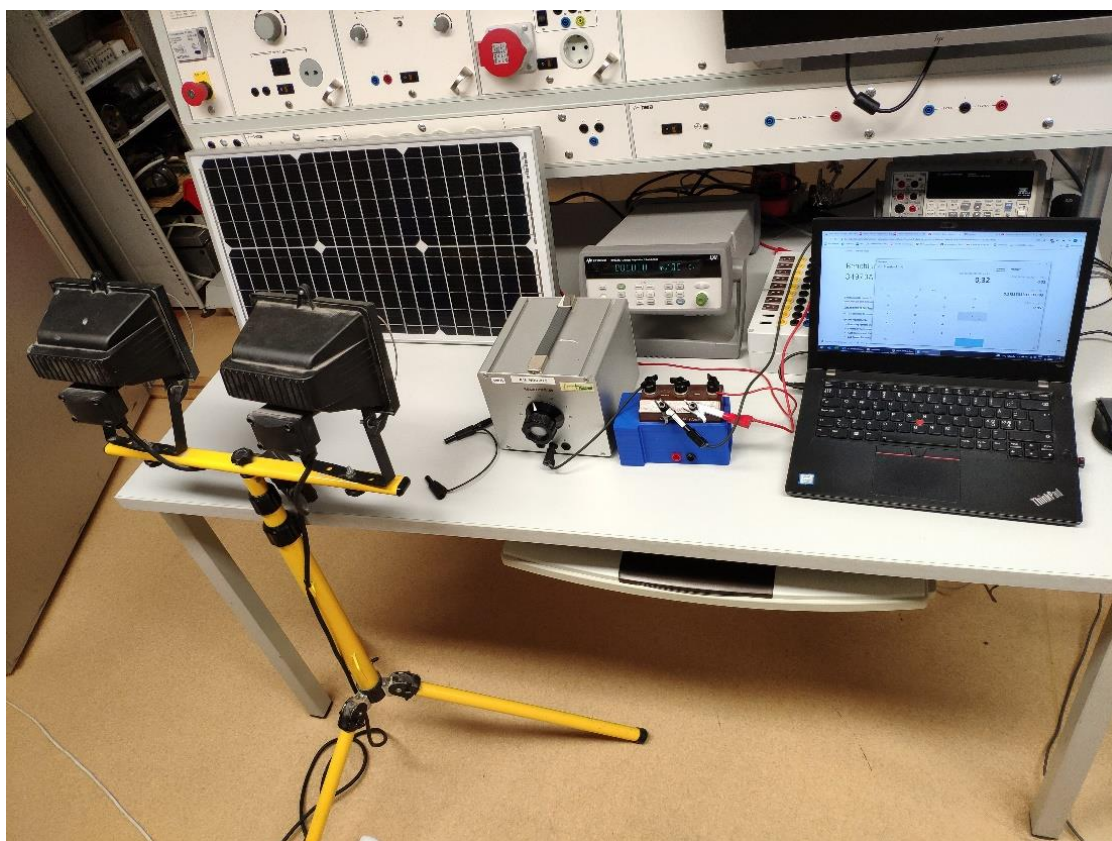


Joonis 5.5 Rööp- ja jadatakistuse mõju I-U kõverale [40]

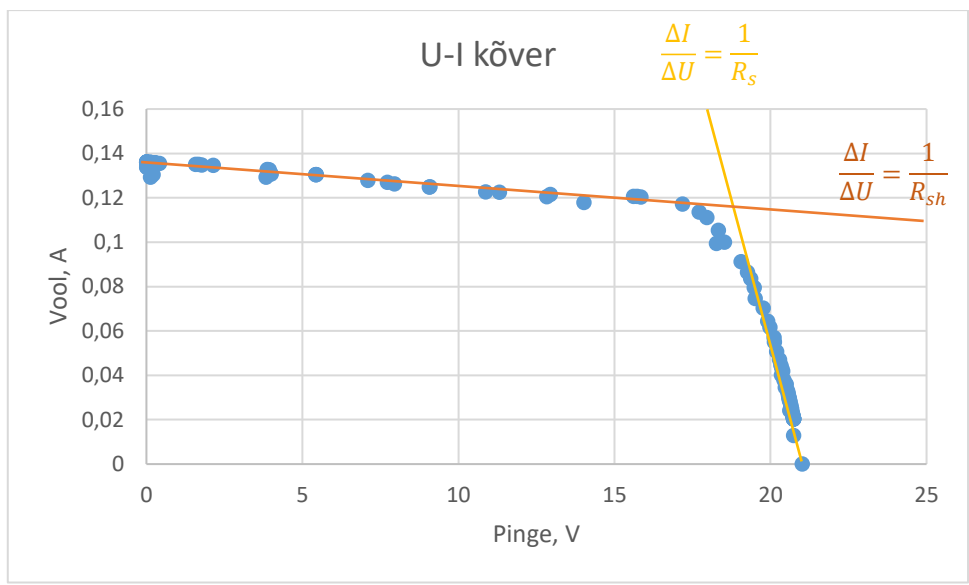
Takistuste väärtused saab leida paneeli I-U kõverat analüüsis. I-U kõvera konstantse voolu ja konstantse pinge osa tõusu teades saab leida takistuste väärtused. Vastava graafiku osa tõusu saab Excelis leida, luues mõlemast graafiku osast eraldi graafikud. [41]

Katsetamiseks kasutati kahte halogeenlampi ja lisaks hõõglampe. Lampide kaugus valiti selline, et võimalikult suur osa valgusest langeks paneelile.

Joonisel 5.6 on näha, kuidas toimus päikesepaneeli katsetamine. Päikesepaneeli koormamiseks kasutati 100 oomist potentsiomeetrit, mille takistust muudeti sujuvalt katse käigus. Mõõdeti paneeli väljundpinget ja -voolu. Voolu mõõtmiseks kasutati šunttakistit, millel mõõdeti pingelangu. Andmeid koguti Keysight 34972A LXI andmekogumisseadmega. Seade logis teatud intervalli tagant andmeid. Et saada andmed arvutisse oli tarvis alla laadida vastav tarkvara, milleks oli Agilent BenchLink Data Logger Pro. Tarkvara võimaldas andmed tuua üle Microsoft Excelisse, kus sai teha U-I graafikud ning määrata U-I kõvera tõusud, mille järgi arvutati R_{sh} ja R_s väärtused (vt Joonis 5.7). Katsetamisel esines erinevaid probleeme, mille lahendamise tegeles töö autor peamiselt ise.



Joonis 5.6 Paneeli katsetamine reostaadiga



Joonis 5.7 Katsetulemuste joonis

KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaaurusetöö raames projekteeriti ja kavandati päikesepargi katsestend. Päikesepargi katsestend on reaalse päikeseelektrijaama seadmetega ehitatud õppevahend. Katsestendi abil saab uurida fotoelektrilise süsteemi mõju jaotusvõrgule ja stend aitab inseneritudengitel õppida lähemalt tundma fotoelektrilise süsteemi komponente. Töö kajastab projekteerimisprotsessi ja komponentide valikut.

Esimeses peatükis luuakse päikeseelektrijaama näidis, mis avab katsestendi koostamise tausta.

Teises peatükis antakse ülevaade päikeseelektrijaamade liikidest ja nende komponentidest. Detailsemalt kirjeldatakse fotoelemente ning mooduleid.

Töö kolmandas peatükis kirjeldatakse katsestendi projekteerimist. Katsestendi projekteerimisel lähtuti elektroenergeetika ja mehhatroonika õppekava vajadustest ning tehti koostööd õppekava programmijuhiga. Projekteerimisel arvestati, et ülikoolil on piiratud vahendid ning osa komponente on koolis olemas. Katsestendi koostamisel ja projekteerimisel oli tarvis jälgida standardeid, mis puudutavad elektripaigaldisi, katseseadmeid ning fotoelektrilisi süsteeme. Lähteandmed projekteerimiseks saadi õppekava programmijuhilt.

