EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja inseneeriainstituut

Tanel Mõttus

KONTROLLMÕÕTMISED PÄIKESEELEKTRIJAAMAS

CONTROL MEASUREMENTS IN A SOLAR POWER PLANT

Bakalaureusetöö
Tehnika ja tehnoloogia õppekava

Juhendajad: Andres Annuk, PhD
Robert Mägi, MSc

Tartu 2025

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Autor: Tanel Mõttus		Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia [384]	
Pealkiri: Kontrollmõõtmised päikeseelektrijaamas			
Lehekülgi: 53	Jooniseid: 26	Tabeleid: 4	Lisasid: 3
ETIS-e valdkond ja CERCS-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika 4.17. Energeetikaalased uuringud T140 Energeetika Juhendaja(d): Andres Annuk, PhD, Robert Mägi, MSc Osakond või õppetool: Energiakasutuse õppetool Kaitsmiskoht ja -aasta: Eesti Maaülikool, 2025			
Maailma energiavajadus suureneb koos inimkonna suurenemisega aasta aastalt. Puhaste ja jätkusuutlike energiakandjate rakendamine on käesoleva ajastu üks suurimaid väljakutseid. Ühe võimalusena on kasutada energiatootjatena päikeseelektrijaamu. Päikeseelektrijaama kui elektripaigaldist peab olema ohutu käidelda, mis eeldab vastamist kokkulepitud normidele. Elektriliste suuruste mõõtmine on viis kontrollimaks vastavust nõuetele ja seeläbi tagamaks inimeste ja seadmete ohutus. Varasemalt on alalisvoolu osa mõõtmised jäänud tagaplaanile kuid tehnoloogia laialdasema kasutuselevõtuga muutuvad need üha aktuaalsemaks. Eesmärk oli tutvustada alalisvooluosa kontrollimiseks mõeldud mõõtevahendeid, viia läbi kontrollmõõtmised, tutvustada tulemusi ning nende põhjal analüüsida paigaldise toimimist. Mõõtmistel selgus, et paigaldis vastab projektile, on õigesti ehitatud ja mõõdetud osas funktsioneerib eelduslikus režiimis. Ühtegi probleemi ei tuvastatud. Käesolevat tööd võib kasutada tutvustamaks päikeseelektrijaama olemust ja tema ekspluateerimisega seotud nüansse.			
Võtmesõnad: jätkusuutlikkus, päikeseenergia, elektripaigaldis, alalisvool, võimsuskõver			

Estonian University of Life Sciences

Kreutzwaldi 1, Tartu 51006

Abstract of Bachelor's Thesis

Author: Tanel Mõttus

Speciality: Engineering

Title: Control measurements in a Solar Power Plant

Pages: 53	Figures: 26	Tables: 4	Appendices: 3

ETIS research field and (CERCS) code: 4. Natural Sciences and Engineering
4.17. Energetic Research
T140 Energy research
Supervisor(s): Andres Annuk, PhD, Robert Mägi, MSc
Chair: Chair of Energy Application Engineering
Place and year of defence: Estonian University of Life Sciences, 2025

The world's energy demand increases year by year alongside the growth of humankind. The implementation of clean and sustainable energy carriers is one of the greatest challenges of our present time. One possible solution is the use of solar power plants as energy producers.

The solar power plant as an electrical installation must be safe to operate, which requires compliance with established standards. Measuring electrical quantities is a way to verify this compliance and thereby ensure the safety of both people and equipment. In the near past, direct current side measurements have often been overlooked, but with the broader adoption of technology, they are becoming increasingly relevant.

The aim was to introduce measuring instruments intended for inspecting the DC side, to carry out verification measurements, present the results, and analyze the functioning of the installation based on those results. The measurements revealed that the installation complies with the design, is correctly built, and functions in the expected mode in the measured section. No issues were identified. This work can be used to introduce the concept of a solar power plant and the nuances related to its operation.

Keywords: sustainability, solar energy, electrical installation, direct current, power curve

SISUKORD

SISSEJUHATUS 6
1. KLIIMA- JA TAASTUVENERGIA EESMÄRGID 7
1.1. Kliimaeesmärgid 7
1.2. Taastuvenergia eesmärgid 8
2. PÄIKESEENERGIA JA PÄIKESEELEKTRIJAAMAD 10
2.1. Päikesekiirgus kui energiaallikas 10
2.2. Päikeseenergia rakendamine 11
2.3. Päikeseelektrijaamad Eestis ja mujal maailmas 13
2.3.1. Kollektorpäikeseelektrijaamad 13
2.3.2. Fotoelektrilised päikeseelektrijaamad 14
2.3.3. Taastuvenergia salvestamine 16
2.4. Fotoelektriliste päikeseelektrijaamade tüübid 16
2.4.1. Võrguga ühendatud ehk *on-grid* PEJ 16
2.4.2. Võrguga ühendamata ehk *off-grid* PEJ 17
2.4.3. Võrguga ühendatud hübriid PEJ 18
3. ELEKTRIENERGIA MUUNDAMINE 20
3.1. Jadainverter 20
3.2. Mikroinverter 21
4. KONTROLLMÕÕTMISED 23
4.1. Nõuded päikeseelektrijaamadele 23
4.1.1. Esimese kategooria testmõõtmised 24
4.1.2. Teise kategooria testmõõtmised 25
4.1.3. Täiendavad testmõõtmised 25
4.2. Mõõtmisteks vajalik dokumentatsioon ja mõõtevahendid 26
4.2.1. PEJ elektriline ülesehitus 26
4.2.2. Mõõtevahendid 27
4.3. Mõõtmiste läbiviimine 28
4.4. Mõõtmiste käik 28
4.4.1. Isolatsioonitakistuse mõõtmine 32
4.4.2. Keskkonnatingimuste mõõtmine 33
4.4.3. Mooduljada tühijooksupinge ja lühisvoolu mõõtmine 35
4.4.4. Voolu-pinge kõvera mõõtmine 36
4.4.5. Infrapuna vaatlus 37
5. MÕÕTETULEMUSED JA NENDE ANALÜÜS 38
5.1. Isolatsioonitakistus 38
5.2. Keskkonnatingimuste mõõtmine 38
5.3. Mooduljada tühijooksupinge ja lühisvoolu mõõtmine 39
5.4. Voolu-pinge kõvera mõõtmine 39
5.5. Infrapuna vaatlus 42
KOKKUVÕTE 45
ALLIKALOEND 47
LISAD 50
Lisa 1. Väimela 360 kW päikeseelektrijaama elektriskeem [44] 51
Lisa 2. Mõõtetulemuste protokoll [32] 52

Lisa 3. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta 53

SISSEJUHATUS

Eestis on seoses riigi poolt võetud eesmärkidega hoogustunud taastuvate energiaallikate kasutuselevõtt. Üheks taastuvaks energiaallikaks loetakse ka päikeseenergiat. Päikeseenergia kasutamiseks on ühe võimalusena ehitada päikeseelektrijaam (PEJ), mis muundab päikeselt lähtuva kiirgusenergia hõlpsasti kasutatavaks elektrienergiaks. Kuna PEJ puhul on tegemist elektripaigaldiseg, rakenduvad sellele erinevad seaduste ja määrustega seatud nõuded. Nõuetele vastavuse kontrollimiseks saab teostada elektripaigaldises kontrollmõõtmisi.

Bakalaureusetöö keskendub PEJ-s tehtavatele võimalikele alalisvoolu osa mõõtmistele ning nende vajalikkusele. Need mõõtmised on varasemalt Tarbijakaitse ja Tehnilise Järelevalve Ameti (TTJA) poolt suurema tähelepanuta jäänud, õnneks on see viga viimastel aastatel parandatud.

Töö esimeses osas kirjeldatakse põgusalt kliimaeesmärke, mis on tinginud laialdase päikeseenergia kasutuselevõtu ning Eesti rollist Euroopa Liidu ühiste eesmärkide saavutamisel. Teine osa keskendub päikesekiirgusele kui energiaallika ja PEJ-de hetkeolukorrale Eestis ja mujal maailmas. Millistest osadest võib päikeseelektrijaam koosneda ning kuidas on vastavalt vajadusele võimalik PEJ alalisvoolu osa ühendada.

Töö kolmas osa seletab lahti erinevad inverterite tüübid mis aitavad PEJ-st lähtuva elektrienergia muundada selliseks, et see sobituks Eestis kasutatava pingesüsteemiga.

Neljas osa kirjeldab juba konkreetselt missugused elektripaigaldise soovituslikud nõuded (standardid) kohalduvad PEJ-le, mis DC mõõtmisi ja missuguste vahenditega saab paigaldises sooritada. Selles osas tuuakse välja ka konkreetne näide PEJ-s teostatud mõõtmistest. Mõõtetulemused ja nende analüüs tuuakse ära töö viiendas osas.

1. KLIIMA- JA TAASTUVENERGIA EESMÄRGID

1.1. Kliimaeesmärgid

Seoses ülemaailmse inimtekkelise kliimamuutusega on maailma riigid võtnud eesmärgiks kasvuhoonegaaside atmosfääri paiskamise vähendamise. 2015. aastal Pariisis toimunud ÜRO riikide kliimamuutuste raamkonventsiooni osaliste konverentsi 21. istungjärgul COP21 (*twenty-first session of the Conference of Parties*) kus osales ligi kakssada riiki lepiti kokku, et globaalse soojenemise tempo üritatakse hoida alla 2 °C võrreldes tööstusrevolutsiooni eelse ajaga ja tehakse ülemaailmseid jõupingutusi, et soojenemine piirduks 1,5 °C kraadiga. Pariisi kokkuleppe jõustumise tingimuseks oli selle ratifitseerimine 55 riigi poolt kelle osaks langeb vähemalt 55% globaalsest kasvuhoonegaaside heitmetest, eelneva tingimuse täitumisel jõustus kokkulepe 4. novembril 2016. Samuti lepiti kokku, et aastaks 2020 on paika pandud tegevuskava. Euroopa Liidu riigid esitasid strateegia ja tegevuskava, et aastaks 2030. saavutatakse liidu kasvuhoonegaaside heitme neto vähenemine vähemalt 55% (varasemalt oli see 40%) ulatuses võrreldes 1990. aastaga. Pikem plaan on jõuda aastaks 2050 eesmärgini mil Euroopa Liit oleks esimene kliimaneutraalne majandus ja ühiskond. See tähendab seda, et õhku ei paisata rohkem kasvuhoonegaase kui seda erinevate meetmetega seotakse. [1]

Egiptuses Sharm el Sheikh`is 2022 aastal toimunud COP27 (*twenty-seventh session of the Conference of Parties*) raames tõdeti, et kuigi märkimisväärseid edusamme on kliimaneutraalsuse suunal tehtud on vaja märkimisväärselt suurendada jõupingutusi, et 1,5° C eesmärgi saavutamine oleks käeulatuses. Seatud eesmärkidest tulenevalt jõustatakse üle maailma taastuvate energiaallikate kasutamist. [2]

Eelmisel aastal Aserbaidžaani pealinnas Bakuus toimunud COP29 (*twenty-ninth session of the Conference of Parties*) raames suutsid riigid kokku leppida aastase kliimarahastu suurendamises arengumaadele 100 miljardilt dollarilt 300 miljardi dollarini aastaks 2035. See eesmärk hõlmab nii avaliku sektori kui ka erasektori panuseid ning mitmepoolsete arengupankade rahastust. Samuti saavutati kokkulepe globaalse süsinikuturu reeglite osas, mis aitab kaasa heitkoguste vähendamisele ja Pariisi kliimaleppe eesmärkide saavutamisele. COP29 tõi kaasa olulisi edusamme kliimarahastuse suurendamisel ja rahvusvahelise koostöö tugevdamisel. Siiski jäi kokkulepitud rahastuse tase alla arengumaade ootustele ning mitmed

küsimused, nagu fossiilkütuste kasutamise vähendamine ja konkreetsete kohanemismeetmete rahastamine, vajavad edasist arutelu. Järgmine kliimakonverents, COP30, toimub 2025. aastal Brasiilias, kus loodetakse saavutada veelgi ambitsioonikamaid kokkuleppeid. [3]

1.2. Taastuvenergia eesmärgid

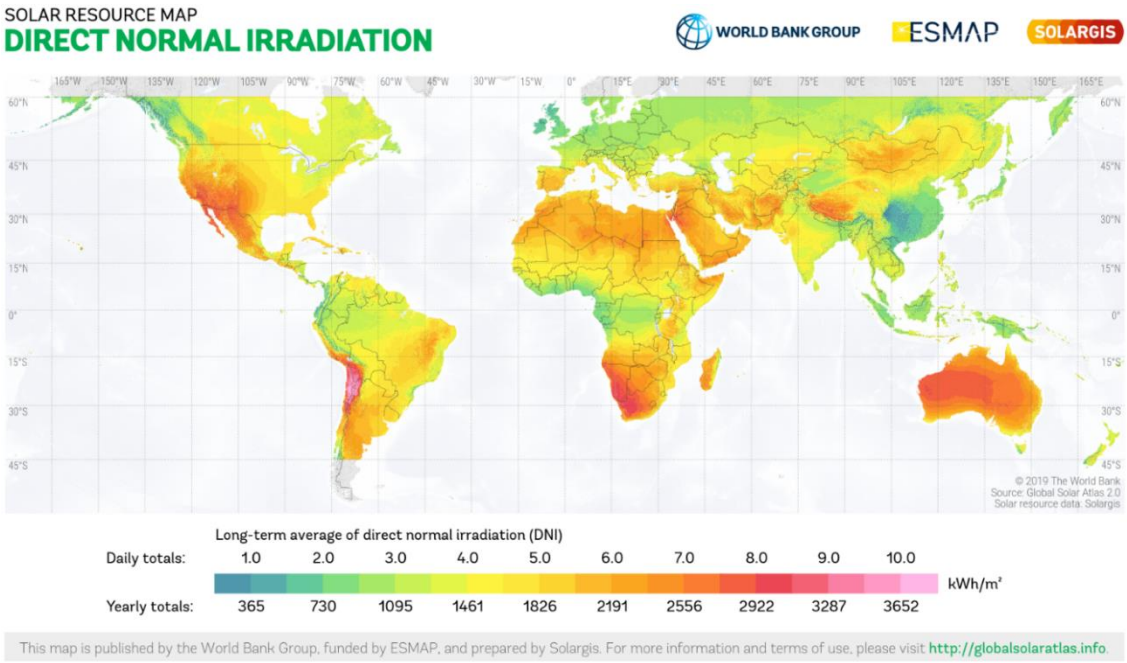
Iga Euroopa Liidu liikmesriik on seadnud endale siseriiklikud eesmärgid, mis peavad liidu ühtsele eesmärgile oma panuse andma vastavalt kohaliku taastuvenergia potentsiaalist ja ambitsioonist seda rakendada. Euroopa Liidu (EL) taastuvenergia eesmärgid aastaks 2030 on viimastel aastatel oluliselt ambitsioonikamaks muutunud, et kiirendada üleminekut puhtale energiale ja vähendada sõltuvust fossiilkütustest. Ülemöödunud 2023 aasta novembris jõustunud uuendatud taastuvenergia direktiiviga seati EL-i siduvaks eesmärgiks saavutada 2030. aastaks vähemalt 42,5% taastuvenergia osakaal kogu energia lõpptarbimisest. Lisaks julgustatakse liikmesriike püüdlema 45% osakaalu poole. Eesti riiklikul tasandil koostatud energia- ja kliimakava näeb ette, et aastaks 2030 moodustab summaarsest lõpptarbimisest taastuvenergia 42%. Eesti uuem eesmärk, mis jõustus 2022 aasta oktoobris on ammutada 2030-ndaks aastaks kogu energia taastuvatest energiaallikatest. Sellega seoses tõsteti 65-le protsendile ka taastuvenergia osakaal summaarsest lõpptarbimisest. Eesti saavutas endale aastaks 2020 seatud taastuvenergia 25% lõpptarbimise osakaalu juba 2011. aastal, jõudes 25,5%-ni. Nii varajast eesmärgi saavutamist võib seletada madala esialgse ambitsiooniga ja kohaliku olemasoleva taastuvenergia ressursi mittearvestamisega. Sellest tulenevalt vähenesid ka taastuvenergiasse tehtavad investeeringud möödunud dekaadi teises pooles ja taastuvatest allikatest saadava energia kasv pidurdus märgatavalt. Eurostati andmetel oli aastaks 2020 Eestis taastuvenergia kasutamise osakaal 30,1% lõpptarbimisest ja 2021. aastal tõusis taastuvenergia kasutamine 38% peale. ELis üldiselt oli 2021. aastaks oli saavutatud osakaal 21,7% summaarsest lõpptarbimisest, 2020 aasta lõpus oli osakaal 22,1% [5-7]. Eesti põhivõrgu haldaja Eleringi 2022. aasta kokkuvõttes on välja toodud statistika kohaselt küündinud taastuvatest allikatest toodetud energia kogus 2569 GWh-ni, mis moodustas kogu Eestis toodetavast elektrienergiast 34% ja kattis 28% summaarsest kogutarbimisest [8]. Käesoleva 2025. aasta esimese kvartali andmete põhjal oli taastuvenergia osakaal kogu elektritarbimisest 39% ja kogu toodetavast elektrienergiast moodustas see 58%. Eelmise aasta sama perioodiga võrreldes olid taastuvenergia protsendid vastavalt 31% summaarsest

tarbimisest ja 55% kogutoodangust [9]. Viimase viie aasta jooksul on päikeseenergia kasutus jõudsalt suurenenud ja kivisöe kasutus vähenenud. See on tinginud olukorra kus esmakordselt Euroopa Liidu lõikes ületas 2024 aastal päikesepaneelidelt saadud energia kivisöejaamadest saadava energia koguse, olles vastavalt 11% ja 10% summaarsest energiatoodangust. [10]

