TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

PÄIKESEELEKTRIJAAMA MÕJU HINDAMINE ELEKTRIVÕRGULE LAASTU TALU OÜ JAAMA NÄITEL

IMPACT ASSESSMENT OF PV STATION TO POWER GRID ON EXAMPLE OF LAASTU TALU OÜ STATION

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Hardi Puusepp

Üliõpilaskood: 176526AAVM

Juhendaja: Toomas Vinnal

Tallinn, 2019

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.

"....." ..... 201.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 201.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."..... 201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Hardi Puusepp *Lõputöö liik:* Magistritöö

Töö pealkiri: Päikeseelektrijaama mõju hindamine elektrivõrgule Laastu Talu OÜ jaama näitel

Kuupäev: 24.05.2019 75 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja: Toomas Vinnal

Sisu kirjeldus:

Sooviga vähendada taastumatute energiaallikate osakaalu energiatootmises, on järjest rohkem hakatud kasutusele võtma taastuvaid energiaallikaid. Üheks suure potentsiaaliga allikaks peetakse päikeseenergiat ja päikeseelektrijaamade osakaal suureneb iga aastaga.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on hinnata keskmise suurusega päikeseelektrijaama mõju elektrivõrgule. Mõju hindamiseks teostati mõõtmised Laastu Talu OÜ päikeseelektrijaamas, mille maksimaalne väljundvõimsus on 160 kW. Mõõtmised toimusid 2018. aasta septembris 3nädalase perioodi vältel ja lisaks teostati katselisi päikeseelektrijaama väljalülitusi 14. oktoobril 2018. aastal. Pikaajalisteks mõõtmisteks kasutati Fluke ja katseteks A-Eberle pingekvaliteedi mõõteseadmeid, mis kuuluvad Tallinna Tehnikaülikoolile.

Mõõtetulemustest vaadeldi lähemalt võrgupinge, harmoonilise kogumoonutuse ja asümmeetria sõltuvust päikeseelektrijaama väljundvõimsusest. Mõõdetud andmete põhjal joonestati graafikud ja saadud tulemusi analüüsiti. Analüüsis on võrreldud saadud mõõtetulemusi standardi järgi kehtestatud pinge kvaliteedi näitajatega.

Antud magistritöösse on lisatud graafikud mõõtetulemustest ja pilte päikeseelektrijaamast kohapealt, et lugejal oleks võimalik paremini visualiseerida ja aru saada tehtud tööst.

Märksõnad: päikeseelektrijaam, taastuvenergia, elektrivõrk, pingekvaliteet, hajatootmine

ABSTRACT

Author: Hardi Puusepp *Type of the work:* Master Thesis

Title: Impact assessment of PV station to power grid on example of Laastu Talu OÜ station

Date: 24.05.2019 75 pages

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor(s) of the thesis: Toomas Vinnal

Abstract:

With intention to reduce the use of non-recoverable energysources, the share of recoverable energysources has raised more and more. Solar power is believed to have great potensial and every year the amount of PV stations connected to power grid rises.

The aim of this master thesis is to evaluate the impact of medium size PV station to power grid. For the impact assessment, measurements were performed in Laastu Talu OÜ PV station, which maximum output power is 160 kW. Measurements took place in September of 2018 and lasted for 3 weeks. Additionaly some experimental separations were performed in 14th of October 2018. For the long-term measurements Fluke power quality logger was used and for the separation experiments A-Eberle power quality logger was used. Both loggers belong to Tallinn University of Technology.

Power grid voltage, total harmonic distortion and voltage unbalance were analysed more thoroughly. Collected data was turned into graphs and results were analysed. All the analysed data was compared to the standards.

The author of this master thesis have added graphs of measured data and also pictures from the PV station, so readers can visualize and understand done work better.

Keywords: PV station, recoverable energy, power grid, energyquality, distributed generation

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	**Päikeseelektrijaama mõju hindamine elektrivõrgule Laastu Talu OÜ jaama näitel**
Lõputöö teema inglise keeles:	**Impact assessment of PV station to power grid on example of Laastu Talu OÜ station**
Üliõpilane:	**Hardi Puusepp, 176526AAVM**
Eriala:	**Elektroenergeetika**
Lõputöö liik:	**magistritöö**
Lõputöö juhendaja:	**Toomas Vinnal**
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	**31.08.2019**
Lõputöö esitamise tähtaeg:	**24.05.2019**

_____	_____	_____
Üliõpilane (allkiri)	Juhendaja (allkiri)	Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Järk-järgult muutub päikeseenergiast elektri tootmise tehnoloogia tõhusamaks ja odavamaks. Tänu sellele ja ka riiklikule toetusele kasvab iga aastaga päikeseelektrijaamade liitumiste arv elektrivõrguga. Lisaks positiivsele mõjule, elektrienergia saamise näol, võib antud tehnoloogia omada ka negatiivset mõju elektrivõrgu toimimisele. Siiani on pigem uuritud mikrotootjaid, kelle tootmisseade on kuni 15 kW nimivõimsusega. Antud töös on võetud uurimise alla Laastu Talu OÜ päikeseelektrijaam, mille päikesepaneelide koguvõimsus on 177 kW ja inverterite koguvõimus 160 kW.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on analüüsida Laastu Talu OÜ päikeseelektrijaama mõju madalpinge elektrivõrgule antud piirkonnas.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Kas Laastu Talu OÜ jaama inverterid suurendavad pinge- ja vooluharmoonikute osakaalu antud madalpingevõrgus?

Kui palju on pinge kõikumist antud madalpingevõrgus?

Kas pinge kvaliteet on sõltuvuses päikeseelektrijaama tööst?

4. Lähteandmed

Suur osa andmeid pärineb ise läbi viidud mõõtmistest ja osa andmeid Elektrilevi OÜ poolt eelnevalt teostatud mõõtmisest.