Katsestendi seadmete valikul lähtuti piirangutest mõõtmetele ja võimsustele. Labori jaotusvõrgu mudeli alajaama trafo näivvõimsus on 5 kVA. Selle alusel valiti päikeseelektrijaama nimiväljundvõimsuseks 3 kW.

Töö neljandas ja viiendas peatükis selgitatakse ohutus- ja mõõteahelate projekteerimist. Projekteerimisel pöörati tähelepanu ohutusega seotud standarditele ning kavandati vastavad ohutusmeetmed tagamaks elektriohutuse stendiga töötamisel. Töö tulemusel loodi ohutuskeem ja valiti vajalikud kaitselülitid. Töö käigus oli vaja luua mudel Eatoni lahküliti modifitseeritud osast modelleerimistarkvaras Catia V5, et toota 3D-printeriga vajalik osa.

Tulevikus saab katsetada alalistoiteallika juhtimist ning luua juhtimiseks vajaliku regulaatori. Lisaks saab välja töötada laboratoorse töö täpse sisu.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

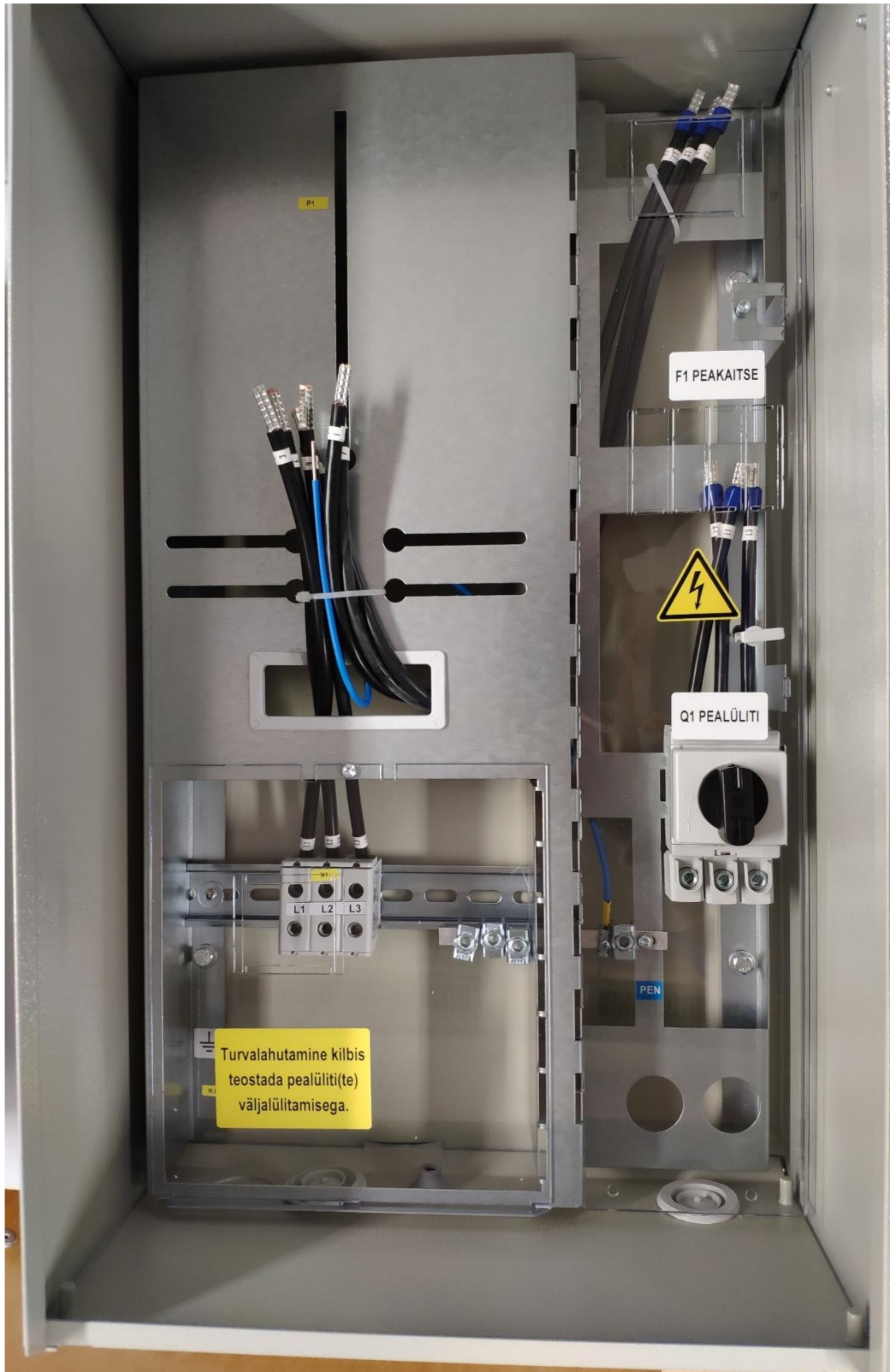
- [1] Pesatron OÜ, „Pesatron OÜ veebileht,“ Pesatron OÜ, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.pesatron.ee/hinnakiri/>. [Kasutatud 29. Aprill 2022].
- [2] Canadian Solar, „Canadian_Solar-Datasheet- HiKu_CS3L-MS_(1000V & 1500V)_EN,“ Mai 2020. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.canadiansolar.com/wp-content/uploads/2019/12/Canadian_Solar-Datasheet-HiKu_CS3L-MS_EN.pdf. [Kasutatud 15. Mai 2022].
- [3] Fronius International GmbH, „Fronius Symo Datasheet,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.fronius.com/~/downloads/Solar%20Energy/Datasheets/SE_DS_Fronius_Symo_EN.pdf. [Kasutatud 18. Aprill 2022].
- [4] G. Stapleton ja S. Neill, Grid-connected Solar Electric Systems, New York: Earthscan, 2012, pp. 29-30.
- [5] C. a. S.G.Bowden, „Photovoltaics Education Website,“ 2019. [Võrgumaterjal]. Available: www.pveducation.org. [Kasutatud 10. Märts 2022].
- [6] K. J. A. S. R. v. S. M. Z. Olindo Isabella, Solar energy - The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems, Cambridge: UIT Cambridge Ltd, 2016.
- [7] S. C. Krauter, Solar Electric Power Generation - Photovoltaic Energy Systems, Heidelberg: Springer Berlin, 2006.
- [8] Hemeltron OÜ, „Päikesepaneelid ja nende kasutamine,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://hemeltron.ee/kasutusjuhendid/category/2-taastuenergia?download=39:paeikesepaneelid-ja-nende-kasutamine->. [Kasutatud 12. Märts 2022].
- [9] E.Risthein, Sissejuhatus energiatehnikasse, Tallinn: Elekriajam, 2007.
- [10] K. Kütt, „Päikese nurk,“ [Võrgumaterjal]. Available: [https://opik.fysika.ee/omad/media/exp_kasutusjuhend/233_Paikese_nurk_AO T.pdf](https://opik.fysika.ee/omad/media/exp_kasutusjuhend/233_Paikese_nurk_AO_T.pdf). [Kasutatud 16. Mai 2022].
- [11] B. Veith-Wolf, „Crystalline silicon surface passivation using aluminum oxide: Fundamental understanding and application to solar cells,“ August 2018. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Measured-spectral-irradiance-vs-wavelength-l-of-the-used-UV-and-halogen-lamps-in_fig13_327467751. [Kasutatud 20. Aprill 2022].
- [12] A. M. R. Gross, Festkörperphysik, München: De Gruyter, 2014.
- [13] N. Gupta, „Want to buy a solar panel? – Key things to be considered,“ 9. Märts 2012. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.sustainabilityoutlook.in/content/want-buy-solar-panel-%E2%80%93-key-things-be-considered>. [Kasutatud 24. Aprill 2022].
- [14] N. Pearsall, The Performance of Photovoltaic(PV) Systems, Amsterdam: Elsevier/Woodhead Publishing, 2017.
- [15] S. Kalogirou, McEvoy's Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications, San Diego: Academic Press, 2017.
- [16] E. Standardikeskus, Overall efficiency of photovoltaic inverters, Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2010.
- [17] M. Löper, „PÄIKESEPANEELIDE TOOTLIKKUSE ANALÜÜS PRAKTILISTES TINGIMUSTES Magistritöö,“ TalTech, Tallinn, 2020.
- [18] Alternative Energy Tutorials, „Bypass Diode for Solar Panel Protection,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.alternative-energy-tutorials.com/photovoltaics/bypass-diode.html>. [Kasutatud 30. Märts 2022].