2. PÄIKESEENERGIA JA PÄIKESEELEKTRIJAAMAD

2.1. Päikesekiirgus kui energiaallikas

Päikeselt saabuvat kiirgust, mis maapinnale langeb saab inimkonna huvides ära kasutada, tootes näiteks PV paneelide abil elektrienergiat. Planeet Maa atmosfääri jõuab energiat keskmiselt 1360 vatti ruutmeetri (W/m²) kohta. Kuna atmosfääri läbides peegeldub osa energiast kosmosesse tagasi ja osa absorbeerub õhus, siis otsene normaalkiirgus DNI (*direct normal irradiance*) mis maapinnale jõuab on 1000 W/m². Kõige rohkem kiirgust jõuab maapinnani ekvaatori lähedastel laiuskraadidel, nagu on näha joonisel 1, vähenedes järjest pooluste suunas liikudes.



Joonis 1. Otsese päikesekiirguse kaart [11].

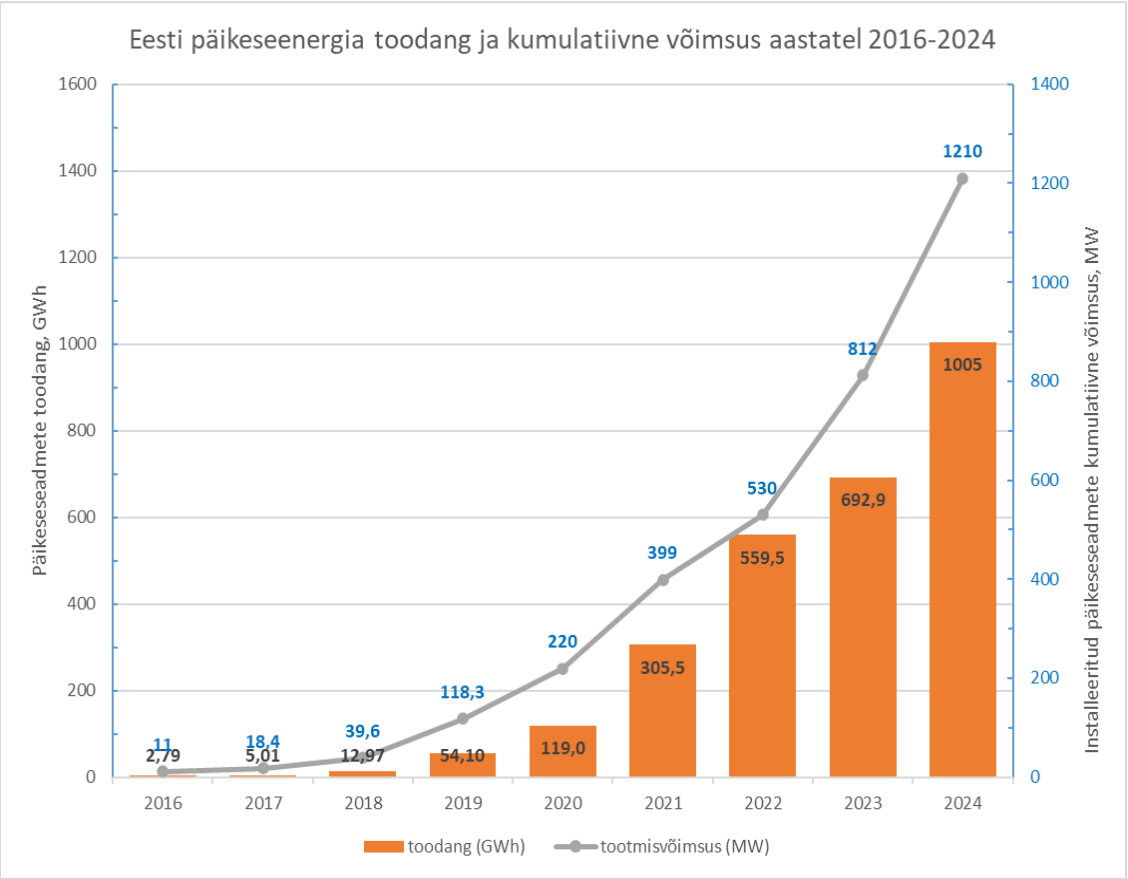
Just ekvaatori lähedastel laiuskraadidel on kiirgus kõige suurem, sest Maa telg on päikese suhtes 23,4º kalde all ja ekvaatoril vähendavad kiirguse hulka ka sademete suur hulk. Mida poolustele lähemale seda väiksemaks läheb päikesekiirte ja maapinna vaheline nurk ning seda suuremat õhumassi peavad päikesekiired läbima, kus neeldub ka rohkem energiat. Päikeseenergia ressursi kasutatavus on otseses seoses ka aasta keskmisest temperatuurist vastavas piirkonnas, sest madalamal temperatuuril on PV paneelide efektiivsus suurem, suureks mõjutajaks on ka pilvisuse ja sademete hulk. Sestap on Eesti piirkonnas

päikeseenergia kasutatavus võrreldav näiteks Kesk-Euroopas asuvate Saksamaa ja Tšehhiga. [12]

2.2. Päikeseenergia rakendamine

Päikeselt maale jõudev energiahulk on nii suur, et ületab inimkonna vajaduse mitmekordselt kuid selle potentsiaali rakendamine on nüüdisaja väljakutse. Tänu soodsatele toetusmeetmetele ja tehnoloogia odavnemisele algas 2018. aastal päikeseenergeetika kiirenev areng, mis on jätkunud läbi aastate käesoleva ajani ning teeb seda ilmselt ka edaspidi. Eestis on muutunud tavapäraseks PEJ-de rajamine hoonete katustele ja maapinnale. Üha enam inimesi ja ettevõtteid näevad päikeseparkide rajamist pikaajalise investeeringuna kas jooksvate kulude vähendamise või ettevõtluse vormina. Samuti on tekkinud juurde hulgaliselt teenusepakkujaid kes pakuvad konsultatsioonidest kuni võtmed kätte lahendusteni. Puhtakujulised "paneelid ja inverter" tootmisvõimsused ei pruugi enam tänapäevast turusituatsiooni arvestades kõige optimaalsemad olla. Sestap on ehitatavad elektrijaamad üha keerukama konfiguratsiooniga, hõlmates endas lisadena börsi jälgimist, juhtimiskontrollereid, erinevaid salvestustehnoloogiat ja ka alternatiivseid tootmisvõimsusi näiteks tuugenite näol. Eesti võrguettevõtjate käest koondatud andmetel oli 2025. aasta alguseks elektrivõrguga liitunud päikeseelektrijaamu tootmisvõimsusega 1210 mega-vati (MW) ulatuses. Võrreldes 2023 aastaga mil uute elektrivõrguga liitunud PEJ jaamade tootmisvõimsus oli 282 MW saavutades koguvõimsuseks 812 MW, siis 2024. aastal liitus võrguga koguni 398 MW ulatuses uusi päikeseelektri tootmisüksusi. Võrku antud päikeseelektri kogus suurenes võrreldes eelneva aastaga 2024. aastal 693 giga-vatt tunni (GWh) pealt 1005 GWh-ni ületades märgilise 1 tera-vatt tunni (TWh) piiri. [13, 14]

Päikeseenergia kiirenev kasutuselevõtt on tinginud olukorra kus vähem kui kümne aastaga on võrguga liitunud võimsused suurenenud rohkem kui sada- ja võrku antud tootmismahud rohkem kui 360 korda. Tootmismahtude ja võimsuste eksponentsiaalset kasvu illustreerib joonis 2.

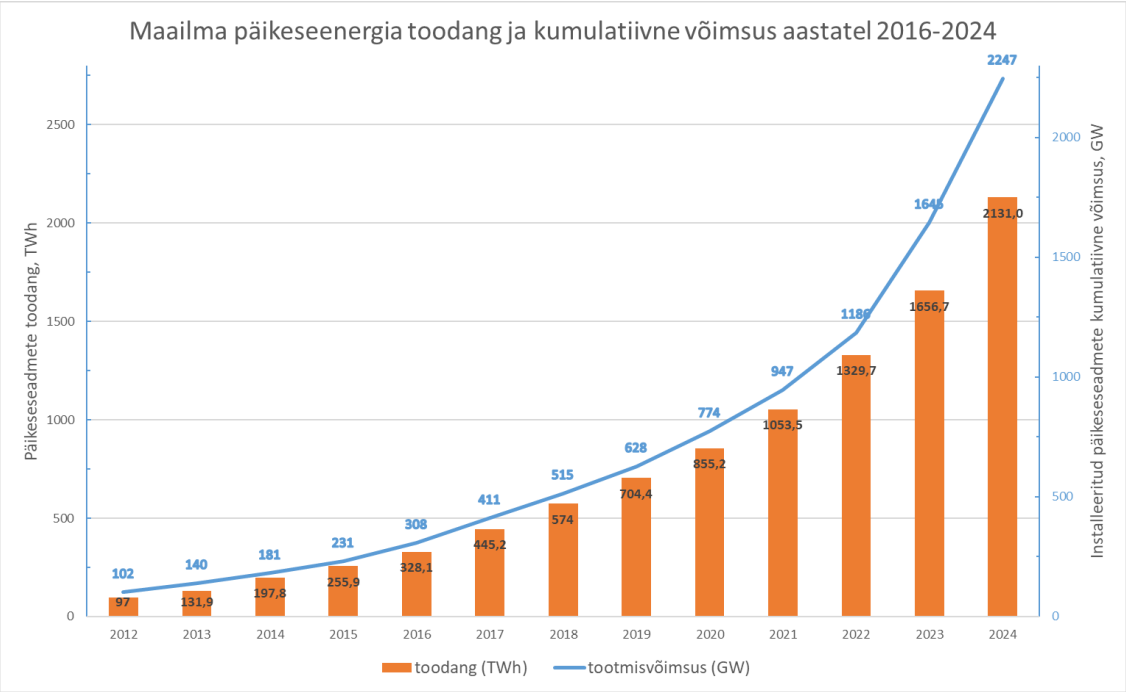


Joonis 2. Eesti päikeseenergia toodang ja kumulatiivne võimsus aastatel 2019-2024 [13, 14].

Tegelikkuses on PEJ-de poolt toodetud energia hulk suurem, sest osa energiast tarbitakse kohapeal ära ja osad nano- või mikrotootjad pole Eesti elektrisüsteemiga üldse seotudki talitades *off-grid* ehk saarsüsteemidena. Selliste PEJ-de info on raskesti kättesaadav ja sestap ei kajastu see ka esitatud andmetes. Nanotootja puhul on tegemist alla 0,8 kW ja mikrotootja puhul kuni 15 kW võimusega tootmisüksusega [15]. Päikeseenergia populaarsuse tõusule aitavad kaasa ka uute ehitavate hoonete energiatõhususe nõuete karmistumine, riigi poolt läbiviidavad taastuvenergia vähempakkumised ja üldine tehnoloogia odavnemine.

Maailma mastaabis ületas päikeseenergia 2024. aastal 2 000 TWh elektritootmise piiri, jõudes selleni kiiremini kui ükski teine elektri genereerimise tehnoloogia ajaloos. Kui päikeseenergia tootmine kasvas üheksa aastaga 100 TWh-lt 1 000 TWh-ni, siis järgmine hüpe 1 000 TWh-lt 2 000 TWh-ni toimus vaid kolme aastaga. [16]

Maailma päikeseenergia netotoodangust ja kumulatiivsest paigaldatud võimsustest viimase 13 aasta jooksul annab ülevaate joonis 3.



Joonis 3. Maailma päikeseenergia toodang ja kumulatiivne võimsus aastatel 2012-2024 [16, 17].

Päikeseenergia on jätkanud oma eksponentsiaalset kasvu, see tehnoloogia levib jõudsalt elektrisüsteemides üle kogu maailma ja siseneb uutele turgudele saades oluliseks osaks energiasektoris.

2.3. Päikeseelektrijaamad Eestis ja mujal maailmas

Viis maailma suurima päikeseelektri toodanguga riiki aasta 2024 lõpu seisuga on [16]: 1) Hiina (834 TWh, 39% maailma toodangust), 2) Ameerika Ühendriigid (303 TWh), 3) India (134 TWh), 4) Jaapan (102 TWh), 5) Brasiilia (75 TWh). Selleks, et päikesest lähtuvat potentsiaali rakendada on välja arendatud mitmeid erinevaid päikeseenergia kogumise viise. Peamiselt kasutatakse kahte alljärgnevat teiseteisest erinevat tehnoloogiat.

2.3.1. Kollektorpäikeseelektrijaamad

Kollektorpäikeseelektrijaamad ehk kontsentreeritud päikeseenergia CSP (*Concentrated Solar Power*) jaamad kasutavad ära päikesekiirguse soojusenergeetilised omadused elektri tootmiseks, kogudes ja kontsentreerides päikesekiirguse, et saavutada kõrgeid temperatuure, mis on vajalikud elektri tootmiseks. Päikesekiired koondatakse spetsiaalse kujuga peeglite või läätsede abil ühte punkti kus toimub energia edastamine soojuskandjale. Olenevalt saavutatud temperatuurist suunatakse soojusenergia soojusvahetisse, tarbevee või

väiksemate hoonete kütmine, või auruturbiini kus läbi mehaanilise töö saadakse elektrienergia. Vastavalt temperatuurile, mille soojuskandja saavutab, jagatakse kollektor päikesejaamad madala,- keskmise- ja kõrge temperatuuriga kollektoriteks. Tänu kõrgele töötemperatuurile on tööstuslike päikese soojuselektrijaamade koosseisus võimalik kasutada ka soojusenergia salvestusseadmeid, mis võimaldavad kasutada salvestatud energiat ka öisel ajal või pilvise ilmaga. [18]

Kollektortüüpi PEJ on enamasti levinud piirkondades, kus otsese päikesekiirguse osakaal on suur ning pilvede ja sademete mõju väike kuna nad ei ole projekteeritud hajuskiirguse kontsentreerimiseks. Sellisteks piirkondadeks on kontinentaalse kliimaga piirkonnad millest annab aimu viie maailma suurima kollektor PEJ paiknemine 2024 aasta lõpu seisuga [19]:

1. Ouarzazate Solar Power Station, Maroko (510 MW);
2. Ivanpah Solar Power Facility, USA (392 MW);
3. Solar Energy Generating Systems, USA (310 MW);
4. Mojave Solar Project, USA (280 MW);
5. Solana Generating Station, USA (280 MW);
6. Genesis Solar Energy Project, USA (280 MW).