5. Uurimismeetodid

Metoodika põhineb päikeseelektrijaamas toimunud pinge, voolu ja võimsuste mõõtmisel ja ka katsetel, kus täiskoormusel päikeseelektrijaam lülitatakse ootamatult välja. Tulemused esitatakse analüütilisel ja graafilisel kujul ning järeldustena.

6. Graafiline osa

Olulistemaks joonisteks on pinge parameetrite, voolude ja võimsuste graafikud antud elektrijaama mõju hindamiseks. Peamiselt on graafiline osa põhiosas.

7. Töö struktuur

1. Sissejuhatus
2. Teoreetiline alus, päikeseelektrijaama eeldatav mõju
3. Laastu Talu OÜ elektrijaama iseloomustus, skeem ja parameetrid
4. Mõõtetulemused ja analüüs
    - 4.1. Mõõteseadmed
    - 4.2. Teostus
    - 4.3. Tulemused ja analüüs
5. Kokkuvõte ja järeldused
6. Kasutatud kirjandus
7. Lisad

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Peamised allikad on päikeseelektrijaama mõjude teoreetilised uurimused ja seni ilmunud teemakohased artiklid.

EVS-EN 50160:2010 „Avalike elektrivõrkude pinge tunnussuurused“

M. S. ElNozahy, M.M.A. Salama „Technical Impacts of Grid-Connected Photovoltaic Systems on Electrical Networks“

9. Lõputöö konsultandid

Kaija Vill (Elektrilevi OÜ) – uurimisobjekti ja vajalike andmete otsimine

Tarmo Rähmonen (Elektrilevi OÜ) – varasemalt tehtud mõõtmistulemuste väljastamine

10. Töö etapid ja ajakava

Suvi 2018 – kokkulepete tegemine mõõtmisteks ja päikeseelektrijaamaga tutvumine.

Augusti lõpp kuni septembri lõpp 2018 – mõõtmiste teostamine ja katsed

Oktoober 2018 – andmete transportimine ja koondamine

Veebruar 2019 – teoreetilise alusmaterjali läbitöötamine

Märts 2019 – mõõtetulemuste analüüs

Aprill 2019 – kokkuvõtte tegemine ja vormistamine

1. mai 2019 – töö esimene versioon valmis ja juhendajale läbilugemiseks saatmine

10. mai 2019 – tagasiside esimese versiooni kohta

17. mai 2019 – töö teine versioon valmis

22. mai 2019 – töö lõplik versioon valmis

24. mai 2019 – töö esitamine

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE ... 3

ABSTRACT ... 4

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE ... 5

EESSÕNA ... 10

SISSEJUHATUS ... 11

1. TEOREETILINE ALUS ... 12

2. LAASTU TALU OÜ ELEKTRIJAAM ... 19

3. MÕÕTETULEMUSED JA ANALÜÜS ... 22

3.1 Mõõtmised ... 22

3.1.1 Pikemaajalised mõõtmised ... 22

3.1.2 Lühiajaline mõõtmine katsete ajal ... 23

3.2 Mõõtetulemused ... 24

3.2.1 Kogu mõõteperioodi koondtulemused ... 24

3.2.2 03.09.2018 mõõtetulemused ... 37

3.2.3 08.09.2018 mõõtetulemused ... 41

3.2.4 15.09.2018 mõõtetulemused ... 45

3.2.5 14.10.2018 katseliste lülitamiste mõõteandmed ... 49

KOKKUVÕTE ... 64

SUMMARY ... 67

KASUTATUD KIRJANDUS ... 70

LISAD ... 71

Lisa 1 Tiiuvälja alajaama skeem ... 71

Lisa 2 Kose-Kuivajõe 10 kV võrguskeem Harjumaa piirkonna jaotusvõrgu dispetšeritelt ... 72

Lisa 3 Laastu talu OÜ päikeseelektrijaama PJK koos Tiiuvälja 10/0,4 kV mastalajaamaga ... 73

Lisa 4 Laastu talu päikeseelektrijaamas asuv infoplakat 74

Lisa 5 Päikesepaneelide rida Laastu talu päikeseelektrijaamas 75

EESSÕNA

Käesoleva magistritöö ajendiks oli Toomas Vinnali poolt välja pakutud mõte uurida päikesepaneelide mõju pinge kvaliteedile Eesti madalpingevõrkudes. Siinkohal sooviks tänada Laastu Talu OÜ ning Mihkel Looritsat võimaluse eest teostada antud töö jaoks vajalikud mõõtmised oma päikeseelektrijaamas ja ka juhendajat asjakohaste juhiste ja kommentaaride eest. Töö teostamine oli autori jaoks alates mõõtmistest analüüsini väga huvitav. Aitäh H konstruktiivse ja väga asjakohase tagasiside ning G & J IT-abi eest. Kõige suurem aitäh kallile elukaaslasele motiveerimise ja toetamise eest tervel sel pikal teel.

Töö autor, Hardi Puusepp töötab Elektrilevi juhtimiskeskuses Tallinna jaotusvõrgu dispetšerina ja kontakteeruda saab emaili hardi.puusepp@gmail.com kaudu.

SISSEJUHATUS

Elektrienergia tootmiseks on ajalooliselt kasutatud palju fossiilseid kütuseid, mis on ammenduv ressurss ja keskkonda saastav. Enne, kui taastumatud loodusvarad otsa saavad, tuleb leida neile asendus taastuvate energiaallikate näol. Taastuvateks energiaallikateks on näiteks tuule-, hüdro-, biomassi-, jäätme- ja ka päikeseenergia.