- [19] EVS-EN, „Madalpingelised elektripaigaldised. Osa 7-712: Nõuded eripaigaldistele ja -paikadele. Fotoelektrilised süsteemid,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-hd-60364-7-712-2016>. [Kasutatud 19. April 2022].
- [20] Elektrilevi OÜ, „TOOTMISSEADEMETE LISAMINE ELEKTRILEVI NIMEKIRJA (≤ 500 kW),“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.elektrilevi.ee/-/doc/8644141/liitumised/vaiketootjale/failid/inverterite_lisamine_elektrilevi_nimekirja_est.pdf. [Kasutatud 22. Aprill 2022].
- [21] EVS-EN, „EVS-EN 61010-1:2010 - Ohutusnõuded elektrilistele mõõtmis-, juhtimis- ja laboratooriumiseadmetele. Osa 1: Üldnõuded,“ Detsember 2010. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-61010-1-2010>. [Kasutatud 28. Aprill 2022].
- [22] EVS-EN, „EVS-EN 60297-3-100:2009,“ 2009. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-60297-3-100-2009>. [Kasutatud 24. Aprill 2022].
- [23] EVS-EN, „EVS-EN 61140:2016 - Kaitse elektrilöögi eest. Ühisnõuded paigaldistele ja seadmetele,“ Juuni 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-61140-2016>. [Kasutatud 21. Aprill 2022].
- [24] Fronius International GmbH, „FRONIUS SYMO,“ Fronius, [Võrgumaterjal]. Available: https://www.fronius.com/en/solar-energy/installers-partners/technical-data/all-products/inverters/fronius-symo/fronius-symo-3-0-3-m#bacc_dcfbcf38-3768-4885-ab17-9162437fdf91_372160b4-7b89-436b-80c5-d56ae52046d5_. [Kasutatud 18. Aprill 2022].
- [25] Fronius Australia Pty Ltd, „QUICK GUIDE – REACTIVE POWER SETTINGS IN DEPENDENCE OF THE GRID VOLTAGE,“ 2018. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.fronius.com/~/downloads/Solar%20Energy/Quick%20Guides/SE_QG_Setting_%20Reactive_Power_Control_On_Fronius_Inverters_EN_AU.pdf. [Kasutatud 18. Aprill 2022].
- [26] A. Puis, „MADALPINGE JAOTUSVÕRGU MÕÖTESÜSTEEMIDE VÕRD LUS,“ Eesti Maaülikool, Tartu, 2019.
- [27] XP Power, „HDL3000 HV Series,“ 8 December 2021. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.xppower.com/portals/0/pdfs/SF_HDL3000-HV.pdf. [Kasutatud 18. Aprill 2022].
- [28] EVS-EN, „EVS-EN 60309-1:2001 - Pistikud, pistikupesad ja pistikühendused tööstuslikuks kasutuseks. Osa 1: Üldnõuded,“ 2001. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-60309-1-2001>. [Kasutatud Mai 17. 2022].
- [29] AS Esvika Elekter, „Jõupesa süv. 5P 16A kiire IP44 315-6tt PCE,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://pood.esvika.ee/installatsioonimaterjalid/joupesa-suv-5p-16a-kiire-ip44-3156tt-pce>. [Kasutatud 21. Aprill 2022].
- [30] AS Esvika Elekter, „Jõupistik seinale 5P 16A IP44 515-6 PCE,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://pood.esvika.ee/installatsioonimaterjalid/joupistik-seinale-5p-16a-ip44-5156-pce>. [Kasutatud 21. Aprill 2022].
- [31] EVS-EN, „EVS EN 50618:2015 - Kaablid fotoelektrilistele süsteemidele,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-50618-2015>. [Kasutatud 25. Aprill 2022].
- [32] Stäubli International AG, „Photovoltaic main catalog,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://midsummerwholesale.co.uk/pdfs/mc4-datasheet.pdf>. [Kasutatud 22. Aprill 2022].
- [33] Draka Keila, „AXPK-PLUS - Alumiiniumjuhtmetega ja XLPE (PEX) isolatsiooni ja halogeenivaba kestaga 1 kV jõukaabel,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://pood.esvika.ee/ProductSpecifications/Download?id=311>. [Kasutatud 20. Aprill 2022].
- [34] Draka Keila, „XPK - Vaskjuhtmetega ja XLPE-isolatsiooniga 1 kV jõukaabel,“ [Võrgumaterjal]. Available:

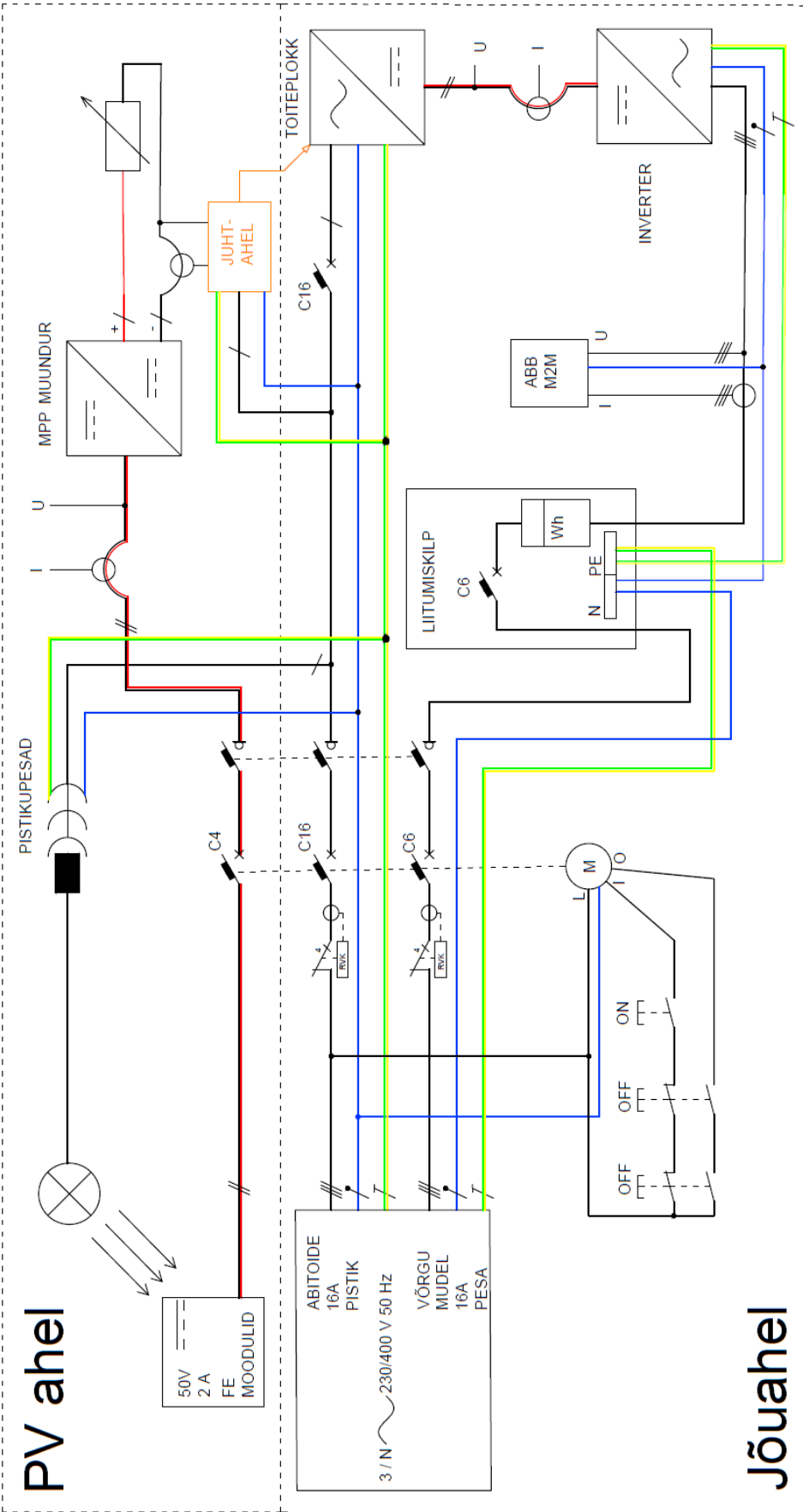
- <https://pood.esvika.ee/ProductSpecifications/Download?id=203>. [Kasutatud 20. Aprill 2022].
- [35] AS Esvika Elekter, „Solar-cable 1x4mm² 500m must 0,6/1kV H1Z2Z2-K,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://pood.esvika.ee/kaablid-ja-juhtmed/solarcable-1x4mm2-500m-must-061kv-h1z2z2k>. [Kasutatud 28. Aprill 2022].
- [36] R. Teemets, „Elektrivarustuse konspekt - 4.2 Juhistikusüsteemid,” 2010. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/AAV3340/EIVar_4.Madalpingevorgud.4.2_Juhistikususteemid.Konspekt2010kevad.pdf. [Kasutatud 29. Aprill 2022].
- [37] Eaton Industries GmbH, „T0-2-8900/EA/SVB - Main switch, T0, 20 A, flush mounting, 2 contact unit(s), 3 pole + N, Emergency switching off function, With red rotary handle and yellow locking ring, Lockable in the 0 (Off) position,” [Võrgumaterjal]. Available: https://datasheet.eaton.com/datasheet.php?model=207400&locale=en_GB. [Kasutatud 22. Aprill 2022].
- [38] TME Group, „T0-2-8900/V-SVB EATON ELECTRIC,” Eaton, [Võrgumaterjal]. Available: https://www.tme.eu/en/details/t0-2-8900_v-svb/cam-switches/eaton-electric/. [Kasutatud 06. Aprill 2022].
- [39] EVS-HD, „EVS-HD 60364-4-43:2010 - Madalpingelised elektripaigaldised. Osa 4-43: Kaitseviisid. Liigvoolukaitse,” Juuni 2010. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-hd-60364-4-43-2010>. [Kasutatud 10. Mai 2022].
- [40] E. H. S. G. Konstantatos, „Colloidal Quantum Dot Optoelectronics and Photovoltaics,” November 2013. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.cambridge.org/core/books/colloidal-quantum-dot-optoelectronics-and-photovoltaics/heterojunction-solar-cells-based-on-colloidal-quantum-dots/FEDEA78A828AD11880DED7E61DE443FD>. [Kasutatud 9. Mai 2022].
- [41] M. Diantoro, T. Suprayogi, A. Hidayat, A. Taufiq, A. Fuad ja R. Suryana, „Shockley’s Equation Fit Analyses for Solar Cell Parameters from I-V Curves,” *International Journal of Photoenergy*, kd. 2018, p. 7, 2018.
- [42] CELLEVIA POWER, „CELLEVIA POWER CL-SM30M,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tme.eu/ee/details/cl-sm30m/fotoelementmoodulid/cellevia-power/>. [Kasutatud 25. Aprill 2022].
- [43] General Electric, „Motor Operator Tele MP,” [Võrgumaterjal]. Available: https://resources.ipd.com.au/PDF/FORC6_MOTOROPERATOR.pdf. [Kasutatud 15. Mai 2022].