Päikesekollektorid on Eestis tööstuslikul tasandil vähelevinud. Kõige sagedamini kasutatakse väikesevõimsuselisi kollektoreid eramute tarbevee kütmiseks.

2.3.2. Fotoelektrilised päikeseelektrijaamad

Fotoelektrilistes elektrijaamades on töö tegijateks footonid. Päikesevalgus on sisuliselt nähtamatute laetud osakeste (footonite) lainetus, mis päikesepaneeli elementi tabades ja pooljuhtmaterjalis neeldudes lööb juhtiva materjali (räni) aatomitest elektrone välja. Suunatult liikuvad elektronid tekitavad potentsiaalide erinevuse mida nimetataksegi elektrivooluks. Fotoelektrilised päikesepaneelid toodavad otseselt päikese kiirgusest alalisvoolu. [20]

Seda on omakorda võimalik inverterite kaudu muundada Eesti elektrivõrgule sobilikuks vahelduvvooluks.

Kui suurimate kollektor tüüpi jaamade seas oli enamus Euroopas või Põhja-Ameerikas, siis fotoelektriliste jaamade osas annab tooni Aasia, eelkõige Hiina [21]:

1. *Talatan Solar Park*, Hiina (15 600 MW);
2. *Hobq Solar Park*, Hiina (4000 MW);
3. *Ruoqiang Solar Park*, Hiina (4000 MW);
4. *Otog Front Banner Solar Park*, Hiina (4000 MW);
5. *Midong Solar Park*, Hiina (3500 MW).

Suurte PEJ-de arendamine on ajamahukas protsess, neid ehitatakse mitmete aastate vältel erinevate etappidena ning nende puhul ei saa kõnelda ühest konkreetsest päikeseelektrijaamast vaid tervest jaamade süsteemist, mis hõlmab suuri piirkondi. Näiteks hetkel maailma suurim päikeseelektrijaam laiub 609 ruutkilomeetril. [21]

Tulevikuperspektiivis on planeerimises veelgi suuremad jaamad, et rahuldada kasvavat energianõudlust ja vähendada sõltuvust fossiilsetest kütustest. Austraalias on planeerimise järgus jaam mille võimsus oleks 35 giga-vatti (GW) ja Liibüas projekteerimisel jaam mille võimsus on 25 GW [22].

Eestis on päikeseelektrijaamade mastaabid oluliselt väiksemad kui suuremates riikides. Viimasel viiel aastal on on iga-aastane tootmisüksuste juurdekasv olnud üle 100% aastas. Kuna vaba maapinda pole palju siis tekib moraalne küsimus kas on mõistlik uusi elektrijaamu ehitada näiteks põllumajanduslikult väärtuslikule maale. Parimad kohad PEJ paigaldamiseks võiksid olla hoonete katused-seinad, väheviljakad- ja jäätmaad.

Seisuga mai 2025 aastal on Eestis suurimad opereerivad fotoelektrilised päikeseelektrijaamad [23]:

1. Kirikumäe (77,53 MW);
2. Raba (45,2 MW lisaks ehitatakse 16 MW / 32 MWh salvesti);
3. Purtse (32 MW);
4. Imavere (15,5 MW);
5. Lohu mets (13,7 MW).

Hetkeseisuga Eesti suurim planeeritav päikesejaam, mis on ehitusjärgus, tuleb Lääne maakonda Ristile. See saab olema hübriid-park kuhu tuleb esimeses etapis ehitatavale 244 MW võimsusega päikeseelektrijaamale lisaks ka tuulepark ja salvestusvõimsused. [23, 24]

Olgugi, et võrreldes maailma suurimate päikesejaamadega on Eesti jaamad mitmete suurusjärkude võrra väiksemad on needki tavainimesele oma kümnete ja isegi sadade hektariliste pindalade poolest hoomamatu.

2.3.3. Taastuvenergia salvestamine

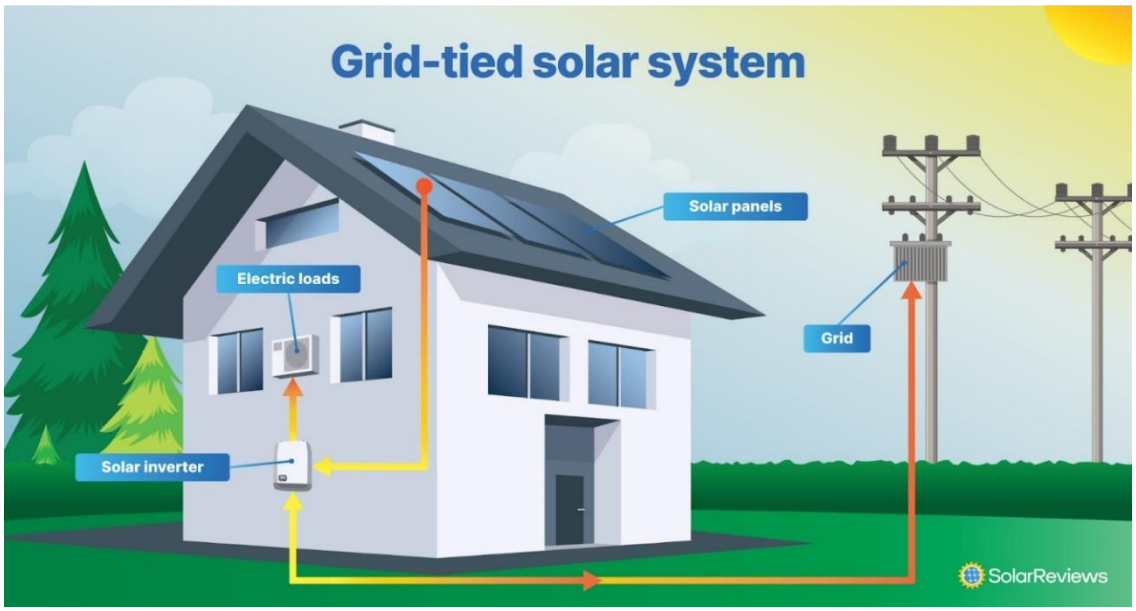
Hüppeline päikesejaamade võrku lisandumine toob välja nende põhilise kitsaskoha, milleks on tootmise juhitamatus. Selle valguses on üha aktuaalsem salvestite vajadus, et tasakaalustada omavahel tootmist ja tarbimist, sest suur volatiilsus mõjutab otseselt võrgu toimimist. Sestap on taastuvenergia salvestusvõimsuste loomine järgmine oluline samm toimepidevuse hoidmisel. Hiljutine mastaapne elektrikatkestus, mis halvas kogu Pürenee poolsaare elektrisüsteemi tõi probleemi teravalt esile [25]. Veebruari alguses avati Auvere tööstuskompleksis Eesti senini suurim, 26,5 MW võimsuse- ja 53,1 mega-vatt tunni (MWh) mahutavusega akusalvesti, mis aitab stabiliseerida elektrisüsteemi ja tasandada tootmise defitsiidist tulenevaid kõrgeid tipuhindasid [26]. Ühtlasi aitavad salvestid, mis reageerivad kiiresti vaid mõne sekundi jooksul, hoida võrgu sagedust 50 Hz juures. Ehituses olevatest salvestusvõimsustest on planeeritud 2025-nda aasta viimases kvartalis ja 2026-ndal aastal võrku lülitada Saku ja Raasiku vallas asuvad akuparkide kompleksid koguvõimsusega 200 MW ja 400 MWh. [27]

2.4. Fotoelektriliste päikeseelektrijaamade tüübid

Maailmas on olemas kolme põhilist tüüpi päikeseelektrijaamu. Eri tüüpi jaamades kasutatakse erinevaid komponente ja toimimise loogikat. Iga jaama ülesehituses tuleb lähtuda jaama eesmärgist ja pragmaatilistest kaalutlustest.

2.4.1. Võrguga ühendatud ehk *on-grid* PEJ

Jaam, mis on elektri ülekandevõrguga ühenduses, reeglina on see kõige otstarbekam variant kui on võimalus luua ühendus elektrivõrguga. PV paneelid toodavad alalisvoolu mille inverter muundab vahelduvvooluks ja mis seejärel suunatakse tarbimisse. Kogu energia, mis jääb üle müüakse läbi kahesuunalise arvesti elektrivõrku. Süsteemi (joonis 19) osad on: 1) PV paneelid (*solar panels*), 2) inverter (*inverter*), 3) kahesuunaline elektriarvesti (*meter*), 4) elektri ülekandevõrk (*grid*) ja 5) tarbijad (*home*). [28]

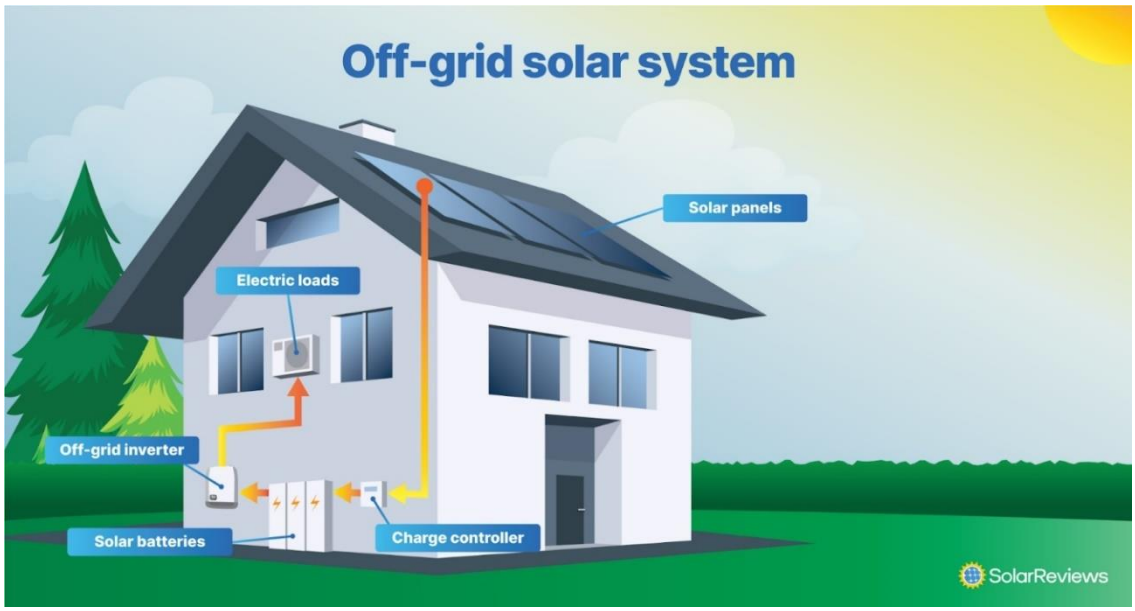


Joonis 4. Võrguga ühendatud päikeseelektrijaam [28].

Elektrivõrk hoiab süsteemis ka 50 Hz sagedust seadmete normaalse talitluse jaoks. [29]

2.4.2. Võrguga ühendamata ehk *off-grid* PEJ

Vastupidiselt *on-grid* võrgule puudub sellel elektrijaamal ühendus ülekandevõrguga ja elektrivarustus sõltub ainult kohapeal olevatest tootmisüksustest. PV paneelidest tulev alalisvool salvestatakse laadimiskontrolleri abil akudesse, vastavalt vajadusele võetakse akudest energiat, muundatakse see vahelduvvooluks ja suunatakse tarbijatele. Päikesepaiste puudumisel varustatakse tarbijaid elektrigeneraatorist või akupatareidest tuleva elektriga. Reeglina kasutatakse sellist varianti kui elektrivõrguga ühenduse loomine pole majanduslikult otstarbekas või on soov talitada saarsüsteemina. Sellise süsteemi rajamine on tänu täiendavatele seadmetele kulukam kui *on-grid* variant, aga selline PEJ koos elektrigeneraatoriga on autonoomsem. Süsteemi (joonis 20) kuuluvad: 1) PV paneelid (*solar panels*), 2) laadimiskontroller (*charge controller*), 3) inverter (*inverter*), 4) akupatareid (*battery bank*), 5) elektrigeneraator (*optional generator*) ja 6) tarbijad (*home*). [28]

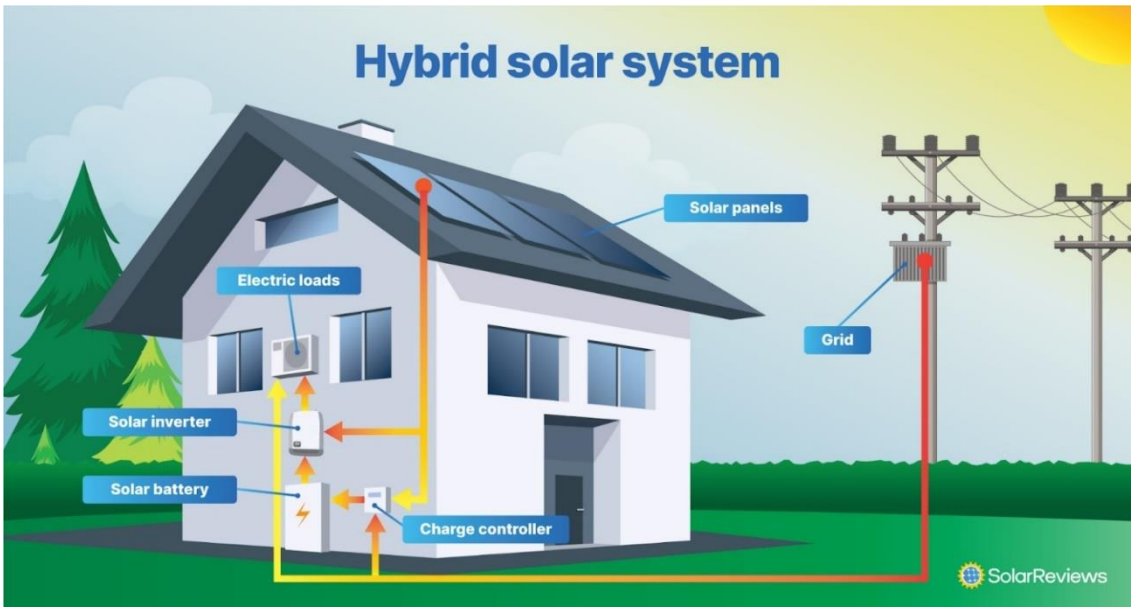


Joonis 5. Võrguühenduseta päikeseelektrijaam [28].