Iga aastaga ühendatakse võrku üha rohkem päikeseelektrijaamasid, mis toodavad elektrienergiat õhku saastamata. Tänu päikesepaneelidele on kõigil võimalik lisaks tarbimisele ka ise üsna lihtsalt elektrit toota. Nii on võimalik kulusid elektrienergiale vähendada ja energia ülejäägi saab avatud turul elektrivõrku müüa. Päikesepaneele on mugav paigaldada hoonete katustele, kus nad ei võta lisaruumi ja ei vaja palju hooldust. Järjest rohkem hakkab tekkima liginullenergia hooneid, mis kasutavad lisaks säästlikule tarbimisele ka elektrienergia tootmist, et saavutada A-klassi energiatähis.

Käesoleva magistritöö eesmärk on uurida, kas ja kui palju võivad päikeseelektrijaamad elektrivõrku mõjutada. Uurimine otsustati teostada mitte ainult teoreetiliselt, vaid ka praktiliste mõõtmistega, et hinnata reaalset mõju ühe alajaama madalpingevõrgule. Mõõtmised teostati 2018. aasta septembrikuus 3-nädalase perioodi vältel Kose vallas asuvas päikeseelektrijaamas, mille inverterite koguvõimsus on 160 kW. Mõõtetulemustes vaadeldakse täpsemalt päikeseelektrijaama mõju madalpingevõrgu toitepingele, pinge muutust 1-minutilise perioodi sees, pingete asümmeetriat ja pingete harmoonilist kogumoonutust.

Töö on jaotatud kolmeks sisuliseks peatükiks. Esimeses peatükis kirjeldatakse teoreetiliselt, kuidas toimub päikeseelektrijaamades elektrienergia tootmine ja tuuakse välja eelnevalt tehtud nii teoreetilisi kui ka praktilisi uurimusi samal teemal. Teises peatükis on kirjeldatud uuritavat objekti ja selle asukohta. Kõige mahukam on kolmas peatükk, kus on mõõtmiste tulemused ja analüüs. Kolmanda peatüki esimeses alapeatükis on lähemalt kirjeldatud, mis seadmetega ja kuidas mõõtmisi teostati. Teises alapeatükis on jooniste abil esitatud mõõtmiste tulemused ja nende analüüs. Töö lisades on esitatud selle alajaama skeem, kuhu kasutatud päikeseelektrijaam on ühendatud, koos piirkonna skeemiga, kus see alajaam on ühendatud. Lisaks on veel pilte kohapealt, et luua parem ettekujutus antud päikeseelektrijaamast, kus mõõtmised teostati.

1. TEOREETILINE ALUS

Elektrienergia tootmiseks kasutatakse palju erinevaid allikaid, mis liigitatakse taastuvateks ja taastumatuteks energiaallikateks. Eestis on peamine taastumatu energiaallikas põlevkivi, millest 2017. aastal toodeti 82,4% elektrienergiast. Taastuvatest allikatest energiatootmise osakaal on küll üsna väike, kuid põlevkivi osakaal väheneb Eestis aasta-aastalt. 2008. aastal oli põlevkivi osakaal elektrienergia tootmises 91%, seega 9 aastaga on taastuvenergia allikatest energiatootmise osakaal suurenenud ja põlevkivi osakaal vähenenud 8,6%. [1]

Taastuvenergiast on kõige suurema osakaaluga Eestis tuuleenergia - 63%. Tuuleenergiale järgneb biomassist toodetav energia 27%-ga. Ülejäänud 10% moodustab hüdro-, jäätme-, biogaasi- ja päikeseenergia.[1] 2018. aastal moodustasid päikeseelektrijaamad 0,9% toodetud taastuvenergiast. Üheks põhjuseks, miks päikeseenergia osakaal on endiselt nii väike, võib lugeda Eesti geograafilist asendit. Talveperioodil on päikesevalgust vähe ja tootlikkus seega väike. Iga aastaga aga liitub järjest rohkem päikeseelektrijaamasid elektrivõrguga ning nende osakaal elektrienergia tootmises järjest tõuseb. Abistavateks meetmeteks on riiklikud toetused ja ka asjaolu, et tehnoloogia muutub järjest soodsamaks. Tehnoloogia odavnemine tähendab, et päikeseelektrijaamade rajamise kulud on väiksemad ja enam ei ole tasuvusaeg elueaga samaväärsel tasemel, vaid tasuvusaeg läheb üha väiksemaks.

Päikeseelektrijaamades saadakse elektrit päikesevalgusest tänu väikestele fotogalvaanilistele elementidele. Iga üksik element koosneb p- ja n-tüüpi pooljuhtmaterjali kihist. Valguse toimel pannakse pealmises kihis laengukandjad liikuma, kuna päikeseenergia on piisavalt tugev, et lüüa üksikud laengukandjad neid kinni hoidvast tuumast lahti. Sellega tekib ühepoolne suunatud laengute liikumine ehk alalisvool. Iga paneel koosneb paljudest väiksematest elementidest, mis on ühendatud rööbiti või jadamisi. Ühendusviisist oleneb, kui suurt pinget või voolutugevust soovitakse saada väljundis. Paneeli väljundpinge suurusjärk on kuni 22V ja vool kuni 5A.[2] Paneelidest lähevad juhtmed kokku inverterisse, kus pinge tõstetakse võrgupingele ja alalisvoolust muundatakse vahelduvvool, milleks kasutatakse jõupooljuht lüliteid.