LISAD

Lisa 1 Harju Elektri liitumiskilp



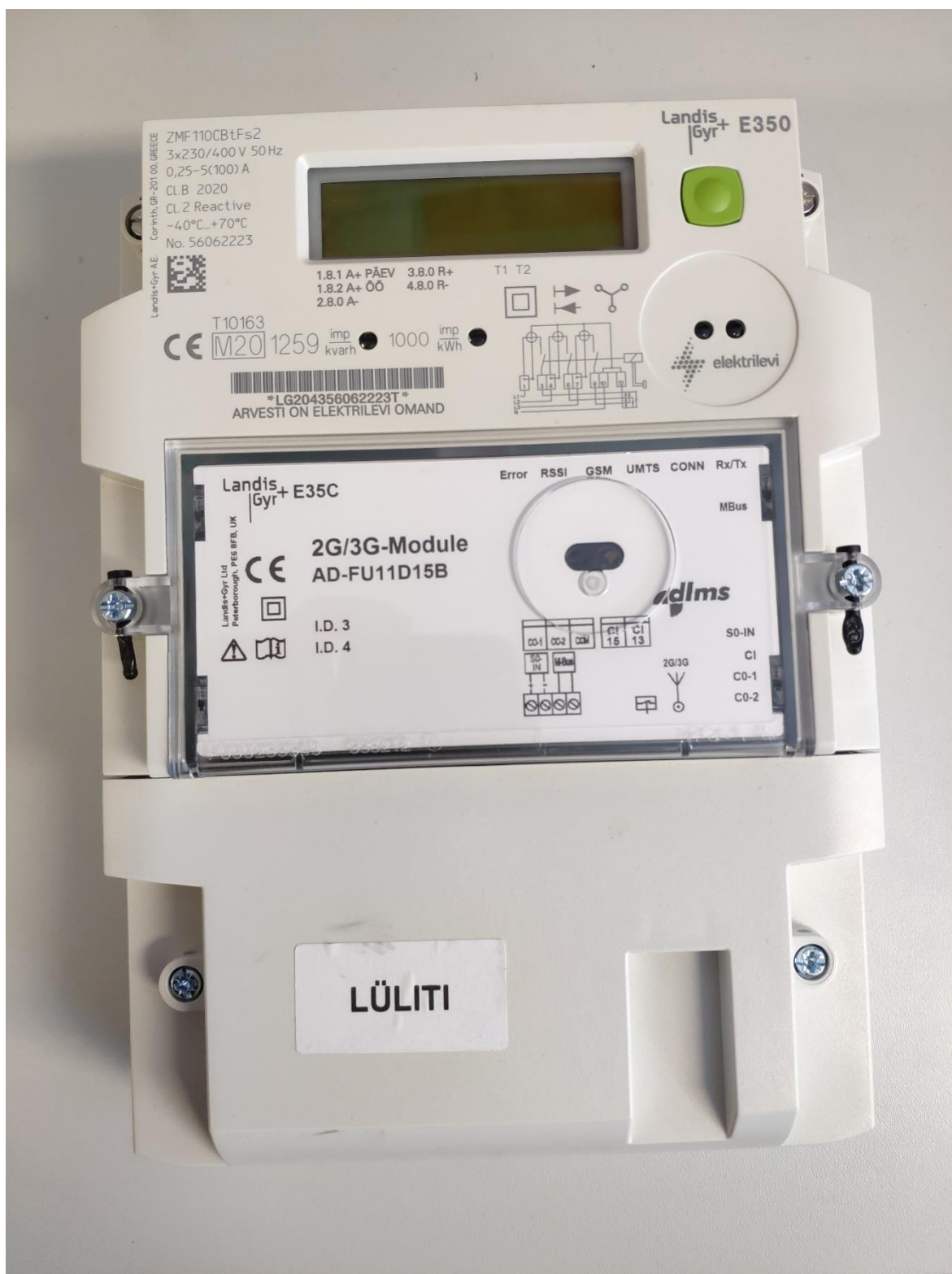
Lisa 2 Katseseadme skeem



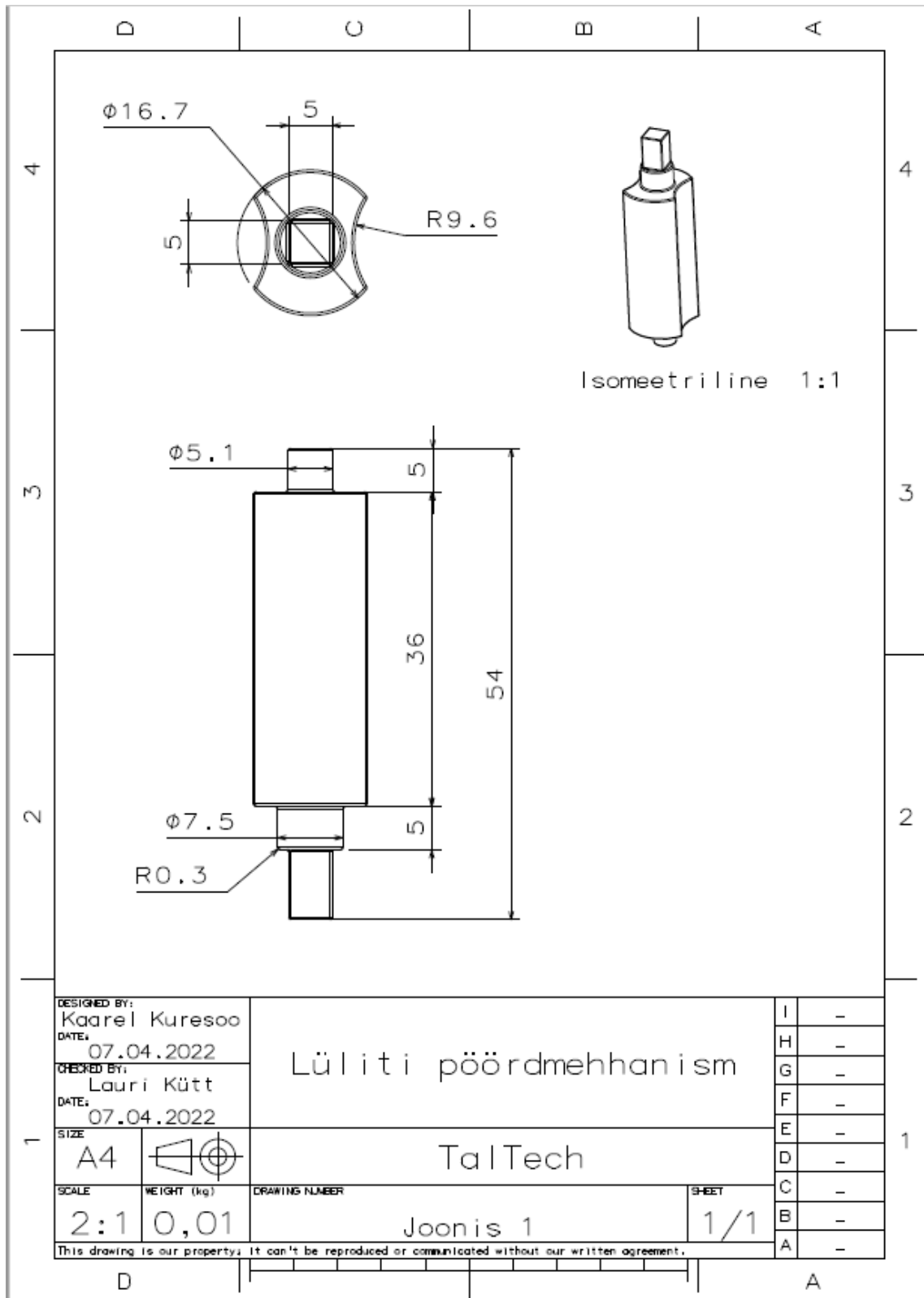
Lisa 3 Kasutatud päikesepaneeli andmeleht [42]

Electrical Characteristics	CL-SM30M
Maximum power (Pmax)	30W
Voltage at Pmax (Vmp)	18.6V
Current at Pmax (Imp)	1.62A
Open-circuit voltage (Voc)	22.9V
Short-circuit current (Isc)	1.77A
Temperature coefficient of Voc	$-(0.40 \pm 0.05)\%/^{\circ}\text{C}$
Temperature coefficient of Isc	$(0.065 \pm 0.01)\%/^{\circ}\text{C}$
Temperature coefficient of power	$-(0.5 \pm 0.05)\%/^{\circ}\text{C}$
NOCT (Air 20°C; Sun 0.8kW/m ² wind 1m/s)	47±2°C
Operating temperature	-40°C to 85°C
Maximum system voltage	600V DC
Power tolerance	+ 3%
Cells	monocrystalline silicon solar cell
No. of cells and connections	36(2*18)
Module Dimension	650mm[25.59in.]x350mm[13.78in.]x25mm[0.98in.]
Weight	3.1kg[6.82lbs]