Akude olemasolu loob energia salvestamise võimaluse ning päikeseenergiat saab kasutada paindlikumalt, ka sel ajal mil päikest ei paista. Vajadusest elektrit mitmel korral muundada vähendab see jaama kasutegurit ja akude piiratud laadimistsüklite arv pikendab PEJ tasuvusaega. [28]

2.4.3. Võrguga ühendatud hübriid PEJ

See PEJ kätkeb endas elemente nii *on-grid* kui ka *off-grid* jaamadest muutes PV paneelide poolt toodetava energia kasutamise eriti paindlikuks. Puudub vajadus soetada sisepõlemismootoriga elektrigeneraatorit varutoiteallikaks, kuigi seda võib teha, et kindlustada võrgust olenevate tõrgete vastu, ja salvestusseadmena saab kasutada akupanka või ka elektriautot. Jaama on võimalik konfigureerida salvestama või võrku müüma energiat siis kui see on majanduslikult kõige otstarbekam. Elektrijaama osad (joonis 21) on: 1) PV paneelid (*solar panels*), 2) hübriidinverter (*inverter*), 3) akupatareid (AC *battery*), 4) tarbijad (*home*), 5) kahesuunaline elektriarvesti (*meter*) ja 6) ülekandevõrk (*grid*). [28]



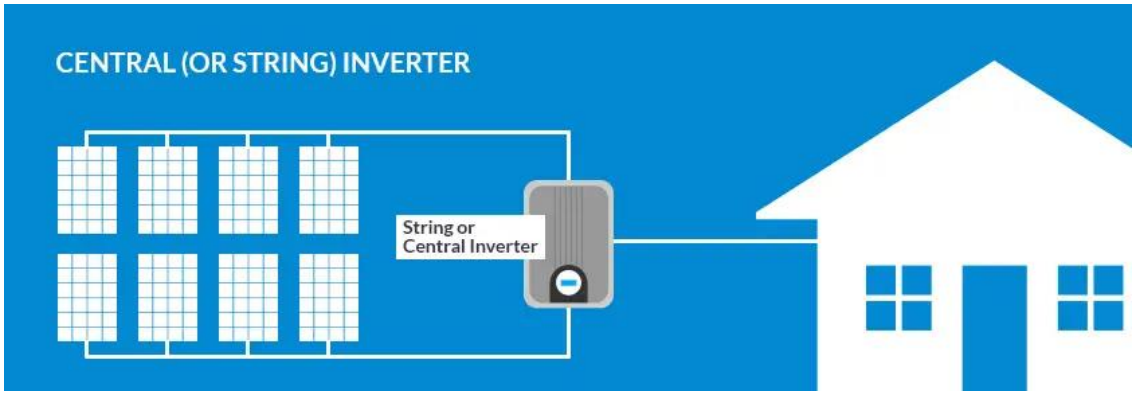
Joonis 6. Võrgu ühendusega hübriid päikeseelektrijaam [28].

Hübriidne süsteem on kõige suuremate paigalduskuludega variant kuid on kõige paremini kaitstud erinevate negatiivsete stsenaariumide vastu mis võivad ülekandevõrgu või ilmastikutingimuste kontekstis realiseeruda. [28]

3. ELEKTRIENERGIA MUUNDAMINE

3.1. Jadainverter

Kõikides päikeseelektrisüsteemides, mis on ühendatud ülekandevõrguga, kasutatavate inverterite puhul on tegemist keskse seadmega, mis inverteerib alalisvoolu 230/400 V vahelduvvooluks. Jadainverterisse (inglise k. *string inverter*) ühendatakse PV paneelid jadamisi järgides maksimaalseid alalispinge etteantud väärtusi, enamasti võiks ühe jada pinge jääda vahemikku 600-1000 V AC, mis sõltub inverteri tehnilistest andmetest. Olenevalt inverterist saab ühendada seadme külge üks kuni mitu paneelide jada ehk *stringi* (joonis 22). [29]

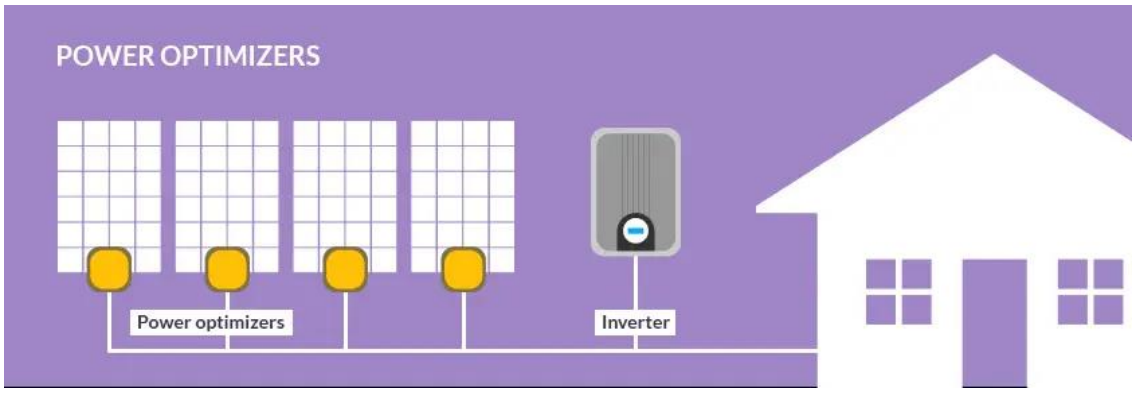


Joonis 7. Jadainverteri põhimõtteline ühendusskeem [29].

Kui ühendatakse mitu jada võiks eesmärk olla sisenevate pingete võrdsus, et inverter töötaks optimaalselt. Süsteemi lihtsuses peitub ka tema suurim puudus. Kui ahelas mõne paneeliga midagi juhtub häirib see terve jada tööd. Inverteri ülesanne pole enam pelgalt pinge inverteerimine vaid ka üha rohkem elektrisüsteemi töö ja parameetrite monitoorimine, andmete kogumine ja edastamine ning hübriidinverterite puhul ka akude laadimise ja tühjendamisega seonduv. [29]

Hübriidinverter (inglise k. *hybrid inverter*) on jadainverteri eriliik, põhimõtteliselt on ta lisadega jadainverter. Nimelt on tal lisaks kontrollerid, mis võimaldavad tegeleda süsteemi ühendatud akude täis ja tühjaks laadimisega ja nende protsesside montoorimisega. [29]

Võimsuse optimeerija (inglise k. *power optimizer*) on lisaseade mida kasutatakse kombinatsioonis jada- ja hübriidinverteritega (joonis 23).



Joonis 8. Võimsuse optimeerijatega jadainverteri põhimõtteline ühendusskeem [29].

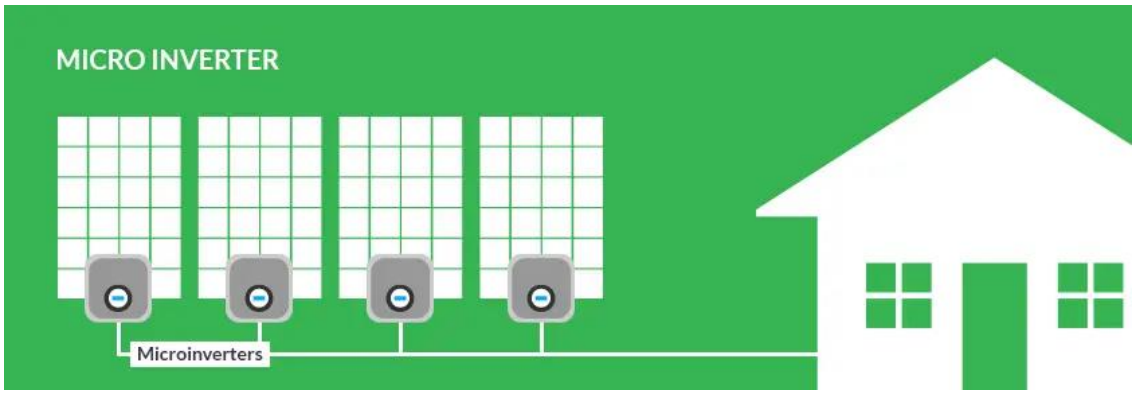
See võimaldab sarnaselt mikroinverteriga vähendada päikesepaneeli varjutamise negatiivset mõju säilitades mitte varjus olevate paneelide väljundpinge. Optimeerija paigaldatakse nende paneelide juurde mis jäävad päeva jooksul mingiks ajaks osaliselt või täielikult varju. [29]

Tavaliselt dimensioneeritakse paigaldisse võrdse võimsusega inverter ja paneelide grupp, aga võrguühendusega jaamades on levinud ka paneelide üledimensioneerimine, mil paigaldatud paneelide võimsus ületab inverteri võimsust 10 kuni 20%. Seda tehakse keskpäevase päikese käes paneelide ülekuumenemisest tingitud tootlikkuse vähenemise kompenseerimiseks. Samuti on tootja poolt PV paneelid katsetatud standardsetes tingimustes mida paneelide ekspluatatsiooni käigus ei kohta. [30]

Inverterist võrku antav võimsus aga peab olema sätetega piiratud, et mitte ületada võrgulepingutega ette nähtud parameetreid.

3.2. Mikroinverter

Mikroinverter (inglise k. *micro inverter*) puhul pole tegemist keskse seadmega vaid see asub iga paneeli juures (joonis 24) muundades alalisvoolu juba ahela alguses vahelduvvooluks. Sellega saavutatakse optimeeritus üksiku paneeli tasemel ning ühe paneeli varjutamine või rivist välja langemine ei mõjuta terve süsteemi tööd negatiivselt. [29]



Joonis 9. Mikroinverteritega põhimõtteline ühendusskeem [29].

Mikroinverterid on otstarbekad olukordades, kus on paneelide varjutamise oht või kui ühe süsteemi paneelid on paigaldatud suunaga erinevatesse ilmakaartesse. [29]

4. KONTROLLMÕÕTMISED

4.1. Nõuded päikeseelektrijaamadele

Sarnaselt kõikidele muudele elektripaigaldistele kohanduvad ka päikeseelektrijaamadele teatud nõuded, et paigaldis oleks ekspluatatsiooni vältel ohutu käidelda, funktsioneeriks õigesti ja ei kahjustaks teisi ühenduses olevaid seadmeid. Standardeid ja eeskirju millele päikeseelektrijaam kui elektripaigaldis vastama peab on mitmeid, põhilisemad on:

1. EVS-HD 60364-6:2016+A11+A12 Madalpingelised elektripaigaldised. Osa 6: Kontrollitoimingud. [31];
2. EVS-EN 62446-1:2016 Fotoelektrilised süsteemid - Nõuded testimisele, dokumentatsioonile ja hooldusele - Osa 1: Võrguga ühendatud süsteemid - dokumentatsioon, vastuvõtu testid ja ülevaatus. [32];
3. EVS-EN 61829:2016 Fotoelektrilised ahelad - Voolu-pinge karakteristiku kohapealne mõõtmine. [33];
4. EVS-EN 50549-1:2019 Nõuded jaotusvõrkudega paralleelselt ühendatud tootmisüksustele. Osa 1: Ühendus madalpinge jaotusvõrguga. Tootmisüksused kuni tüübini B (kaasa arvatud). [34];
5. EVS-EN 50549-2:2019 Nõuded jaotusvõrkudega paralleelselt ühendatud tootmisüksustele. Osa 2: Ühendus keskpinge jaotusvõrguga. Tootmisüksused kuni tüübini B (kaasa arvatud). [35];
6. EVS-HD 60364-7-712:2016 Madalpingelised elektripaigaldised. Osa 7-712: Nõuded eripaigaldistele ja -paikadele. Fotoelektrilised süsteemid. [36];
7. EVS 812-7:2018 Ehitiste tuleohutus. Osa 7: Ehitisele esitatavad tuleohutusnõuded. [37].

Tarbijakaitse ja Tehnilise Järelvalve Ameti juhendis “Elektripaigaldise auditi juhendmaterjal” asjakohases versioonis 12.1 on olemas ka fotoelektriliste süsteemide osa. TTJA juhend sätestab, et fotoelektriliste süsteemide kontrollimiseks olevad alused on toodud standardites EVS-HD 60364-7-712:2016 ja EVS-EN 62446-1:2016. Teostatavatel alalisvoolu mõõtmistel on juhindutud eelolevas lõigus nimetatud juhendmaterjalis ja standardites kirjeldatud testmõõtmistest. [38]

Päikeseenergia PV-süsteemile rakendatavad mõõtmised peavad olema sobivad vastavalt süsteemi suurusele, tüübile, asukohale ja keerukusele. Standard EVS-EN 62446-1:2016 määratleb kaks kategooriat teste koos mitme lisakatsega, mida võib teha pärast standard mõõtmiste lõpetamist [32]:

1. **1. kategooria katsed** — miinimumnõuded — standardne katsete kogum, mida tuleb rakendada kõikidele süsteemidele;
2. **2. kategooria katsed** — laiendatud katsete kogum, mida tehakse eeldusel, et kõik 1. kategooria katsed on juba läbi viidud;
3. **Lisakatsed** — muud katsed, mida võib teatud juhtudel samuti läbi viia.

Sooritatud mõõtmiste kirjeldused ja andmed leiavad kajastust mõõtmiste käigu alapeatükis.

4.1.1. Esimese kategooria testmõõtmised

1. kategooria mõõtmised on minimaalsed kohustuslikud testid, mida tuleb rakendada olenemata paigaldise suurusest, tüübist, asukohast või keerukusest. Paigaldise testimine peab hõlmama nii vahelduvvoolu (AC) kui alalisvoolu (DC) pooli päikesesüsteemist. Üldjuhul tuleks AC poole testid lõpetada enne DC testide juurde asumist. Mõnel juhul võib AC poole testimine olla võimalik alles projekti hilisemas etapis ja tuleb ajastada pärast DC poole testimist. Kui see on vajalik, tuleb mõned DC funktsionaalsed testid (nt inverteri korrektse töö tagamine) edasi lükata kuni AC testide lõpuni. [32]

Esmases järjekorras tuleb läbi viia kõikide vahelduvvoolu ahelate testimine vastavalt standardi IEC 60364-6 nõuetele. Käesolevas töös vahelduvvoolu osa teste ei vaadelda.

Mõõtmised fotoelektriliste süsteemide alalisvoolu osas [32]:

1. maandus- ja/või potentsiaaliühtlustusjuhtmete (kui nende paigaldus on nõutav) katkematuse kontroll või takistuse mõõtmine;
2. polaarsustest;
3. ühenduskasti (inglise k. *Combiner box*) katsetus;
4. moodulijada tühijooksupinge mõõtmine;
5. moodulijada lühis- või töövoolu mõõtmine;
6. (kaitse- ja lülitusaparaatide, sh turvalülitite ning inverterite) talituskatsetused;
7. alalisvooluahelate isolatsioonitakistuse mõõtmine.