Elektrivõrgu toimimise seisukohalt on kõige mõistlikum elektrit toota tarbimise lähedal. Transpordiga kaasnevad kaod ja ka pingeprofiilis võivad tekkida muutused. Päikeseelektrijaama tootlikkus aitab vähendada koormust, mis muidu langeb alajaamas asuvale trafole. Kui päikeseelektrijaama paigaldab tarbija, mitte võrgu operaator, saab tarbija sellega vähendada oma igapäevaseid kulutusi elektrienergia ostuks. Tegemist on ka rohelise energiaga ja tootmise ajal ei teki ümbritsevasse keskkonda heitmeid, mis rikuks õhu kvaliteeti.[3] Kui võrrelda tuulikutega

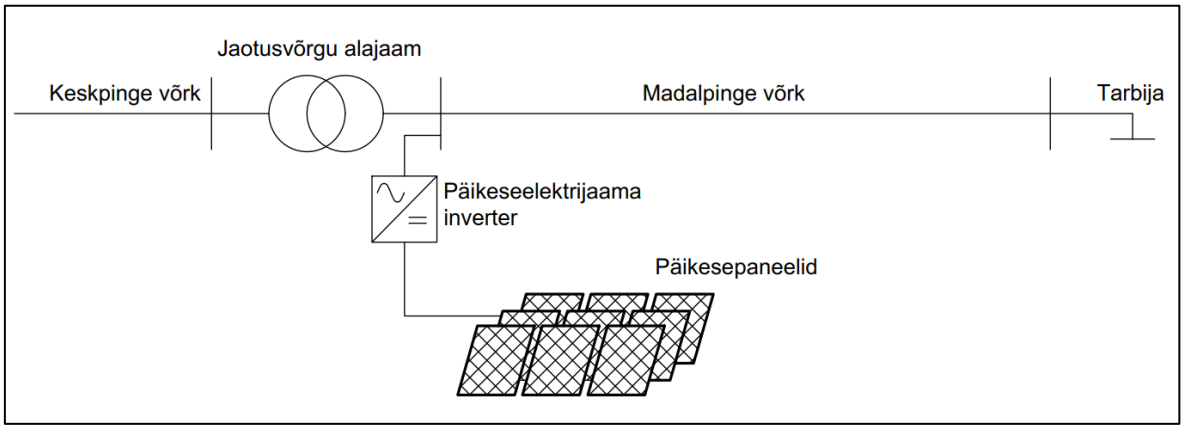
elektrienergia tootmist, ei teki päikesepaneelidega elektritootmise ajal ka mürareostust. Paljud paneelid paigaldatakse hoonete katusele, seega visuaalne reostus on ka üsna minimaalne.

Lisaks positiivsetele faktoritele on ka negatiivseid aspekte, mis on päikeseelektrijaama kasutamisele vastukaaluks.

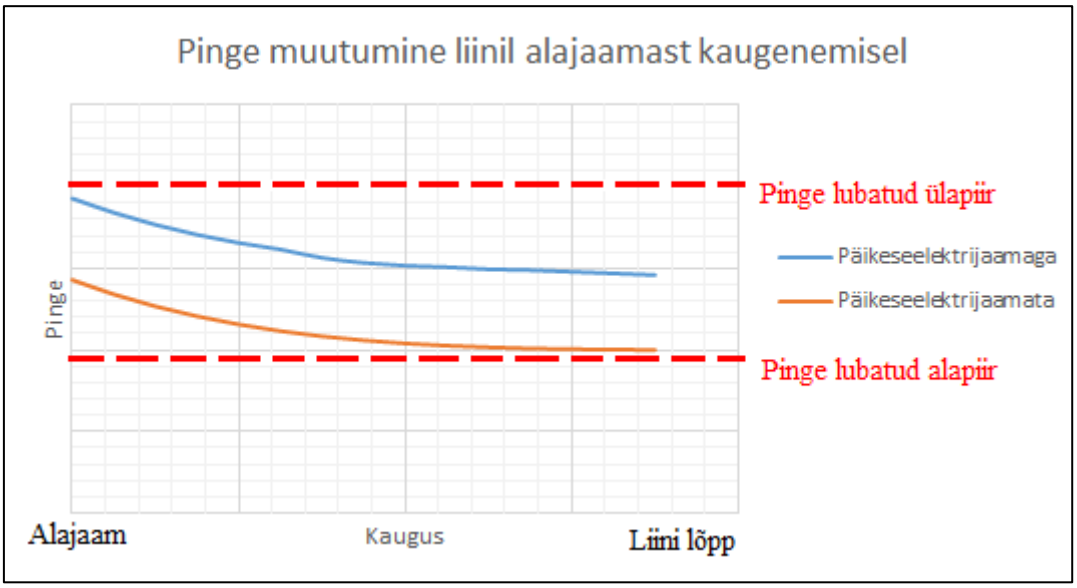
Õigete asjaolude kokkulangemisel võib tekkida olukord, kus alajaama madalpinge võrgus tarbitava elektrienergia suudab katta samas võrgus asuv päikeseelektrijaam. Paratamatult võib tekkida ka situatsioon, kus päikeseelektrijaam toodab rohkem energiat, kui on võrgu hetketarbimine. Siis muutub energiavoog madalpingevõrgust keskpingevõrku. Sellega kaasneb kadude suurenemine ja kaod võivad olla isegi suuremad kui energiavool keskpingevõrgust madalpingevõrku.[4]

2013. aastal Rootsis Luleå Tehnikaülikooli poolt avaldatud uurimuses on vaadeldud ühe suurema ja ühe väiksema päikeseelektrijaama mõju. Suurema jaama võimsus oli 20 kW ja väiksema jaama võimsus 2,5 kW. Eelmainitud uurimustöös vaadeldi harmooniliste komponentide mõju sagedusel kuni 25 kHz. Töö raames teostatud mõõtmiste tulemustest järeldati, et harmooniliste häirete osakaal on üsna väike. Kõige suurem voolu harmooniline komponent oli 5% nimiväärtusest. Töö kokkuvõttes toodi välja ka seda, et antud juhul on harmoonikute osakaal küll väike, aga kui invertereid on rohkem, võib see rohkem probleeme tekitada ja seda tuleks ka edasi uurida. [5]

Lisaks harmoonilistele mõjutustele on ka mõju pinge tõusu näol. Antud juhul on määravaks, kui kaugel asetseb päikeseelektrijaam toitepunkti trafost. Allpool toodud joonistel 1.1…1.4 on kujutatud graafiliselt, kuidas suure päikeseelektrijaama erinev võrku ühendamise asukoht võib mõjutada võrgupinget. Joonistel 1.1 ja 1.2 on esitatud, kuidas võib päikeseelektrijaama ühendamine alajaama lattidele mõjutada võrgupinget alajaamast kaugenemisel tarbija poole.