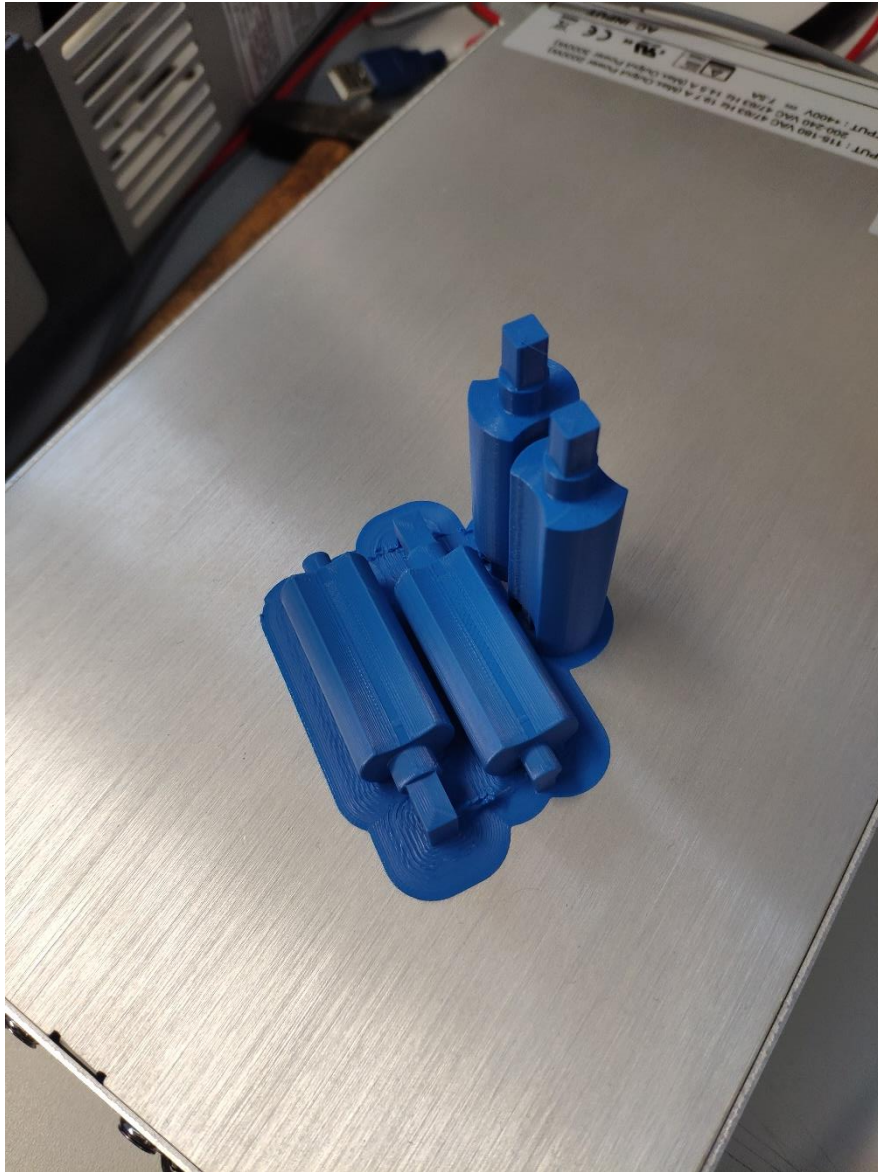
Lisa 4 Elektrilevi P2P arvesti



Lisa 5 Eatoni lahklüliti pöördmehhanismi joonis



Lisa 6 3D-prinditud pöördmehhanismi tükid

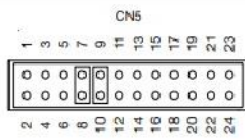


Lisa 7 Tabel fotoelektriliste kaablite voolutaluvuse hindamiseks [31]

Kaabli ristlõige, mm ²	Voolutaluvus erinevate paigaldusviiside puhul		
	Üksik kaabel õhus, A	Üksik kaabel pinnal, A	Kaks kaablit üksteis peale, pinnal, A
1,5	30	29	24
2,5	41	39	33
4	55	52	44
6	70	67	57
10	98	93	79
16	132	125	107
25	176	167	142
35	218	207	176
50	276	262	221
70	347	330	278
95	416	395	333
120	488	464	390
150	566	538	453
185	644	612	515
240	775	736	620
Välitemperatuur 60 kraadi, maksimaalne juhi temperatuur 120 kraadi			

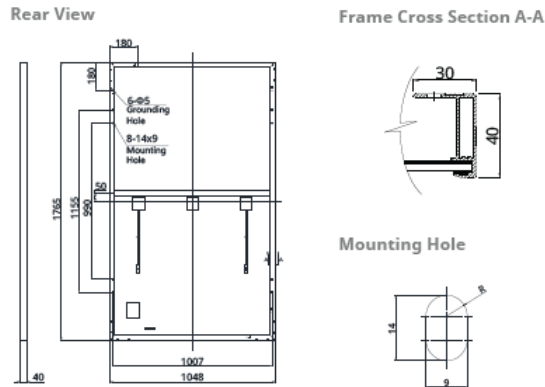
Lisa 8 Alalistoiteallika juhtimisporidi pistiku pinout [27]

CN5 Control Pin Connections								
Pin	Function	Description	Pin	Function	Description	Pin	Function	Description
1	AUX	+5V / 0.5A or +9V / 0.3A Auxiliary power	9	EN+	Inhibit ON/OFF (+)	17	N.C.	
2	GND	Ground	10	AUX	+5V / 0.5A or +9V / 0.3A Auxiliary power	18	N.C.	
3	POK	Power OK	11	ACI	I Program	19	+5VC	Use with GND1, isolated supply for I ² C and RS485 interfaces
4	GND	Ground	12	GND	Ground	20	GND1	Use with +5VC, isolated supply for I ² C and RS485 interfaces
5	PAR	Parallel operation current share	13	VCI	V Program	21	SCL	Serial Clock for I ² C interface
6	VSET	Aux output setting	14	GND	Ground	22	SDA	Serial Data for I ² C interface
7	EN-	Inhibit ON/OFF (-)	15	AUX	+5V / 0.5A or +9V	23	DA-	For RS485 Data- Interface
8	GND	Ground	16	GND	/ 0.3A Auxiliary power	24	DA+	For RS485 Data+ Interface

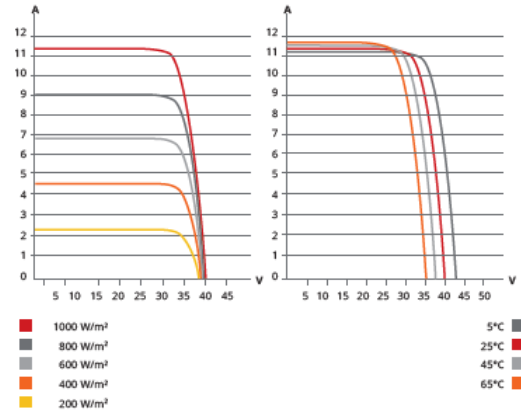


Lisa 9 Canadian Solar CS3L-375MS andmeleht [2]

ENGINEERING DRAWING (mm)



CS3L-360MS / I-V CURVES



ELECTRICAL DATA | STC*

CS3L	350MS	355MS	360MS	365MS	370MS	375MS
Nominal Max. Power (Pmax)	350 W	355 W	360 W	365 W	370 W	375 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	33.3 V	33.5 V	33.7 V	33.9 V	34.1 V	34.3 V
Opt. Operating Current (Imp)	10.52 A	10.61 A	10.69 A	10.78 A	10.86 A	10.94 A
Open Circuit Voltage (Voc)	40.0 V	40.2 V	40.4 V	40.6 V	40.8 V	41.0 V
Short Circuit Current (Isc)	11.28 A	11.33 A	11.40 A	11.47 A	11.54 A	11.61 A
Module Efficiency	18.9%	19.2%	19.5%	19.7%	20.0%	20.3%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C					
Max. System Voltage	1500V (IEC/UL) or 1000V (IEC/UL)					
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or CLASS C (IEC 61730)					
Max. Series Fuse Rating	20 A					
Application Classification	Class A					
Power Tolerance	0 ~ + 10 W					

* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

ELECTRICAL DATA | NMOT*

CS3L	350MS	355MS	360MS	365MS	370MS	375MS
Nominal Max. Power (Pmax)	261 W	265 W	269 W	272 W	276 W	280 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	31.0 V	31.2 V	31.4 V	31.6 V	31.8 V	32.0 V
Opt. Operating Current (Imp)	8.41 A	8.48 A	8.55 A	8.62 A	8.68 A	8.75 A
Open Circuit Voltage (Voc)	37.6 V	37.8 V	38.0 V	38.2 V	38.4 V	38.6 V
Short Circuit Current (Isc)	9.10 A	9.14 A	9.20 A	9.25 A	9.31 A	9.37 A

* Under Nominal Module Operating Temperature (NMOT), irradiance of 800 W/m² spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.

MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Mono-crystalline
Cell Arrangement	120 [2 X (10 X 6)]
Dimensions	1765 X 1048 X 40 mm (69.5 X 41.3 X 1.57 in)
Weight	21.1 kg (46.5 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass
Frame	Anodized aluminium alloy
J-Box	IP68, 3 bypass diodes
Cable	4.0 mm² (IEC), 12 AWG (UL)
Cable Length (Including Connector)	Portrait: 500 mm (19.7 in) (+) / 350 mm (13.8 in) (-); landscape: 1250 mm (49.2 in)*
Connector	T4 series or H4 UTX or MC4-EVO2
Per Pallet	27 pieces
Per Container (40' HQ)	702 pieces

* For detailed information, please contact your local Canadian Solar sales and technical representatives.