Need testid viiakse läbi päikeseelektrijaama fotoelektrilis(t)es sektsiooni(de)s (inglise k. *photovoltaic array*). [29]

Ohutuse kaalutlustel ja ühendatud seadmete kahjustuste vältimiseks tuleb polaarsuse test ja ühenduskasti test sooritada enne, kui päikesepaneeli ahelad on omavahel ühendatud. I-V kõvera test (voolu-pinge kõver) on aktsepteeritav alternatiivne meetod, et määrata paneelijada lahtise vooluringi pinge ehk tühijooksupinge (U_{OC}) ja lühisvool (I_{SC}). Kui sooritatakse I-V test, siis eraldi U_{OC} ja I_{SC} testid ei ole vajalikud, tingimusel, et I-V test viiakse läbi sobivas etapis 1. kategooria testide hulgas. [32]

4.1.2. Teise kategooria testmõõtmised

Peale 1. kategooria teste võib paigaldises läbi viia ka vabatahtlikud 2. kategooria testid. Need on mõeldud suuremate ja keerukamate süsteemide korrasoleku kontrolliks ning nende läbiviimisele peavad kindlasti eelnema normidekohaste tulemustega 1. kategooria testid. Teise kategooria testid sisaldavad moodulijada võimsuskõvera (voolu-pinge) test ja infrapuna vaatlus.Nendest testidest võib täiendavateks mõõtmisteks valida ka vaid ühe ning seda ei pea rakendama tervele jaamale, piisab kui võimsuskõvera mõõtmist või infrapunavaatlust rakendatakse valitud osale jaamast. [32]

4.1.3. Täiendavad testmõõtmised

Lisaks ülaltoodud mõõtmistele kirjeldab standard EVS-EN 62446-1:2016 ka lisamõõtmisi mida teostatakse tingimustel, kui jaama töös esineb häireid või varasemad testid on andnud küsitavaid tulemusi ja 1. ning 2. kategooria mõõtmiste põhjal pole viga tuvastatud [32]:

1. Puutepinge test;
2. Tõkkedioodi test;
3. Märja isolatsiooni test;
4. Varjude mõõtmine.

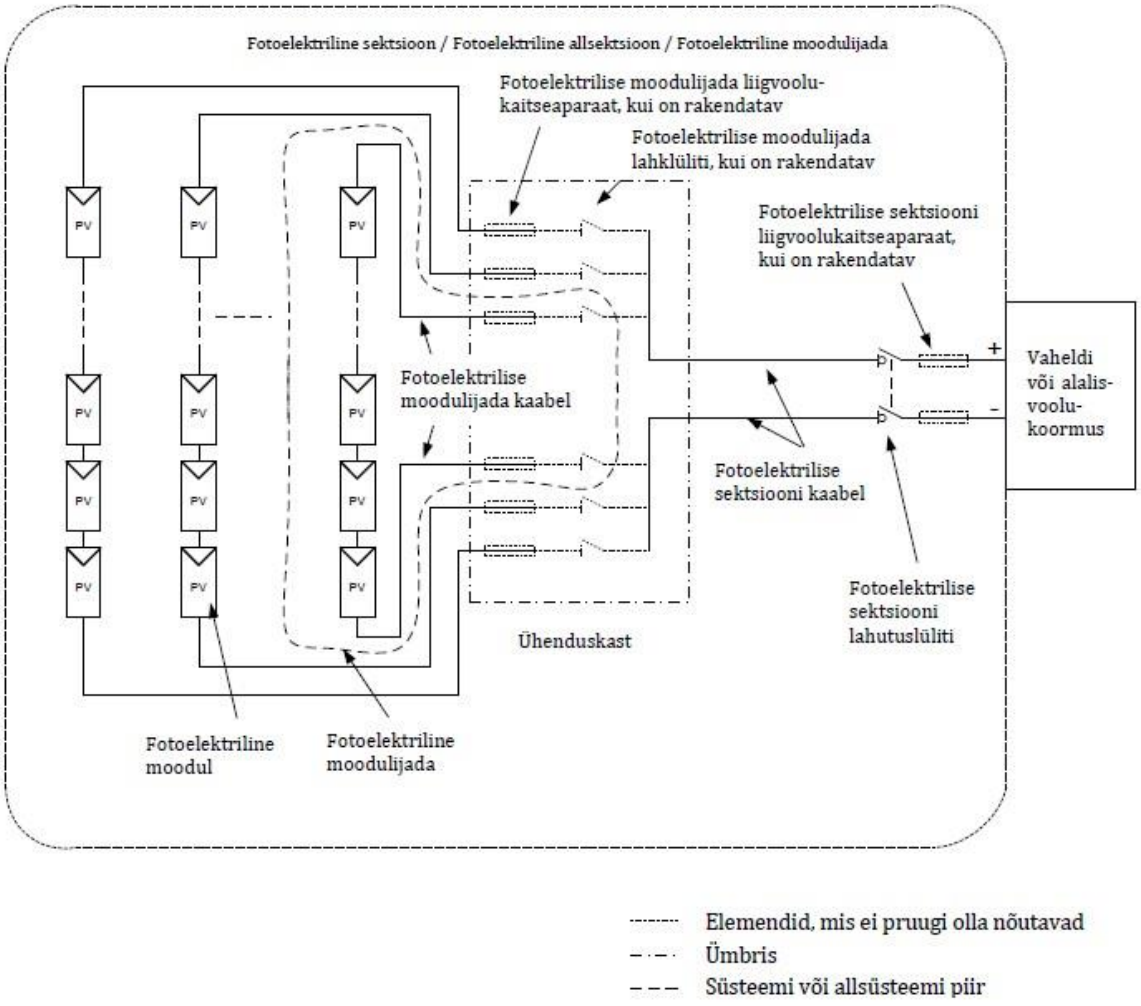
Täiendavate mõõtmiste vajaduse otsustab auditeerija. Mõõtmiste tellija võib muidugi nende tegemiseks soovi avaldada.

4.2. Mõõtmisteks vajalik dokumentatsioon ja mõõtevahendid

Ühes PEJ valmimisega tuleb esitada ka dokumentatsioon elektripaigaldise vastavuse kohta. Standard EVS-EN 62446-1:2016 [32] sätestab mis info peab paigaldise kohta olemas olema.

4.2.1. PEJ elektriline ülesehitus

Jaama elektriline ülesehitus peab olema esitatud vähemalt ühe juhtme skeemina koos vajalike märkuste, täpsustuste ja spetsifikatsioonidega (joonis 4.1) [36].



Joonis 10. Üksiku või mitme rööbiti ühendatud moodulijadaga fotoelektrilise sektsiooni näide [36].

Elektriskeemides peab olema välja toodud fotoelektrilise sektsiooni ülesehitus: 1) moodulite tüübid, 2) moodulite arv, 3) mooduljadade arv, 4) moodulite arv mooduljadas, 5) missugused mooduljadad on mis inverteritega ühendatud. Kõnealuse Väimela PEJ elektriskeem on Lisas 1 [44].

Mooduljada kohta peavad olema: 1) kaabli tehnilised andmed (mark/ristlõige), 2) liigvoolu piiravate seadmete andmed (kui on paigaldatud), 3) tõkkedioodi andmed.

Fotoelektriliste sektsioonide kohta peavad olema välja toodud: 1) sektsiooni põhikaabli andmed (mark/ristlõige), 2) ühenduskasti asukoht, 3) alalisvoolu lahklülitite paiknemine ja andmed (pinge/vool), 4) liigvoolu piiravate seadmete paiknemine ja tehnilised andmed (pinge/vool), 5) täiendavate kaitseseadmete (näiteks sädeluskaitse) paiknemine andmed (pinge/vool).

Vahelduvvoolu poole pealt peab olema info vahelduvvoolu kaitselahutus, liigvoolu kaitsme- ja rikkevoolukaitselüliti paiknemise ja tehniliste (nimivool, nimipinge, tüüp) andmete kohta.

Potentsiaaliühtlustuse osas peab olema: 1) maanduspaigaldise asendiplaan, süva- ja tarindi potentsiaaliühtlustusjuhtide margid ja ristlõiked, 2) info piksekaitse kontuuriga ühenduste kohta, 3) liigpingepiirikute (AC ja DC) paigutus ja andmed.Kui elektrilisi sektsioone on kolm või rohkem tuleb asendiplaanil ära näidata mooduljadade jagunemine, seda eriti suuremate jaamade ja raskesti ligipääsetavate ühenduste, näiteks hoonete tarinditel olevate paigaldiste puhul.Tootelehed peavad olema esitatud andmed kõikide erinevate PV paneelide ja inverterite kohta. [32]

4.2.2. Mõõtevahendid

Tenmars TM-750 kiirgusmõõtur otsese päikeselt lähtuva normaalkiirguse mõõtmiseks. Mõõtevahemik 0 – 4000 W/m² [29]. Selle seadmega saab enne mõõtmiste alustamist hinnata kas päikesekiirguse intensiivsus on ligilähedane standartsetele katsetustingimustele STC (*standard test conditions*) [40], mille juures on tootja andnud PV paneeli nimiandmed.

HoldPeak HP-870N multimeeter millega saab kontrollida ampermeetri režiimis ahelas olevaid voolusid [41]. Käesolevas töös kasutatakse ohutuse tagamise kontrollis.

Metrel EurotestPV MI 3108 kompleksne PV süsteemide ja elektripaigaldiste mõõteseade. Võimaldab ühe seadmega viia läbi kõik esimese kategooria testid ja lisaks ka teise kategooria testidest mooduljada võimsuskõvera (voolu-pinge) mõõtmise. Mõeldud mõõtmiste tegemiseks ahelates kus pinge ei ületa 1000 V, 15 A DC. [42]

Mõõtevahendid peavad olema õigete sertifitseerimisasutuste poolt kontrollitud, et tagada mõõtmiste kvaliteet.

4.3. Mõõtmiste läbiviimine

Mõõtmisi läbi viies tuleb järgida ohutusnõudeid ja kasutada sobilikke isikukaitsevahendeid. Eriti oluline on meeles pidada, et PEJ alalisvoolupoole mõõtmised on pingelähedane töö. Päikesepaneelide ja nende ühenduskooste osad võivad peale välja lülitamist jääda pinge alla ja pinge väärtused võivad olla kuni 1000 DC, mõnel juhul isegi 1500 DC. Ohutuks tööks tuleb õiges järjekorras läbida järgmised punktid:

1. Kasuta objektil vastavat ilmastikule kaitseriietust ja isikukaitsevahendeid.
2. Elektripaigaldise visuaalne kontroll ja vastavus dokumentatsioonile. Tähistused!
3. Kaitselahutuslülitite asukohad, võimalused elektripaigaldise turvaliseks lahutamiseks.
4. Kaitse- ja talitlusmaanduste korrasolek ja kontroll.
5. Kontrollitava vaheldi lahutamine alalis- kui ka vahelduvvoolupoolelt. Esmalt DC-lüliti(d), seejärel AC-lüliti(d).
6. Pingetuse kontroll (AC-osa).
7. DC-osa koormusvoolu puudumise kontroll.
8. Mõõtevahendi ettevalmistamine mõõtmisteks, juhtmete, pistikute kontroll, välisandurite paigaldamine (test PV-paneel, temp. andur).
9. DC-osa juhtide inverteri lahutamine.
10. Mõõtmiste läbiviimine vastavalt graafikule ja dokumenteerimine.
11. DC-osa juhtide vaheldiga taasühendamine vastavalt skeemile.
12. Kaitselülitite tagasilülitamine. Esmalt AC-lüliti(d), seejärel DC-lüliti(d).
13. Inverteri toimimise kontroll
14. Mõõtetulemuste vormistamine ja kinnitamine, vastavalt nõutele.

Tegevuste õige järjekorra järgimine on ohutuse seisukohast ülioluline. Korralik tööeetika ja ohutustehnika järgimine maandab riskid.

4.4. Mõõtmiste käik

Mõõtmised viidi läbi Võru linna läheduses Väimela päikesepargis 12. aprillil 2022 aastal. Park on ehitatud 2017 aastal kommerts ehk energiamüügi eesmärgil ja lepingu järgi on võrku antav maksimaalne võimsus 360kW. Pargis on üle tuhande ühepoolse päikesepaneel, need on suunaga lõunasse ja maapinna suhtes 37 ° nurga all. Mõõtmised toimusid ühe 10kW

võimsusega ABB inverteri ahelas olevatel paneelidel, kus inverterile on ühendatud kaks mooduljada kummaski 17 PV paneeli, igaüks võimsusega 335W. Paneelide tehnilised andmed on toodud joonisel 26. Ühenduskaste pole skeemis kasutatud.

Joonis 11. PV paneelid tehnilised andmed.

Enne lülimistoimingute ja mõõtmistega alustamist peab esimese asjana mõõtma päikeselt lähtuvat normaalkiirgust. See on vajalik hindamaks kas tingimused on ligilähedased standardsetele katsetustingimustele, millede juures on päikesepaneelid katsetatud ning mõõtetulemused on analüüsiks kasutatavad.

Standardsed katsetustingimused (STC) on on rahvusvaheliselt kokkulepitud tingimused, mille alusel mõõdetakse ja võrreldakse päikesepaneelide elektrilisi omadusi.

STC määrab kindlaks järgmised tingimused [40]:

1. Päikesekiirguse intensiivsus 1000 W/m² vastab päikesevalguse intensiivsusele keskpäeval selge ilma korral.
2. Päikesepaneeli elemendi temperatuur 25 °C, mõõdetakse päikesepaneeli sees asuvate elementide, mitte ümbritseva õhu temperatuuri.
3. Õhumass indeks *AM* (*Air Mass*) 1.5 tähistab päikesevalguse spektraalset koostist, kui päike on 41,81 ° kõrgusel horisondi kohal (keskmine tingimus mõõdukas kliimas).

Normaalkiirgust mõõdeti Tenmars TM-750 kiirgusmõõturiga (joonis 27), tulemus oli 1085 W/m² mis on piisav, et saada adekvaatsed mõõtmistulemused.

Joonis 12. Päikese normaalkiirgus mõõdetuna Tenmars TM-750 kiirgusmõõturiga.

Peale normaalkiirguse mõõtmist on vaja veenduda, et ollakse õige inverteri (joonis 28) juures, sest mõnes pargis võib invertereid olla kümnetes.

Joonis 13. ABB inverter ABB PVI-10.0-TL-OUTD-S mille juures mõõtmised toimusid.

Kontrollida kas kõik vahelduv- ja alalisvoolu ahelad on õigesti märgistatud, paigaldis vastab dokumentatsioonile, kaitse- ja talitlusmaandus on korras. Seejärel tuleb inverter kaitselahutada vahelduv- ja seejärel alalisvoolu poolelt (joonis 29).

Joonis 14. Inverteri alalisvoolu kaitselahutuslüliti on välja lülitatud.

Veendutakse AC poole pingetuses, DC poole peal kontrollitakse kõikidel mooduljadade inverteri sisendjuhtmetel ampertangidega koormusvoolude puudumist (joonis 30).

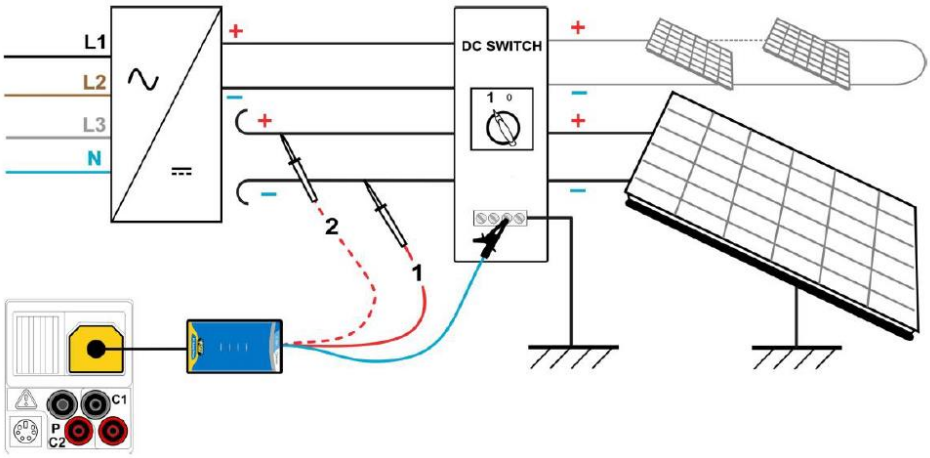
Joonis 15. Koormusvoolude mõõtmine DC poolel.

Koormuse olemasolu korral on pistikute lahutamisel reaalne oht kaarleegi tekkimiseks ja elektrilöögi saamiseks.