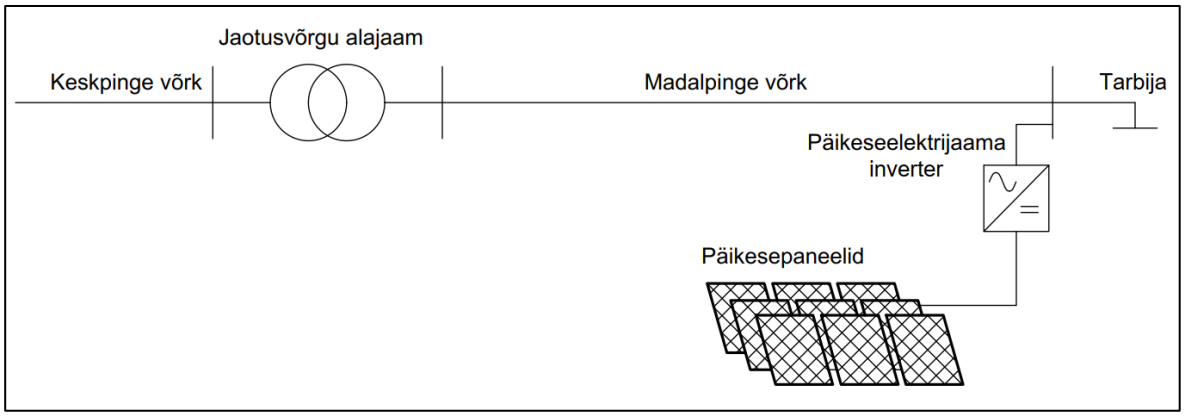
Joonis 1.1. Päikeseelektrijaama ühendamine elektrivõrku alajaama lattidele



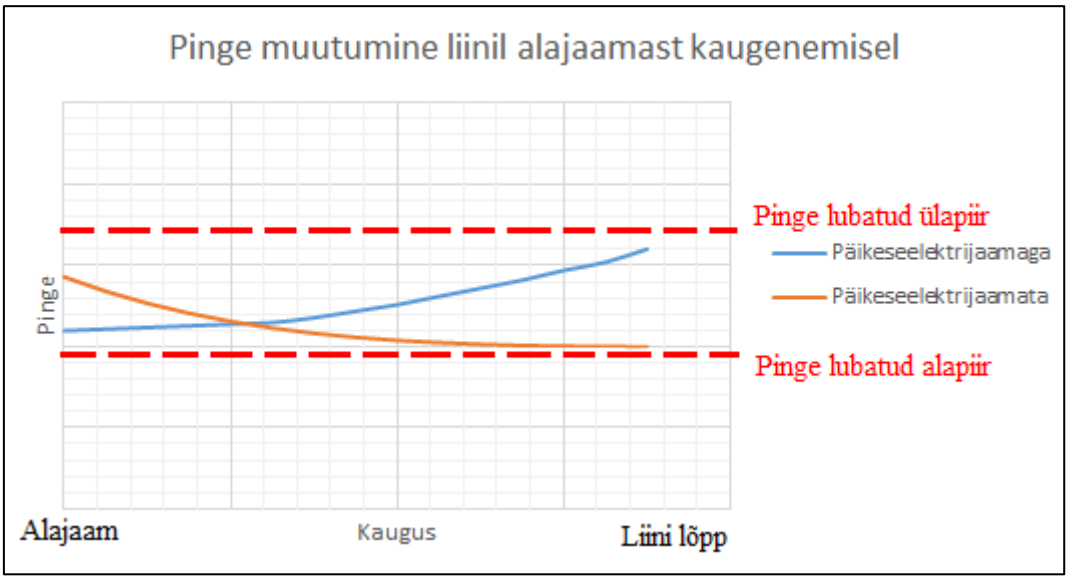
Joonis 1.2. Pinge muutus liinil, kui päikeseelektrijaam on ühendatud alajaama lattidele

Joonisel 1.1 on tood skeem, kus suurem päikeseelektrijaam on ühendatud alajaama lähedale või alajaama madalpinge lattidele. Joonisel 1.2 on iseloomustatud pinge muutumist alajaamast kaugenemisel. Mida kaugemal asub tarbija alajaamast, seda madalamaks pinge muutub. Antud juhul tõuseb päikeseelektrijaama tootlikkusega võrgupinge fiidri alguses ja lõpus võrdeliselt. Sellisel juhul tuleb arvestada, et päikesepaistelisel päeval võrgupinge fiidri alguses ei tõuseks üle lubatud piiri. Samuti tuleb trafo astme valikul arvestada olukorraga, kus päikeseelektrijaam ei tooda võrku energiat. Sellisel juhul ei tohi pinge fiidri lõpus langeda allapoole lubatud taseme.

Joonistel 1.3 ja 1.4 on esitatud, kuidas võib võrgupinge muutuda alajaamast tarbija poole liikudes, kui päikeseelektrijaam on ühendatud tarbija lähedale.



Joonis 1.3. Päikeseelektrijaama ühendamine elektrivõrku tarbija lähedale



Joonis 1.4. Pinge muutumine liinil, kui päikeseelektrijaam on ühendatud tarbija lähedale

Joonisel 1.3 on kujutatud olukord, kus madalpingefiidri lõpus on päikeseelektrijaam. Joonisel 1.4 on näidatud, kuidas pinge võib võrgus muutuda, kui liini lõpus asub suurem päikeseelektrijaam. Sealt on näha, et päikeseelektrijaamata on pinge liini lõpus madalam kui liini alguses. Kui aga liini lõpus asub suurem päikeseelektrijaam, tõstab see pinge liini lõpus tunduvalt kõrgemale kui liini alguses. Tarbija jaoks tähendab see seda, et päeva keskosas võib toitepinge olla isegi standardiga määratud piiri ülaosas ning õhtusel ajal, kui päikest enam ei ole, langeb pinge lubatud alumise piiri lähedale. Laastu talu päikeseelektrijaama iseloomustab joonis 1.1 ehk päikeseelektrijaam on ühendatud elektrivõrguga alajaama madalpingelattide kaudu.