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.35 % / °C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.27 % / °C
Temperature Coefficient (Isc)	0.05 % / °C
Nominal Module Operating Temperature	42 ± 3°C



EN

Auxiliary power supply		
Voltage range	[V]	from 24 to 240 a.c./d.c. from 48 to 240 a.c./d.c. M2M ETHERNET, M2M PROFIBUS, M2M I/O
Frequency range	[Hz]	45 ÷ 65
Protection fuse		T 0,5 A from 24 V to 100 V T 0.25 A from 100 V to 240 V

Power consumption	[VA]	7 max
--------------------------	------	-------

Measurement type	Sampling TRMS
-------------------------	---------------

Accuracy class		
Voltage		±0,5% F.S. ±1 digit
Current		±0,5% F.S. ±1 digit
Frequency	[Hz]	40.0 ÷ 99.9: ±0,2% ±0,1 100 ÷ 500: ±0,2% ±1
Power factor		±1% ±1 digit (from $\cos\phi = 0,3$ Inductive to $\cos\phi = 0,3$ Capacitive)
Active power		±1% ±0,1% F.S. (from $\cos\phi = 0,3$ Inductive to $\cos\phi = 0,3$ Capacitive)
Active energy		Class 1

Measurement range		
Voltage	[V]	from 10 to 500 approx. TRMS VL-N Visualisation with 0 decimals
Current		from 50 mA to 5 A TRMS Visualisation in A with 2 decimals
Frequency	[Hz]	from 40 to 500 Visualisation: with 1 decimal up to 99.9 with 0 decimals above 100
Power factor		Display with 2 decimals

Installation	
Distribution networks	Low and medium voltage Singlephase insertion 3-phase with neutral 3-phase without neutral
Ammetric inputs	[A] Always use external CT Primary from 1 to 10.000 A a.c. approx. Secondary 5 A and 1 A a.c. approx. N.B.: in case of CT secondary at 1 A the accuracy class is declassified to 2,5% F.S. ± 1 digit, in range 5%-100% F.S.
	[V] Direct insertion up to 500 a.c. approx. Indirect insertion with VT: Primary from 60 to 60,000 V a.c. approx. secondary from 60 to 190 V a.c. N.B.: In case of VT secondary lower than 100V the accuracy class is declassified to 2,5% F.S. ± 1 digit, in range 5%-100% F.S.
Protection fuse	[A] 0,1

Data referesh rate	2 times/second
---------------------------	----------------

Harmonic distortion	Measurement bandwidth up to 500 Hz
----------------------------	------------------------------------

Energy measurement	
Single phase maximum value counted	10 GWh / Varh / VAh
3-phase maximum value counted	30 GWh / Varh / VAh
Energy balance maximum value counted	10 GWh / GVarh / GVAh with sign
Input pulses maximum energy value counted	40 GWh / Varh

Terminal characteristics	
Ammetric inputs	Section 6 mm ² - Step 6,35 mm
Volumetric inputs	Section 2.5 mm ² - Step 7.62 mm
Pulse outputs	Section 2.5 mm ² - Step 5.08 mm
RS485 Serial port	Section 2.5 mm ² - Step 5.08 mm
Relay outputs	Section 2.5 mm ² - Step 5.08 mm



EN

Overall dimensions	
96 mm x 96 mm x 77 mm (Depth inside switchboard: 57 mm)	

Weight	[Kg] 0.400 max
---------------	----------------

Standard normatives	
Overall dimensions	IEC 61554
Degree of protection	IEC 60529
Accuracy class	IEC 60688, IEC 61326-1, IEC 62053-21, IEC 62053-23, IEC 62053-31.
Electrical safety	IEC 61010-1

User interface	
Display	Scrolling text in several languages user selectable.
Display type	LCD with back light intensity user selectable
Display dimensions	[mm] 72x57

Communication interface	
RS485	
Protocol	Modbus RTU
Electric standard	RS485 with optical isolation
Baud rate	4.8, 9.6, 19.2 kbps
Parity number	Odd, Even, None
Stop bit	1, 2
Address	1-247
Connectors	4 pole terminal (integrated 120 Ohm terminator on T terminal)
Profibus	
Protocol	Profibus with slave DP-V0 function in compliance with IEC 61158 standard
Electric standard	RS485 with optical isolation
Baud rate	Automatic detection [9.6 - 12 Mbps]
LED indicators	Green for communication status and Red for communication error
Address	1-126
Connectors	DB 9 female connector (do not use connectors with 90° cable outlet)



Motor Operator

Tele MP

- Common device for all modular protection devices.
- Can be coupled on both sides of MCB's and modular switches, on the right hand side of RCCB's and RCBO's.
- Stack-on left and right sides up to 4 modules. One of them can be coupled between the main device and the motor operator.
- Can be locked in off position with a lock.
- Manual operating is possible.

The Tele MP allows to remotely open or close any MCB, RCCB, RCBO or modular switch by means of a push-button or any other automatic management processor (PLC.).

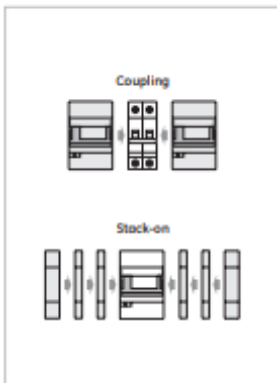
In case of mounting a Tele MP and a Undervoltage Tele U together: when the Tele U trips, a manual reset of the Tele U is locally needed due to safety reasons.

Applications



Standard

EN/IEC 60947-2



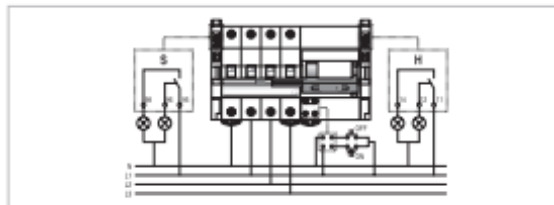
Performance

Rated voltage AC Un	(V)	240
Minimum voltage	(V)	200
Impulse to switch on	(ms)	50
Impulse to switch off	(ms)	50
Closing time	(s)	0.5
Opening time	(s)	0.2
Electrical endurance		10000
Terminal capacity flexible/rigid cable	(mm ²)	2.5
Weight	(g)	380