4.4.1. Isolatsioonitakistuse mõõtmine

Kõigepealt mõõdetakse ära DC ahelate ja PV paneelide isolatsioonitakistus (R_{OC}), et vältida lühiühenduse tekkimist pingestatud osade, pingealdiste osade ja maa potentsiaali vahel. Ühendused tehakse vastavalt mõõteseadme kasutusjuhendile (joonis 31) ja kasutatakse standardis EVS_EN_62446_1;2016 punktis 6.7.3.2 toodud tabeli 2 infole. Testpinge (U_M) on 1000 V ja minimaalne takistus on vähemalt 1 MΩ [42, 32]. Mõõdetakse eraldi

mooduljada “+” ja “-” ahelat ja saadakse vastavad isolatsioonitakistuse väärtused R_{OC+} (“+”) ja R_{OC-} (“-”)



Joonis 16. Isolatsioonitakistuse mõõtmise ühendusskeem [42].

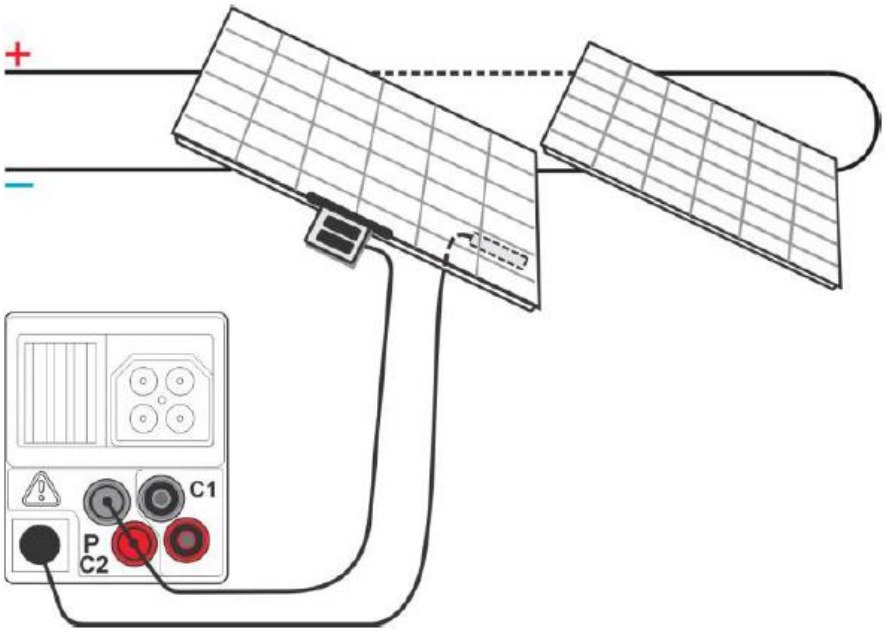
Kõik mõõtetulemused salvestatakse mõõteseadme sisemällu hilisema väljaprindi tarvis.

4.4.2. Keskkonnatingimuste mõõtmine

Järgnevalt tuleb paigaldada kontroll PV paneel (joonis 32) ja väline temperatuuriandur (joonis 33) ning ühendada need mõõteseadme manuaalis oleva skeemi (joonis 34) kohaselt [42].

Joonis 17. Mõõteseadme kontrollpaneel.

Joonis 18. Mõõteseadme väline temperatuuriandur.



Joonis 19. Temperatuurianduri ja PV kontrollpaneeli ühendamine [42].

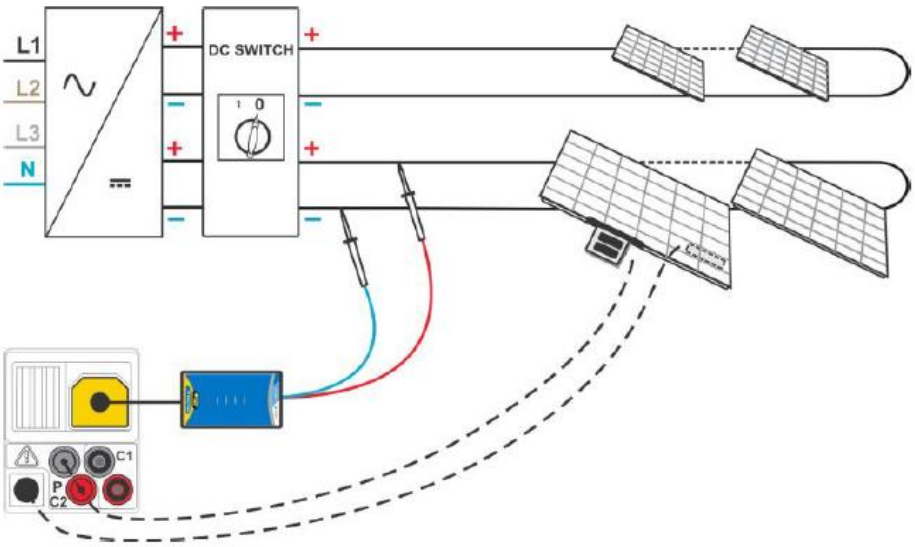
Mõõdetakse välised keskkonnatingimused, PV paneeli elemendi temperatuur (T_{CELL}) ja päikesekiirgus (I_{RR}) (joonis 35).

Joonis 20. Keskkonnatingimuste mõõtmine.

Keskkonnatingimuste mõõtmine on vajalik standardsete katsetustingimuste arvutamiseks ja kontrollimaks, et tingimused on sobilikud PEJ-s katsete läbiviimiseks.

4.4.3. Mooduljada tühijooksupinge ja lühisvoolu mõõtmine

Mooduljada DC ahela juhtmed ühendatakse vastavalt seadme manuaali skeemile (joonis 36) [42]



Joonis 21. Ühendusskeem mooduljada tühijooksupinge ja lühisvoolu mõõtmiseks [42].

Mõõtmiste käigus saadud U_{OC} ja I_{SC} kõrvutatakse standardsetel tingimustel arvutatud pinge ja vooluga. Selle testiga kontrollitakse kas DC ahelate kaitseseadmed täidavad oma ülesannet, inverteri sisendkanalid on võrdselt koormatud ja moodulid on omavahel korrektselt ühendatud. On oluline veenduda, et mooduljadade pinged oleksid ligilähedased. Mõõtmisi peaks viidama läbi stabiilsetes keskkonnatingimustes mil päikesekiirguse intensiivsus peaks olema vähemalt 100 W/m², vastasel juhul võivad tulemused olla moonutatud.

4.4.4. Voolu-pinge kõvera mõõtmine

Voolu-pinge kõver ehk võimsuskõver on kompleksne katse, mis on mõeldud süsteemi jõudluse katsetamiseks ja näitab kas PV paneelid toimivad korrektselt indikeerides ka tehnilisi probleeme, mis võivad paneelidel olla. Tegemist on teise kategooria testiga mida võib kasutada alternatiivina mooduljada tühijooksupinge ja lühisvoolu mõõtmiseks ning ühendusskeemid (joonis 36) on neil samad. Selles katses leitakse lisaks eelpool nimetatud suurustele ka pinge maksimaalsel võimsusel (U_{mpp}), vool maksimaalsel võimsusel (I_{mpp}) ja maksimaalne võimsus ($P_{mpp)}$.

Kuna võimsusnäitajad on otseses seoses päikesekiirguse ja temperatuuriga on oluline, et mõõtmine viidaks läbi stabiilsetes keskkonnatingimustes mil päikesekiirguse intensiivsus peaks olema vähemalt 400 W/m². Võimsuskõver võib anda olulist informatsiooni mooduljada defektide kohta:

- Kahjustunud elemendid või moodulid
- Lühis tõkkedioodis
- Osaline varjutus
- Moodulite sobimatus
- Paralleeltakistus elemendis, moodulis või jadas
- Liiga suur takistus

Kõrvutades mõõdetud ja prognoositavat võimsuskõvera graafikut saab teatud erinevuste puhul diagnoosida eelpool toodud defekte. [32]

4.4.5. Infrapuna vaatlus

Infrapuna (IR-kaameraga) kontrolli eesmärk on tuvastada tavapärasest erinevaid temperatuurimuutusi töötavates PV-moodulites. Sellised temperatuurimuutused võivad viidata probleemidele moodulites ja/või paneelisektsioonides, näiteks vastupolarisatsioon, tõkkedioodi rike, joodisühenduste rikked, halvad ühendused ja muud olukorrad, mis põhjustavad lokaalselt kõrgemat paneeli pinnatemperatuuri. Vaatluse ajal võiks päikesekiirgus olla ühtlane ja üle 600 W/m², et temperatuurierinevused tuleks esile. Infrapunavaatlus on teise kategooriasse kuuluv test. Lisaks sellele, et IR-kontroll võib olla osa algsest või perioodilisest kontrolliprotsessist, saab seda kasutada ka rikkeotsinguks juhul, kui moodulis, jadas või sektsioonis kahtlustatakse probleeme. [32]

Vaatlus viidi läbi drooniga DJI Mavic 3 mis oli varustatud tavalise- ja infrapunakaameraga.

5. MÕÕTETULEMUSED JA NENDE ANALÜÜS

Katsemõõtmiste tulemuste mõõteseadmest Metrel EurotestPV MI 3108. Mõõtetulemuste vormistamiseks on kasutatud standardis EVS-EN 62446-1:2016 olevat blanketti mis on välja toodud Lisas 2.

5.1. Isolatsioonitakistus

Mooduljada avatud ahela pinge on antud koostel üle 500 V seega on ette nähtud testpinge 1000 V. Standardile vastav minimaalne isolatsioonitakistus on 1 MΩ.

Tabel 1. Isolatsioonitakistuse mõõtetulemused

	Mooduljada 1	**Mooduljada 2**
Plussahela takistus R_{OC+}, MΩ	298	642
Miinusahela takistus R_{OC}, MΩ	654	624
Mõõtepinge U_M, V	1050	1050

Mõõdetud ahelate takistused on 298 MΩ, 654, MΩ, 624 MΩ ja 642 MΩ. Esimese mooduljada plussahela takistus 298 MΩ on võrreldes teiste ahelatega peaaegu kaks korda madalam kuid kõik tulemused on üle 1 MΩ, seega vastavad kõikide ahelate takistused normile. Madalam takistus võib tuleneda vigastatud kaabli isolatsioonist vms.

5.2. Keskkonnatingimuste mõõtmine

Keskkonnatingimused on vajalikud eelkõige selleks, et standardsetel tingimustel arvutatud tulemused saaks kõrvutada tegelike mõõtmistulemustega.

Tabel 2. Keskkonnatingimuste mõõtetulemused

	Mooduljada 1	**Mooduljada 2**
Päikesekiirgus I_{RR}, W/m²	971	963
PV elemendi temperatuur T_{CELL}, °C	35,0	36,7

Mõlema mooduljada mõõtmiste käigus saadud päikesekiirguse hulk 971 W/m² ja 963 W/m², tulemused viitavad stabiilsetele tingimustele, mis teeb analüüsi lihtsamaks. Võrreldavate tulemuste saamiseks peaks päikesekiirgus olema vähemalt 100 W/m² ja selle ületavad saadud tulemused kindlalt [32]. Kiirguse tase on samas suurusjärgus ka Tenmars TM-750

käsiseadmega mõõdetule. Kui kiirguse tase oleks jäänud alla 100 W/m², siis võiks kaaluda kordusmõõtmiste tegemist paremates ilmastikutingimustes.

5.3. Mooduljada tühijooksupinge ja lühisvoolu mõõtmine

Pinget ja voolu mõõtes peab arvestama, et mooduljadas on paneelid ühendatud jadamisi.

Tabel 3. Tühijooksupinge ja lühisvoolu mõõtetulemused

	Mooduljada 1		**Mooduljada 2**	
	Mõõdetud	Arvutatud (STC)	Mõõdetud	Arvutatud (STC)
Tühijooksupinge U_{OC}. V	732	757	736	765
Lühisvool I_{SC}, A	9,21	9,45	9,17	9,48

Võttes arvesse, et mõlemas mooduljadas on kummaski 17 paneeli ja üksiku paneeli tühijooksupinge on 46,4 V ja lühisvool 9,29 A (joonis 4.2), saab tõdeda, et mõõtes saadi sarnased tühijooksupinged ja lühisvoolud. Mõõtmised näitasid, et mõõteseade registreeris oodatavad tulemused jäädes lubatud 5% erinevuse piiridesse [32]. Tulemused näitavad, et mooduljadades olevad paneelid on omavahel korrektselt ühendatud ja jadas on optimaalne arv paneele. Samuti on mooduljadade samad näitaja suhteliselt võrdsed viidates võrdsetele koostetele, mõlemas jadas on võrdne arv võrdsete tehniliste näitajatega PV paneele. Suuremate paigaldiste puhul on sagedased juhused, et on tehtud ebakorrektseid ühendusi, paneelide töös esineb tõrkeid ja jaam ei funktsioneeri optimaalselt.

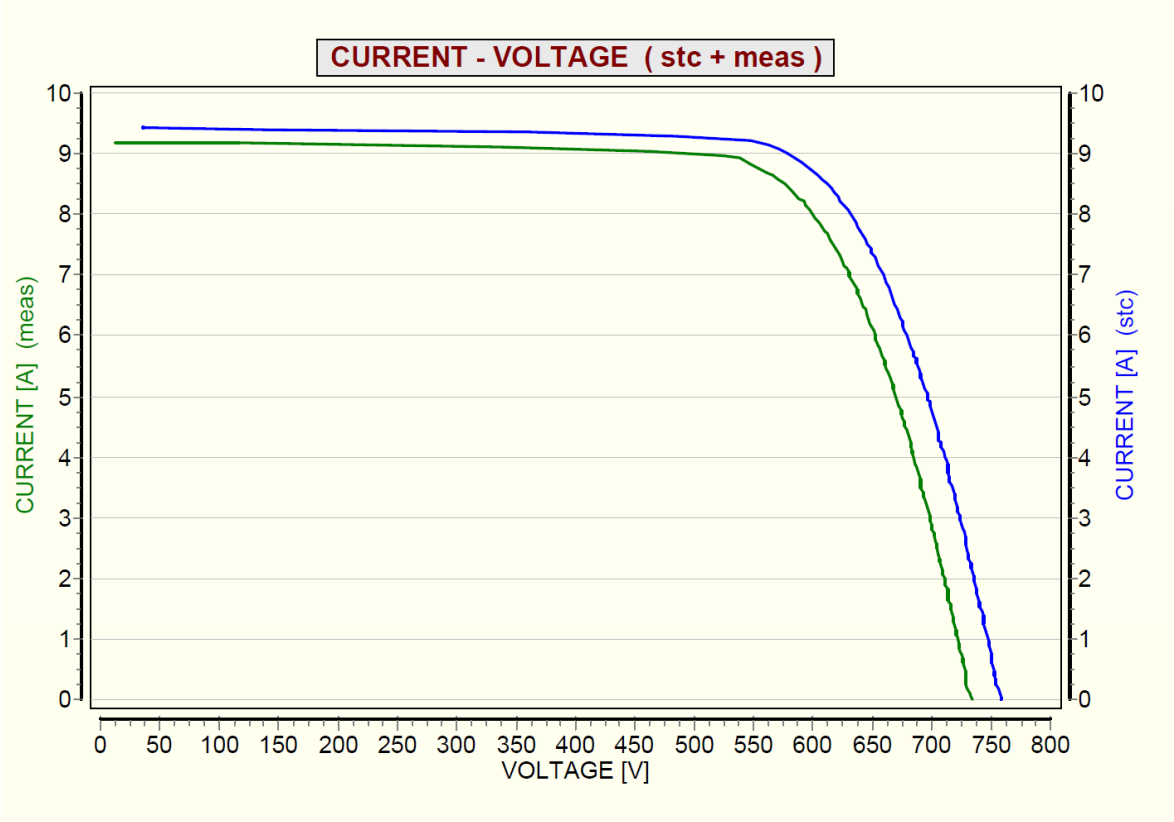
5.4. Voolu-pinge kõvera mõõtmine

Voolu-pinge kõvera ehk võimsuskõvera mõõtmine väljastab lisaks jadade tühijooksupinge ja lühisvoolu väärtustele ka jadade võimsuslikud näitajad andes aimu paneelide seisukorra kohta.