Ideaalses elektrivõrgus on võrgusagedus täpselt 50 Hz või osades sagedusalades ka 60 Hz, pinge vastab nimisuurusele ning pinge- ja voolukujud on täpsed sinusoidid. Paratamatult tarbimine muutub pidevalt ja selle tagajärjel kõigub pinge teatud piirides. Koormuse kasvades pinge alaneb ja vastupidi. Tarbija seisukohast on oluline, et kõik elektri kvaliteedinäitajad oleks võimalikult nimiväärtuse lähedal, sest tarbija elektriseadmed on projekteeritud töötama sellistes tingimustes. Mõned elektroonikaseadmed võivad olla muutuste suhtes väga tundlikud ja suurem kõrvalekalle võib seadme eluiga tunduvalt vähendada. Selle vältimiseks on standardiseeritud, kui suurel määral tohib võrgus esineda nimiväärtusest kõrvalekaldeid.

Eestis on elektrikvaliteedi määrajaks võetud üle Euroopas kehtestatud standard EVS-EN:50160. Antud töö kirjutamise ajal oli kõige uuem ja kasutusel 2010. aasta versioon. Antud dokumendis on kirjeldatud tunnussuurused ja nende lubatud hälbed nimiväärtusest.

Avalike madalpingevõrkude standardnimipinge on U_N=230V faasi ja neutraali vahel neljajuhilises kolmefaasilises võrgus. Samuti on U_N=230V faaside vahel kolmejuhilises kolmefaasilises võrgus. Toitepinge nimisagedus peab olema 50 Hz antud sageduspiirkonnas. On ka piirkondi, kus sagedus on 50 Hz asemel 60 Hz. Normaaltalitlustingimustes peab põhisageduse 10 s jooksul mõõdetud keskväärtus olema ühendsüsteemiga sünkroonselt ühendatud võrkudes 50 Hz ± 1% (st 49,5 Hz kuni 50,5 Hz) 99,5% aastast ja vahemikus 47 Hz kuni 52 Hz peab olema 100% ajast.[6]

Normaaltalitlustingimustes ei tohi toitepinge aeglased muutused ületada ±10% nimipingest U_N. Pinge kõikumisest põhjustatud pikaajaline värelustugevus P_{lt} peab olema mis tahes nädalases ajavahemikus 95% ajast väiksem või võrdne 1-ga. Normaaltalitlustingimustes peavad igas nädalases ajavahemikus iga harmooniku pinge 10-minutilistest keskmistest efektiivväärtustest 95% olema väiksemad allpool tabelis 1.1 toodud väärtustest või nendega võrdsed. Üksikute harmoonikute suuremaid pingeid võivad põhjustada resonantsid.[6]

Tabel 1.1. Üksikute harmoonikute pinge väärtused liitumispunktis kuni järguni 25 protsentides pinge põhiharmoonikust u_1[6]

Paaritud harmoonikud				Paarisharmoonikud	
3-ga jagumatud		3-ga jaguvad			
Järk h	Suhteline väärtus u_h	Järk h	Suhteline väärtus u_h	Järk h	Suhteline väärtus u_h
5	6,00%	3	5,00%	2	2,00%
7	5,00%	9	1,50%	4	1,50%
11	3,50%	15	0,50%	6 kuni 24	0,50%
13	3,00%	21	0,50%		
17	2,00%				
19	1,50%				
23	1,50%				
25	1,50%				
MÄRKUS Harmoonikuid üle 25-nda järgu ei määratleta, sest nad on tavaliselt väiksed ja resonantsnähtuste tõttu suurel määral ettearvamatud					

Ajalooliselt on elektrivõrgus olnud energiavoog ainult ühes suunas. Suurtelt tootjatelt on elektrienergia liikunud ülekandevõrku, sealt jaotusvõrku ning lõpuks tarbijad on muundanud elektrienergia vastavalt endale soovitud energiaks. Tänu sellele, et tarbijatele on tekkinud võimalus lisaks tarbimisele ka ise energiat toota, on hakanud energia liikuma ka tarbija juurest jaotusvõrgu poole ehk kahesuunaliselt. See on muutnud võrgu operaatorite jaoks olukorra releekaitse seisukohast keerulisemaks. Kuna energiavoog võib toimuda ka altpoolt ülespoole, tuleb võrgu kaitsesüsteemid ümber häälestada, et need toimiksid korrektselt võimaliku lühise korral. Lisaks kaitseseadmetele võib suure päikeseelektrijaama töö häirida pingereguleerimise süsteeme.[3] Näiteks eelpool toodud joonisel 1.4 võib alajaama pinge reguleerimissüsteem olla häälestatud nii, et alajaamast tarbija poole pinge pidevalt langeb ja hoitakse nimiväärtusest veidi kõrgemat pinget. Sellisel juhul tekkivate pingelangude tõttu langeb pinge nimiväärtuseni. Kui aga liini lõppu ühendada suurem päikeseelektrijaam, ei lange pinge nimiväärtuseni, vaid võib tõusta tunduvalt üle nimiväärtuse. Kui päikeseelektrijaama ehitust planeeritakse ja soovitakse liituda elektrivõrguga, tehakse jaotusvõrgu operaatorile liitumistaotlus. Selliste probleemide vältimiseks, kus pinge võib väljuda lubatud piiridest, peab jaotusvõrgu operaator hindama kriitiliselt päikeseelektrijaama tööst tingitud võrgupinge muutust.