Tele MP - Motor operator

	Voltage	Cat. No.	Ref. No.	Pack.
3 mod.	AC 230V	TELE MP	672580	1

Application example



More technical data ● website
Dimensions ● pg C.12



C.7

Series CA

A

B

C

D

E

F

G

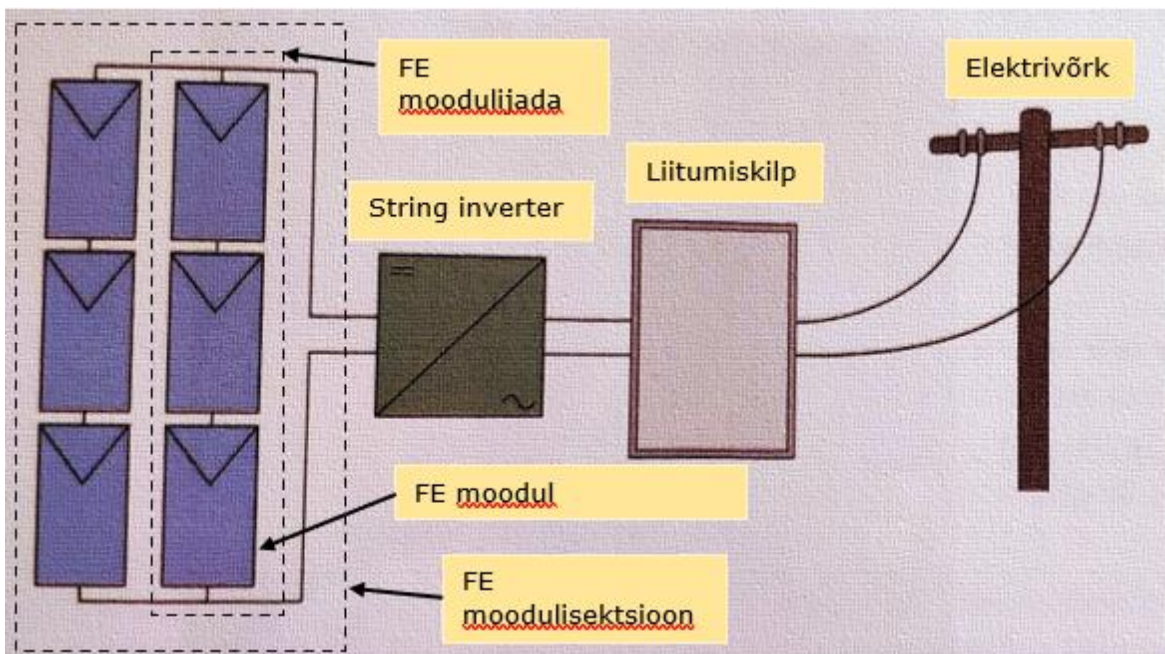
X

String inverterid ja tsentraalsed inverterid

String inverteri külge ühendatakse jada FE mooduleid. Invertereid toodetakse nii ühe kui ka mitme *MPPT* jadaahelaga. Viimaseid kutsutakse inglise keeles *multi-string inverter*-iks, sest nende külge on ühendatud mitu moodulijada, mis on eraldatud ning omavad inverteris eraldi MPPT sisendit. Ühe string inverteri külge saab ühendada ka mitu FE moodulijada paralleelselt nagu joonisel 0.1 on näidatud. Joonisel 0.1 on toodud ühe FE süsteemi näide string inverteriga. [4]

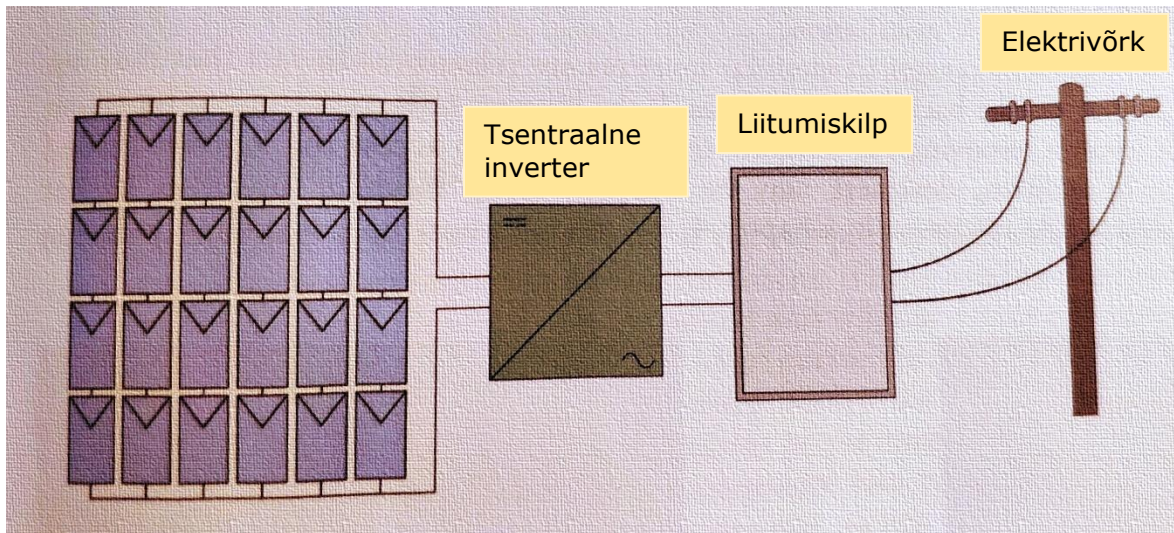
Siis kui üks FE moodulijada on varjatud, mõjutab see kogu isektsiooni väljundit ja samuti peaks olema FE moodulijadade pinged võimalikult lähedased. Teine variant on ühendada iga FE moodulijada eraldi string inverteri külge, sel juhul tõuseb süsteemi töökindlus – ühe inverteri rike puhul teine töötab edasi, kuid samas on süsteem kallim.

String inverterid on üsna levinud just kodumajapidamistele mõeldud päikeseelektrijaamade puhul, eriti hästi sobivad asukohtadesse, kus pole varjusid. [4]



Joonis 0.1 String inverter koos kahe paralleelse paneelijadaga [4]

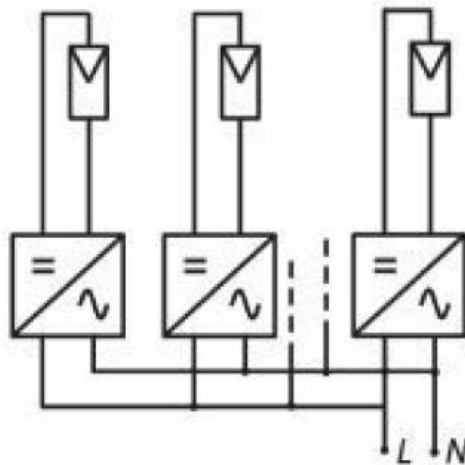
Tsentraalsete inverterite külge saab samamoodi ühendada mitu moodulijada, neid kasutatakse suurte päikeseparkide juures ja nende puhul on samuti oluline, et oleks võimalikult vähe varjusid. Tsentraalsed inverterid on füüsiliselt suuremad ja suurema võimsusega kui string inverterid.



Joonis 0.2 Tsentraalne inverter kuhu on ühendatud mitu paneelijada [4]

Mikroinverterid

Mikroinverterid on väikesed inverterid, mis on kinnitatud reeglina paneeli tagaküljele, mis muundavad alalisvoolu kohe paneeli juures 1-faasiliseks vahelduvvooluks. Seejärel ühendatakse mikroinverterite väljundklemmid faas(L) ja neutraal(N) paralleelselt (vt Joonis 0.3).



Joonis 0.3 Mikroinverteritega süsteem [6]

Mikroinverterite puhul on alalis sisendpinge madal, seega peab DC-DC muundur pinget palju tõstma, mis tähendab, et muundamise kasutegur on madal. Muundamine on tavaliselt kahe astmeline, esimeses astmes tõstetakse alalispinge nõutud väärtuseni ja teises astmes vaheldatakse. [6]

Seega pole süsteemis tarvis alalisvoolu juhtmeid ja süsteemi saab edukalt lisada uusi paneele, kui selleks vajadus tekib. Müüakse ka eraldiseisvaid mikroinvertereid, mis pole paneeli küljes.

Tabelis 0.1 on toodud välja erinevate inverteri tüüpide omaduse, eelised ja puudused.

Tabel 0.1 Inverterite võrdlus [4]

Inverteri tüüp	String	Multi-string	Tsentraalne	Mikro
Võimsusvahemik	0,7-11 kW	3-100 kW	100-2500 kW	100-400 W
MPPT	Jah	Mitu	Mitu	Jah
Efektiivsus	93-97%	97%	97%	95%
Eelised	Hästi kättesaadav,	Mitu MPPT ahelat	Madalam €/W kulu, üks asukoht hoolduseks	alaliskaablid puuduvad, lihtne lisada paneele
Puudused	Üks MPPT ahel	Kallimad kui ühe MPPT-ga inverterid	Inverteri vea puhul kogu süsteem maas, kõik moodulijadad töötavad ühe maksim. võimsuspunkti juures, halb süsteemi skaleeritavus	Katkist seadet keeruline parandada, suurim erikulu, asukohast tingituna kõrgem temperatuur – seega madalam kasutegur

Hübriidinverterid

Hübriidinverteritel on lisaks võrguühendusele akusalvestuse lisamise võimalus. Hübriidinverter on laadimiskontroller ja inverter. Kui päikesepaneelid toodavad rohkem elektrienergiat kui süsteemis ära tarbitakse, salvestatakse see energia akudesse.

Hübriidinverterid võivad töötada nii võrguühendusega kui ka võrguühenduseta. Inverterid võimaldavad lülitada elektrisüsteemi ümber akude toitele, kui peaks võrguühendus katkema.