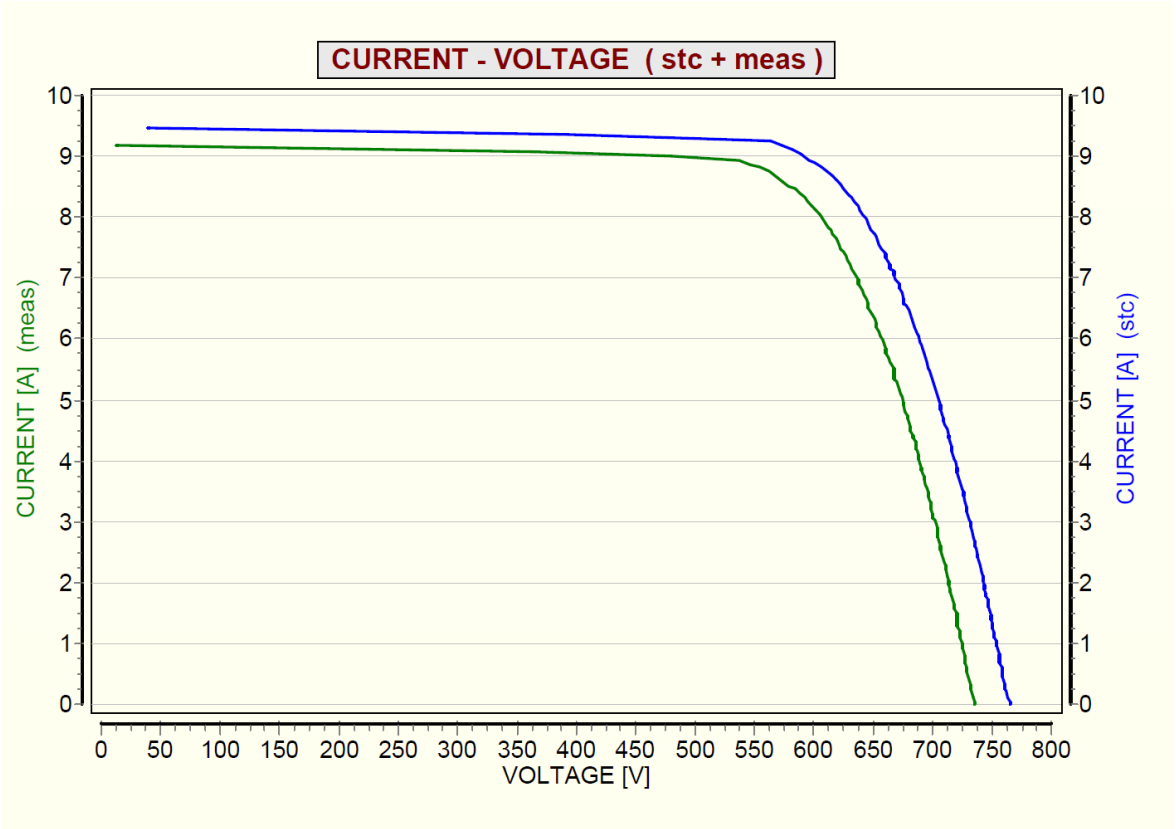
Tabel 4. Voolu-pinge kõvera mõõtmistulemused

	Mooduljada 1		**Mooduljada 2**	
	Mõõdetud	Arvutatud (STC)	Mõõdetud	Arvutatud (STC)
Tühijooksupinge U_{OC}, V	733	758	736	765
Lühisvool I_{SC}, A	9,20	9,44	9,17	9,48
Pinge maksimaalsel võimsusel U_{mpp}, V	576	600	58	611
Vool maksimaalsel võimsusel I_{mpp}, A	8,50	8,73	8,46	8,74
Maksimaalne võimsus P_{mpp}, kW	4,90	5,23	4,94	5,34

Võimsuskõvera mõõtmiste põhjal väljastab mõõteseade kummagi mooduljada kohta võimsusgraafiku (joonis 37 ja 38) milledel olevaid "mõõdetud kõverat" saab võrrelda "arvutatud kõveraga".

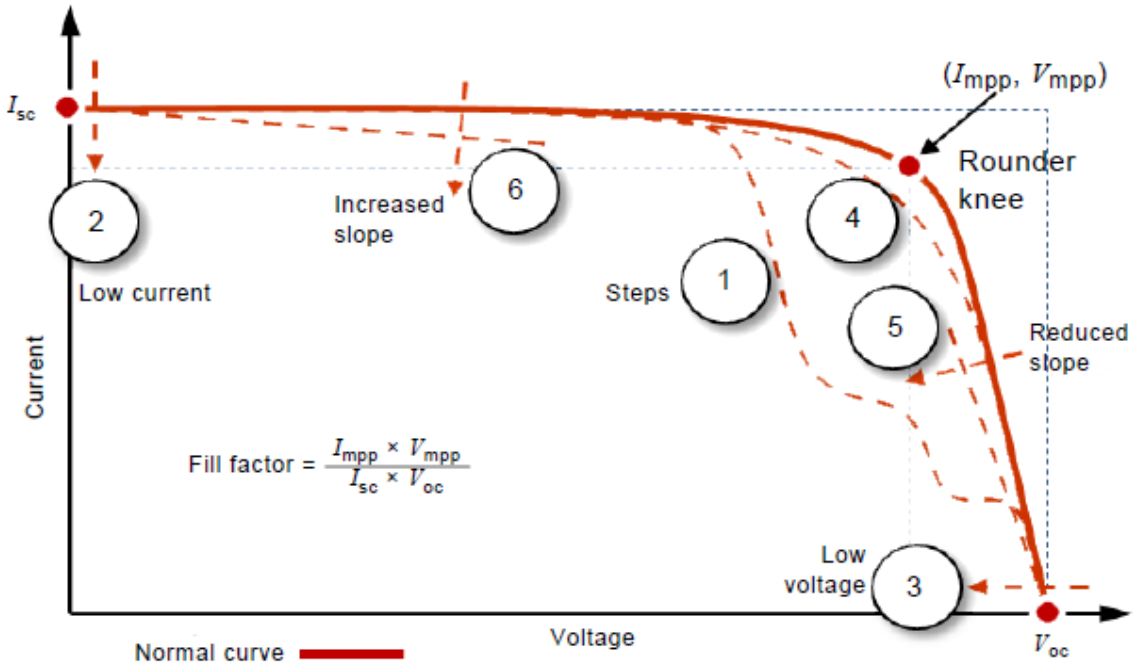


Joonis 22. Esimese mooduljada voolu-pinge kõvera graafik.



Joonis 23. Teise mooduljada voolu-pinge kõvera graafik.

Mida paremini mõõdetud võimsuskõver arvutuslikku võimsuskõverat järgib seda ligilähedasemad on paneeli tegelikud tehnilised näitajad tootja poolt deklareeritud näitajatele. Mõlema mooduljada puhul on näha, nii numbrilistest tulemustest kui ka graafikut uurides, et mõõtmised vastavad ootustele. Graafikult on võimalik välja lugeda olulised punktid U_{mpp}, I_{mpp} visualiseerida nende põhjal puutepunkti ja arvutada ka maksimaalse võimsuse. Standardis EVS-EN 62446-1:2016 on välja toodud ka joonis (joonis 39) ja juhised probleemsete moodulite graafikute lugemiseks [32].



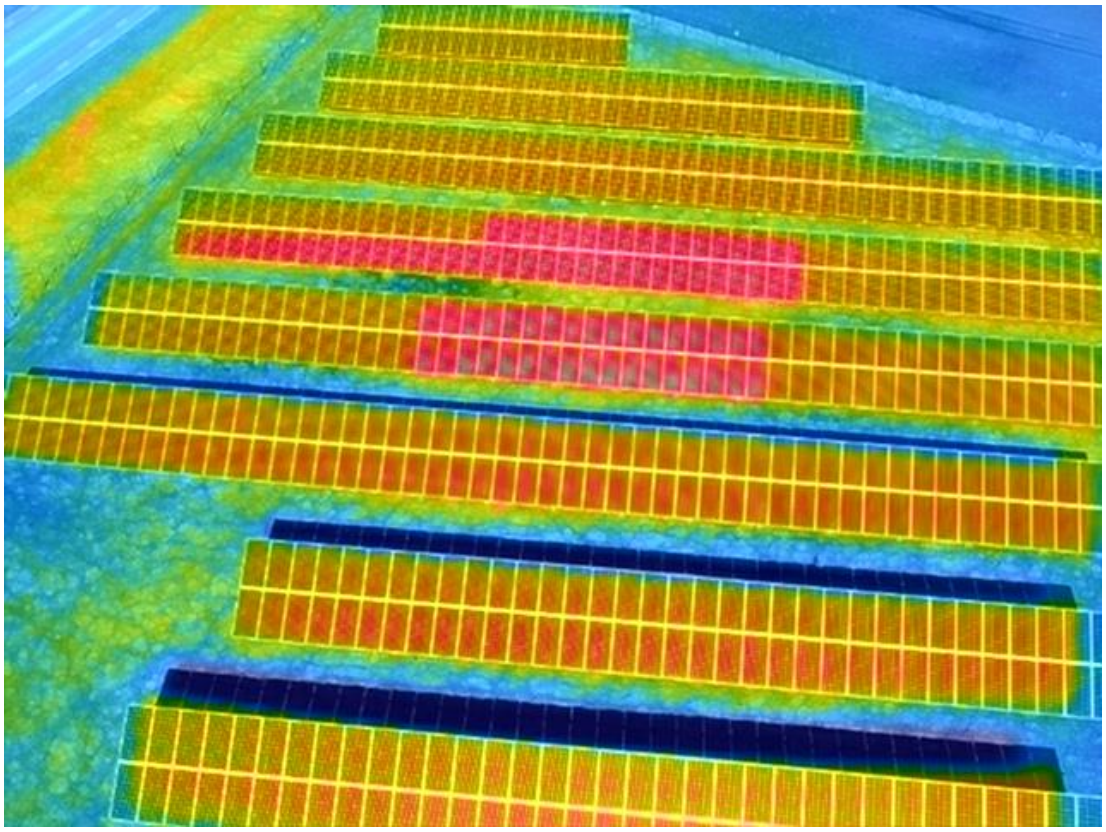
Joonis 24. Võimsuskõvera graafiku lugemise näidisjoonis [32].

Sooritatud mõõtmiste käigus ühtegi probleemi ei ilmnenud ja siit võib järeldada, et antud inverteri ahelad on tehniliselt korras ja töötavad probleemideta.

5.5. Infrapuna vaatlus

Vaatluse ajal tehti kaks fotot. Üks neist tavakaameraga (joonis 40) ja teine infrapunakaameraga (joonis 41). Vaatluses keskenduti ülevalt esimesele paneelireale. Sellel real sooritati ka kõik teised mõõtmised.

Joonis 25. Tavalise kaameraga tehtud pilt päikeseelektrijaamast.



Joonis 26. Infrapunakaameraga tehtud pilt päikeseelektrijaamast.

Tavarežiimis pildilt nähtub, et PV paneelid paistavad ühesugused ja ei paista anomaaliaid esinevat. Infrapunakaameraga tehtud pildil on aga näha, et ülevalt neljanda ja viienda rea keskosas on osad paneelid tunduvalt punasemad. See viitab nende kõrgemale pinnatemperatuurile. Selliste erinevuste välja tulemine annab võimaluse täpsemalt lokaliseerida probleemsed moodulid ja hakata tegelema põhjuste välja selgitamisega. Kõige esimesel real kus viidi läbi mõõtmised ei tuvastatud temperatuurilisi erinevusi mis viitaks probleemidele koostes, mida kinnitavad ka eelnenud mõõtmised. Mooduljadade kontrollmõõtmiste seisukohalt ei olnud infrapuna vaatlus vajalik, see sooritati näitlikustamise eesmärgil.

KOKKUVÕTE

Päikeseelektrijaamad on tänapäeval energiavarustuse tagamisel olulised komponendid, mis võimaldavad vähendada süsihappegaasi emissiooni atmosfääri. Nende üha laialdasem kasutuselevõtt tingib vajaduse mõelda ka inim- ja seadmeohutusele. Samuti on oluline tagada jaamade probleemideta ja pikaaegne ekspluatatsioon. Meetod ohutuse ja toimivuse tagamiseks on piisavate kontrollmõõtmiste läbiviimine.

Lõputöö uurimuslik eesmärk oli tutvustada päikeseenergia rakendamise hetkeseisu globaalselt ja tutvustada tehnoloogiaid kiirgusenergia muundamiseks elektrienergiaks.

Töö praktiline eesmärk oli päikeseelektrijaama kontrollimiseks mõeldud alalisvoolu osa mõõtmiste tutvustamine, reaalsetele mõõtetoimingute tegemine ja saadud tulemuste analüüs. Kontrollmõõtmiste läbiviimiseks on Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus ja Tarbijakaitse ja Tehnilise Järelvalve Amet välja andnud suunised kuidas mõõtmisi läbi viia ja mis tingimustele tulemused vastama peaksid. Kontrollmõõtmised on efektiivne viis kontrollimaks paigaldise vastavust projektile ja selle optimaalset toimimist.

Elektrijaamas viidi läbi rida katseid, mis aitavad hinnata valitsevaid keskkonnatingimusi, paigaldise ohutust, ühenduste kvaliteeti, skeemi õigsust, paneelide tootlikkust ja diagnoosida valeühendusi või rikkeid. Kuna päikesekiirguse intensiivsus mõjutab otseselt mõõtmistulemusi on oluline jälgida, et kiirgustase oleks piisav ja mõõtmiste vältel ühtlane.

Katsetest selgus, et päikeseelektrijaama vaatluse all olev osa on ehitatud vastavalt projektile järgides etteantud nõudeid. Juhtide ja paneelide isolatsioonitakistused vastavad standardis toodud miinimumnõuetele. PV paneelide välja antav pinge ja vool on lähedane tootja poolt deklareeritud suurustele, erinevused jäävad 5% sisse. Võimsuskõvera graafikud sedastavad, et paneelid ei ole oma seitsme aastase töötamise jooksul oluliselt degradeerunud ehk väljundvõimsust kaotanud. Samuti pole paneelidel tekkinud kõrgema temperatuuriga laike, mis võivad viidata paneelielementide riketele või mehhaanilistele kahjustustele. Infrapunavaatluse käigus tuli jaama teistes osades välja potenstiaalsed probleemid mida jaama haldaja võiks lähemalt uurima hakata. Sooritatud mõõtmised võiksid nende probleemide juurpõhjuste kohta rohkem infot anda ja aidata neid lahendada. Kokkuvõtvalt võib konstateerida fakti, et mingis mahus perioodilised sooritatud kontrollmõõtmised

aitavad avastada ilmnenud probleeme ja nende operatiivne lahendamine aitab tagada elektrijaama toimepidevuse.