Üheks pingekvaliteedi näitajaks on veel pinge asümmeetria. Pinge asümmeetria on seisund, mille korral faasipingete efektiivväärtused või faasidevahelised nihkenurgad pole võrdsed. Asümmeetriat iseloomustavaks näitajaks on pinge vastu- ja pärijärgnevuskomponentide suhe, mida nimetatakse asümmeetriateguriks k_a ja võimalik arvutada valemi 1.1 ja 1.2 abil. [7]

$$k_a = \frac{U_2}{U_1} * 100\% \tag{1.1}$$

Asümmeetriategurit k_a saab arvutada ka faasidevaheliste pingete kaudu:

$$k_a = \sqrt{\frac{1-\sqrt{3-6\beta}}{1+\sqrt{3-6\beta}}}, \text{kus } \beta = \frac{U_{12}^4+U_{23}^4+U_{31}^4}{\left(U_{12}^2+U_{23}^2+U_{31}^2\right)^2} \tag{1.2}$$

Normaaltalitlusel ei tohi vastujärgnevuskomponendi efektiivväärtuse 10-minutiline keskväärtus madal- ja keskpingel ületada 2% pärijärgnevuskomponendist 95% juhtudest. Mõnes piirkonnas, kus tarbijate liitumine on ühe- või kahefaasiliselt, võib asümmeetria olla kolmefaasilises liitumispunktis kuni 3%. Kui asümmeetriategur $k_a \leq 1\%$, loetakse seda kvaliteedinäitaja kõrgtasemeks, kuni 1,5% ebasümmeetriat loetakse normaaltasemeks. Asümmeetria on oluline kvaliteedi näitaja, sest vastujärgnevuskomponent häirib tarvitite, eriti mootorite talitlust. Nulljärgnevuskomponent tekitab neutraalinihke. [7]

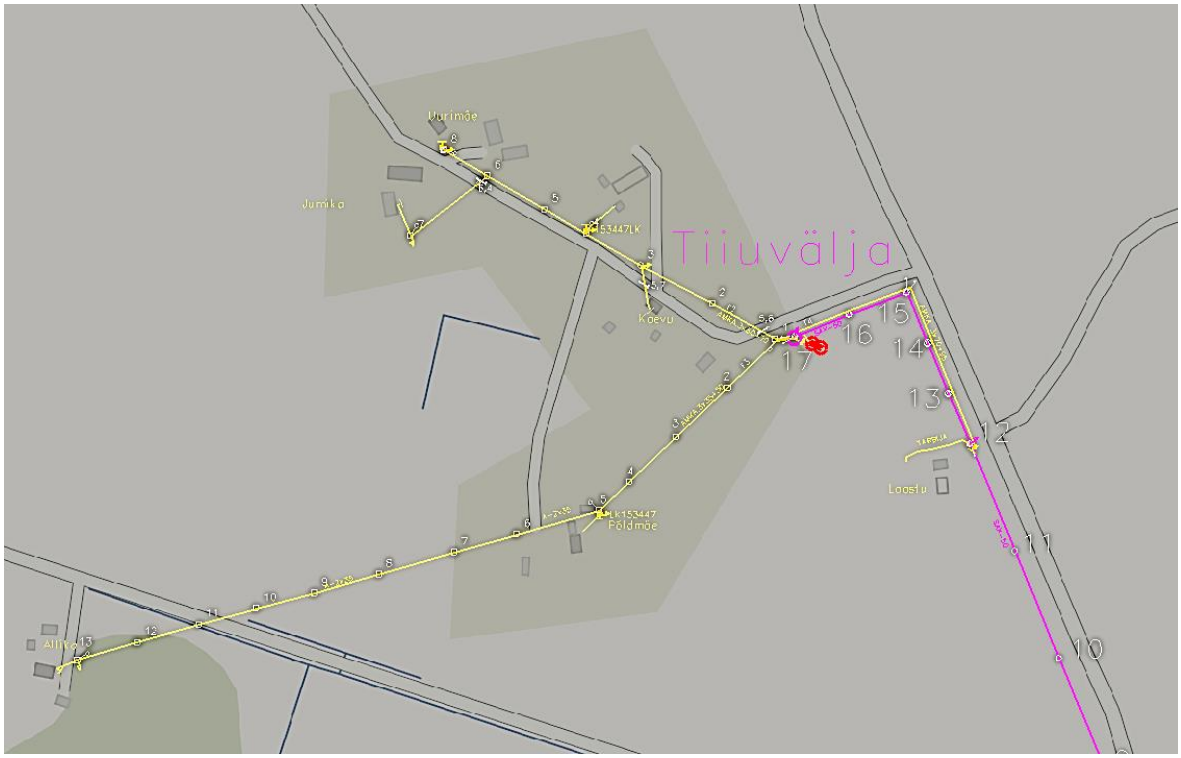
Eleringi andmetel on 2019. aasta alguse seisuga Eestis üle 1600 päikeseelektrijaama. Nende jaamade koguvõimsus ulatub 110 MW-ni. 2017. aastal moodustas päikeseelektrijaamade toodetud energia 0,3% taastuvenergiast ja 2018. aastal 0,9%. Lähiaastatel prognoositakse, et päikeseelektrijaamade poolt toodetud energia võib kasvada 4-6%-ni taastuvenergiast.[8]

Käesolevas magistritöös võeti uurimise alla üks päikeseelektrijaam, kuhu on paigaldatud kaks 20 kVA ja neli 30 kVA võimsusega inverterit. Jaama päikesepaneelide koguvõimsus on 177 kW ja inverterite koguvõimsus 160 kW.