ALLIKALOEND

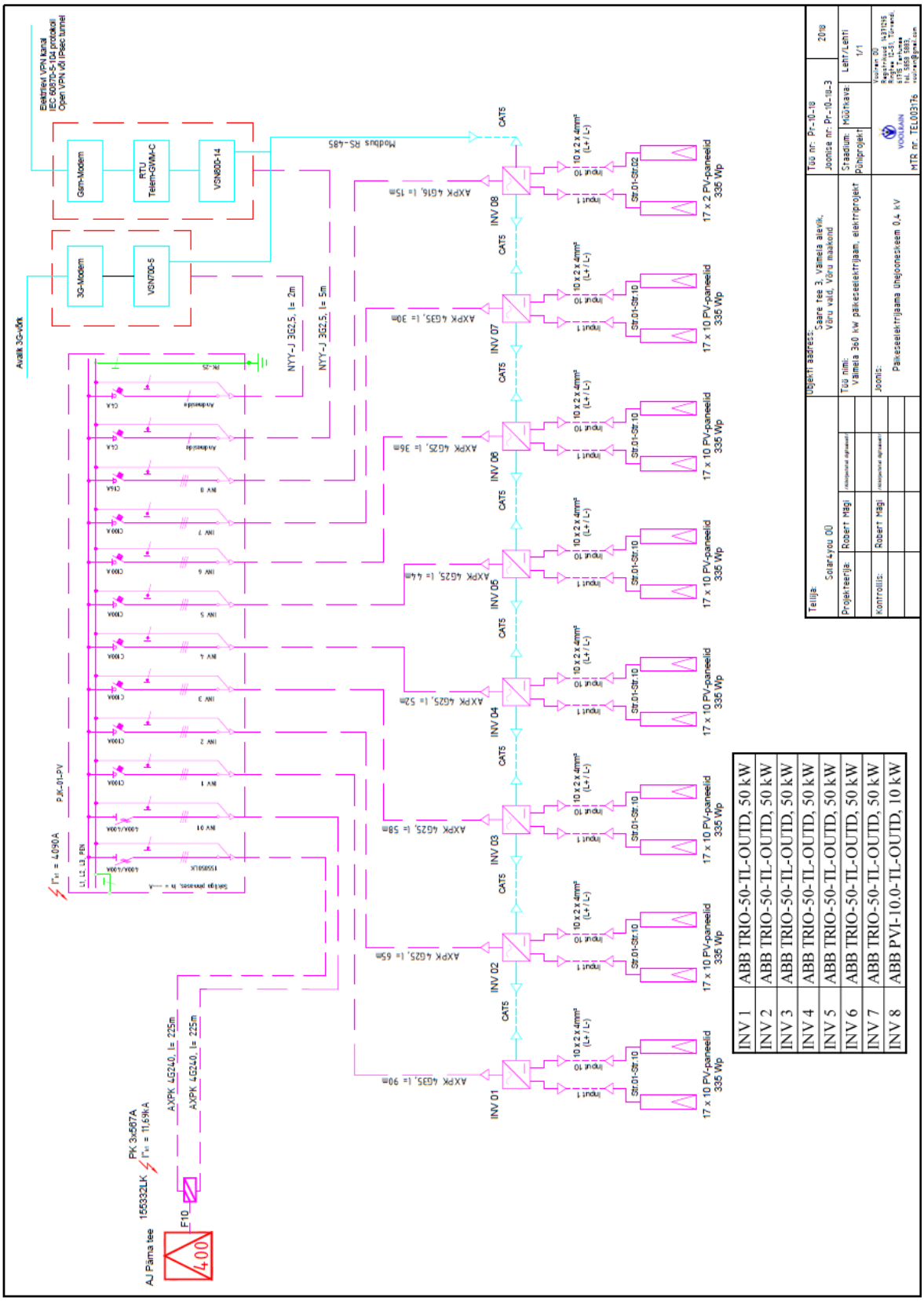
1. Pariisi kliimakokkulepe (21.05.2025). Euroopa Ülemkogu, Euroopa Liidu Nõukogu [veebileht]. https://www.consilium.europa.eu/et/policies/climate-change/paris-agreement/ (07.04.2025).
2. ÜRO kliimamuutuste konverents (COP27), kliimapoliitika rakendamise tippkohtumine, Egiptus, Sharm el Sheikh, 7.–8. november 2022 (09.01.2025), Euroopa Ülemkogu, Euroopa Liidu Nõukogu [veebileht]. https://www.consilium.europa.eu/et/meetings/international-summit/2022/11/07-08/ (12.04.2025).
3. Eesti ÜRO kliimakonverentsil COP29 Bakuus (25.11.2024). Kliimaministeerium [veebileht]. https://kliimaministeerium.ee/cop29?utm_source=chatgpt.com [15.04.2025].
4. Taastuvenergia (03.2024). Teabelehed Euroopa Liidu kohta, Euroopa Parlament [veebileht]. https://www.europarl.europa.eu/factsheets/et/sheet/70/taastuvenergia?utm_source=chatgpt.com (06.05.2025).
5. 6.1 Euroopa Liidu kliima- ja energiaeesmärgid [*s. a.*). Elering [veebileht]. https://elering.ee/book/export/html/1206?utm_source=chatgpt.com (06.05.2025).
6. Taastuvenergia (28.02.2022). Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium [veebileht]. https://www.mkm.ee/energeetika-ja-maavarad/taastuvenergia/taastuvenergia (06.05.2025).
7. Share of renewable energy in gross final energy consumption by sector (Last update 08.03.2025). – *Eurostat*. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/SDG_07_40__custom_6228571/default/table?lang=en (06.05.2025).
8. Taastuvelektris suureneb jõudsalt päikeseenergia osakaal (25.01.2023). Elering (veebileht). https://elering.ee/taastuvelektris-suureneb-joudsalt-paikeseenergia-osakaal (06.05.2025).
9. Taastuvelektri toodang kattis esimeses kvartalis enam kui kolmandiku kogutarbimisest (05.005.2025). Elering (veebileht). https://elering.ee/artikkel/taastuvelektri-toodang-kattis-esimeses-kvartalis-enam-kui-kolmandiku-kogutarbimisest (06.05.2025).
10. European Electricity Review 2025 (23.01.2025). Ember Energy [veebileht]. https://ember-energy.org/latest-insights/european-electricity-review-2025/#executive-summary (07.02.2025).
11. Direct normal irradiation (*s. a.*) Global Solar Atlas [veebileht]. https://globalsolaratlas.info/download/world (07.05.2025).
12. **Perälä, R.** (2018) Päikeseelekter. Tallinn: Ehitame Kirjastus. 150 lk.
13. Toodang ja prognoos (03.06.2025) Elering [veebileht]. https://www.elering.ee/toodang-ja-prognoos (08.05.2025).
14. Eesti Taastuvenergia Koja aastaraamat 2023 (2024). Eesti Taastuvenergia Koda [veebileht]. https://www.taastuvenergeetika.ee/taastuvenergia-aastaraamat-2023/ (08.05.2025).
15. Elektritootja liitumine (*s. a.*) Elektrilevi (veebileht). https://elektrilevi.ee/et/liitumised/elektritootja-liitumine/mikrotootja (08.05.2025).
16. Global Electricity Review 2025 (08.04.2025). Ember Energy [veebileht]. https://ember-energy.org/latest-insights/global-electricity-review-2025 (08.05.2025).
17. Snapshot of Global PV Markets 2025 (april 2025). International Energy Agency [veebileht] https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2025/04/Snapshot-of-Global-PV-Markets_2025.pdf?utm_source=chatgpt.com (08.05.2025).
18. Solar explained. Solar thermal power plants (16.04.2024). U.S. Energy Information Administration [veebileht] https://www.eia.gov/energyexplained/solar/solar-thermal-power-plants.php (08.05.2025).
19. Largest solar thermal power stations (CSP) list (*s. a.*). List Solar [veebileht] https://list.solar/plants/largest-plants/csp/ (08.05.2025).
20. Solar explained. Photovoltaics and electricity (24.05.2024). [veebileht] https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php (09.05.2025).

21. Largest PV power plants list (october 2024). List Solar [veebileht] https://list.solar/plants/largest-plants/largest-pv-plants/ (09.05.2025).
22. Global Solar Power Tracker (02.2025) Global Energu Monitor [veebileht] https://globalenergymonitor.org/projects/global-solar-power-tracker/ (09.05.2025).
23. Valmis projektid ja tulevikuplaanid (*s. a.*) Evecon [veebileht]. https://evecon.ee/projektid-ja-tulevikuplaanid/ (09.05.2025).
24. Meie energiapargid (03.06.2025). Sunly [veebileht] https://sunly.ee/meie-projektid (06.06.2025).
25. Hispaania-Portugali elektrikatkestused: kuidas tekkis täiuslik torm ja kas sellest on midagi õppida? (07.05.2025). Elektriala [veebileht]. https://elektriala.ee/hispaania-portugali-elektrikatkestused-kuidas-tekkis-taiuslik-torm-ja-kas-sellest-on-midagi-oppida/ (09.05.2025).
26. Eesti Energia avas Auveres Eesti suurima akusalvesti (26.03.2025). Enefit[veebileht] https://www.enefit.ee/et/-/uudised/eesti-energia-avas-auveres-eesti-suurima-akusalvesti?utm_source=chatgpt.com (10.05.2025).
27. Kiisal algasid Mandri-Euroopa suurima akupargi ehitustööd (21.06.2024) Postimees. Majandus [veebileht] https://majandus.postimees.ee/8045673/kiisal-algasid-mandri-euroopa-suurima-akupargi-ehitustood (10.05.2025).
28. Solar system types compared: Grid-tied, off-grid, and hybrid (01.2025). SolarReviews [veebileht]. https://www.solarreviews.com/blog/grid-tied-off-grid-and-hybrid-solar-systems (11.05.2025).
29. What Are The Different Types Of Solar Inverters? (19.11.2020). Green Ridge Solar [veebileht]. https://greenridgesolar.com/2020/11/types-of-solar-inverters/ (11.05.2025).
30. Why You Should Oversize Your PV Array For Your Inverter (19.09.2019). A Gigawatt Company Unbound Solar [veebileht]. https://unboundsolar.com/blog/oversizing-pv-arrays (11.05.2025).
31. EVS-HD 60364-6:2016+A11+A12 Madalpingelised elektripaigaldised. Osa 6: Kontrollitoimingud. Konsolideeritud tekst. Eesti Standardimis ja Akrediteerimiskeskus.
32. EVS-EN 62446-1:2016 Photovoltaic (PV) systems - Requirements for testing, documentation and maintenance - Part 1: Grid connected systems - Documentation, commissioning tests and inspection. Konsolideeritud tekst. Eesti Standardimis ja Akrediteerimiskeskus.
33. EVS-EN 61829:2016 Photovoltaic (PV) array - On-site measurement of current-voltage characteristics. Konsolideeritud tekst. Eesti Standardimis ja Akrediteerimiskeskus.
34. EVS-EN 50549-1:2019 Nõuded jaotusvõrkudega paralleelselt ühendatud tootmisüksustele. Osa 1: Ühendus madalpinge jaotusvõrguga. Tootmisüksused kuni tüübini B (kaasa arvatud). Konsolideeritud tekst. Eesti Standardimis ja Akrediteerimiskeskus.
35. EVS-EN 50549-2:2019 Nõuded jaotusvõrkudega paralleelselt ühendatud tootmisüksustele. Osa 2: Ühendus keskpinge jaotusvõrguga. Tootmisüksused kuni tüübini B (kaasa arvatud). Konsolideeritud tekst. Eesti Standardimis ja Akrediteerimiskeskus.
36. EVS-HD 60364-7-712:2016 Madalpingelised elektripaigaldised. Osa 7-712: Nõuded eripaigaldistele ja -paikadele. Fotoelektrilised süsteemid. Konsolideeritud tekst. Eesti Standardimis ja Akrediteerimiskeskus.
37. EVS 812-7:2018 Ehitiste tuleohutus. Osa 7: Ehitisele esitatavad tuleohutusnõuded. Konsolideeritud tekst. Eesti Standardimis ja Akrediteerimiskeskus.
38. Elektripaigaldised (*s. a.*). Tarbijakaitse ja Tehnilise Järelvalve Amet [veebileht] https://www.ttja.ee/ariklient/ohutus/paigaldised-ja-masinad/elektripaigaldised#elektripaigaldise-au 12/05/2025
39. TM-750 TENMARS (*s. a.*). TME Electronic Components [veebileht]. https://www.tme.eu/ee/details/tm-750/luksmeetrid/tenmars/ 12/05/2025
40. Standard Test Conditions (STC): definition and problems (*s. a.*). Sinovoltaics [veebileht]. https://sinovoltaics.com/learning-center/quality/standard-test-conditions-stc-definition-and-problems/ 12/05/2025

41. HP-870N Auto Range Multimetro Digital Clamp Meter Multimeter (*s. a.*). HoldPeak [veebileht]. https://holdpeak-store.com/hp-870n-auto-range-multimetro-digital-clamp-meter-multimeter/ 12/05/2025
42. MI 3108 EurotestPV (*s. a.*). Metrel [veebileht]. https://www.metrel.si/en/shop/EIS/photovoltaic-and-electrical-installation-testers/mi-3108.html 12/05/2025
43. ABB PVI-10.0-TL-OUTD-S (*s. a.*). [veebileht] Europe-Solarshop. http://www.europe-solarshop.com/documents/abb/pvi/PVI-10.0-12.5_BCD.00378_EN_RevE.pdf 12/05/2025 13.05.2025.
44. **Mägi, M.** (2018). Väimela 360 kW päikeseelektrijaam, elektriprojekt. Võru.

LISAD

Lisa 1. Väimela 360 kW päikeseelektrijaama elektriskeem [44]



Lisa 2. Mõõtetulemuste protokoll [32]

Annex C
(informative)

Model PV array test report

PV array test report	☐ Initial verification ☑ Periodic verification

Installation address	Reference
Väimela 360 kW päikesepark, Saare tee 3, Väimela alevik, Võru vald, Võrumaa	Date 12.04.2022
Description of work under test	Inspector R.Mägi
Alalisvoolupoole kontrollmõõtmised inverteri nr 08	Test instruments Metrel EurotestPV

String	String reference	1	2	3	4		*n*
	Module	RCM-335-6MA					
	Quantity	17	17				
Array parameters (as specified)	V_{oc} (stc)	789	789				
	I_{sc} (stc)	9,29	9,29				
String overcurrent protective device	Type	--	--				
	Rating (A)	--	--				
	DC rating (V)	--	--				
	Capacity (kA)	--	--				
String Wiring	Type	PV	PV				
	Phase (mm^2)	4	4				
	Earth (mm^2)	4	4				
String test	V_{oc} (V)	732	736				
	I_{sc} (A)	9,21	9,17				
	Irradiance	971	963				
Polarity check		✓	✓				
Array insulation resistance	Test voltage (V)	1050	1050				
	Pos – Earth (MΩ)	298	642				
	Neg – Earth (MΩ)	654	624				
Earth continuity (where fitted)		--	--				
Array isolator	Rating (A)	25	25				
	Rating (V)	1000	1000				
	Location	inverter	inverter				
	Functional check	✓	✓				
Inverter	Make and model	PVI-10.0-TL-OUTD					
	Serial number						
	Functioning OK	✓	✓				

Comments
Tulemused vastasid nõuetele kõikides kategooriates.

Lisa 3. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, _____Tanel_Mõttus_____,

(*autori nimi*)

sünniaeg 28.12.1985,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö

   _____Kontrollmõõtmised_päikeseelektrijaamas_____,

   (*lõputöö pealkiri*)

   mille juhendaja(d) on_____Andres_Annuk_ja_Robert_Mägi,_____,

   (*juhendaja(te) nimi*)

   salvestamiseks säilitamise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi EMU DSpace lisamiseks ja Creative Commonsi litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates lõputööd reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, üldsusele kättesaadavaks tegemiseks kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni;
2. olen teadlik, et lihtlitsentsiga antavad õigused jäävad alles ka mulle;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor Tanel Mõttus (allkirjastatud digitaalselt)

Tartu, kuupäev digitaalallkirjas

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Andres Annuk (allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digitaalallkirjas)
Robert Mägi (allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digitaalallkirjas)