2. LAASTU TALU OÜ ELEKTRIJAAM

Antud elektrijaam, kus teostati mõõtmised, asub Harjumaal Kose vallas Nõvara külas. Tegemist on Laastu Talu OÜ-le kuuluva jaamaga ning jaama eesmärk on müüa võrku rohelist energiat. Elektrijaama rajamisega alustati oktoobris 2015. aastal ja lõplikult valmis aasta hiljem, 2016. aasta oktoobris. Elektrijaam töösse läks aga juba 2016. aasta juulis. Projekti eelarve oli 166859 eurot ning ehitust aitas rahastada maapiirkonnas majandustegevuse mitmekesistamise investeeringutoetus MAK meede 6.4. Päikeseelektrijaama projekteeris ja ehitas Energiapartner OÜ. Jaama ehitamisel hinnati esialgseks tasuvusajaks 10 aastat.

Laastu talu päikeseelektrijaam on ühendatud Tiiuvälja 10/0,4 kV alajaama madalpinge klemmidele. Joonisel 2.1 on näha Tiiuvälja alajaama ümbritsevat madalpingeskeemi kaardivaates. Antud alajaama Elektrilevi OÜ poolt joonestatud skeem on toodud lisas nr 1.



Joonis 2.1. Laastu talu OÜ päikeseelektrijaama ümbruses olev elektrivõrk

Tiiuvälja 10/0,4 kV alajaam on oma olemuselt mastalajaam ja asub joonisel nähtava masti nr 17 küljes. Alajaamas on üks 160 kVA võimsusega trafo. Kollase värviga on toodud alajaamast väljuvad madalpingeliinid. Lilla värviga on toodud Tiiuvälja alajaama toitev 10 kV kõrgepingeliin. Kose piirkonna 10 kV võrgu skeem on toodud välja töö lisas nr 2.

Lisas 1 oleva skeemi pealt on näha ka, et alajaama tuleb sisse üks 10 kV liin ja madalpinge poolel on 4 fiidrit. 1 fiider kuulub päikeseelektrijaamale ja ülejäänud 3 on väljuvad liinid tarbijateni. Lisas nr 3 on toodud pilt Laastu talu päikeseelektrijaama peajaotuskilbist, kus teostati mõõtmised ja taamal on näha ka Tiiuvälja 10/0,4 kV alajaama. Aerofotodelt mõõdetuna on kaugus alajaama ja päikeseelektrijaama peajaotuskilbi vahel 20 meetrit.

Laastu päikeseelektrijaamas on kokku 668 päikesepaneeli koguvõimsusega 177 kW. Inverterite koguvõimsuseks on 160 kW. Invertereid on kokku 6 tükki - 2 tükki on 20 kVA ja 4 tükki 30 kVA võimsusega. Paneelid on pärit Slovakkia päritolu ettevõttelt BISOL SOLAR Ltd. Inverterid on Huawei SUN2000 seeria toodangust. Väiksema võimsusega inverterid on Huawei SUN2000 20KTL ja suurema võimsusega inverterid on Huawei SUN2000 33KTL. 20KTL inverterite maksimaalne võimalik alalispinge on 1000 V ja suurim vahelduvvoolu võimsus 22 kVA. Inverteri energia muundamise efektiivsus on 98,5%. 33KTL inverterite maksimaalne võimalik alalispinge on 1100 V ja suurim vahelduvvoolu võimsus 33 kVA. Inverteri efektiivsus on 98,8%.[9] Joonisel 2.2 on toodud pilt, millised Huawei SUN2000 seeria inverterid välja näevad.

Joonis 2.2. Huawei SUN2000 seeria inverter[9]

Kogu elektrijaam on 6 inverteri abil jaotatud tinglikult kuueks tootmisüksuseks, mis koonduvad ühte peajaotuskilpi, kus on kaitselülitid. Peajaotuskilbis koondatakse kõik toodetud energia ja edastatakse ühe kaabliga elektrivõrku. Inverterite abil eraldi tootmisüksusteks jaotamise abil on tekitatud olukord, kui näiteks ühe inverteri või muu seadmega peaks midagi juhtuma, saab 5/6 jaamast segamatult edasi töötada.

Inverterid koosnevad erinevatest pooljuhtlülititest, mille abil muundatakse nii pinget kui ka lainekuju. See on vajalik, et päikesepaneelidest saadav energia suunata elektrivõrku õigete

parameetritega. Igasugune muundurites kasutatav tehnoloogia omab ka negatiivset mõju siinuselise lainekuju moonutamise näol. [10] Antud töö eesmärgiks on vaadelda, kui suurel määral on Laastu talu päikeseelektrijaamas kasutatavad inverterid mõjutanud elektrikvaliteeti seal asuvas madalpingevõrgus.

Lisas nr 4 on toodud pilt Laastu talu päikeseelektrijaama territooriumile pääseva värava juures olevast infotabloost. Selle tabloo peal on toodud päikeseelektrijaama tehnilised andmed. Lisaks paneelide ja inverterite koguvõimsuse ja paneelide arvule on seal toodud ka eeldatav aastane toodang 163 000 kWh. Reaalne toodang oli 2017. aastal erinevate rikete tõttu 155 000 kWh kuid aasta hiljem tänu päikselisele suvele oli 2018. aasta toodang kokku 180 000 kWh. Lisaks põhilistele andmetele on seal ka päikeseelektrijaamast tehtud aerofoto, et paremini tajuda jaama suurust. Päikesepaneelide paigutus on neljas reas ja lisas nr 5 on toodud pilt lähemalt ühest paneelide reast. Selle pildi pealt on ka näha, kui kõrge on päikesepaneelide konstruktsioon ja pildi vasakus ääres on näha ühe inverteri tagumist külge ning lahendust, kuidas inverteid on jaamas paigutatud paneelide. Päikesepaneelid on 40° nurga alla tõstetud ja suunaga lõunasse. Konstruktsioon on ehitatud statsionaarseks ehk vastavalt aastaajale nurka muuta ei saa.

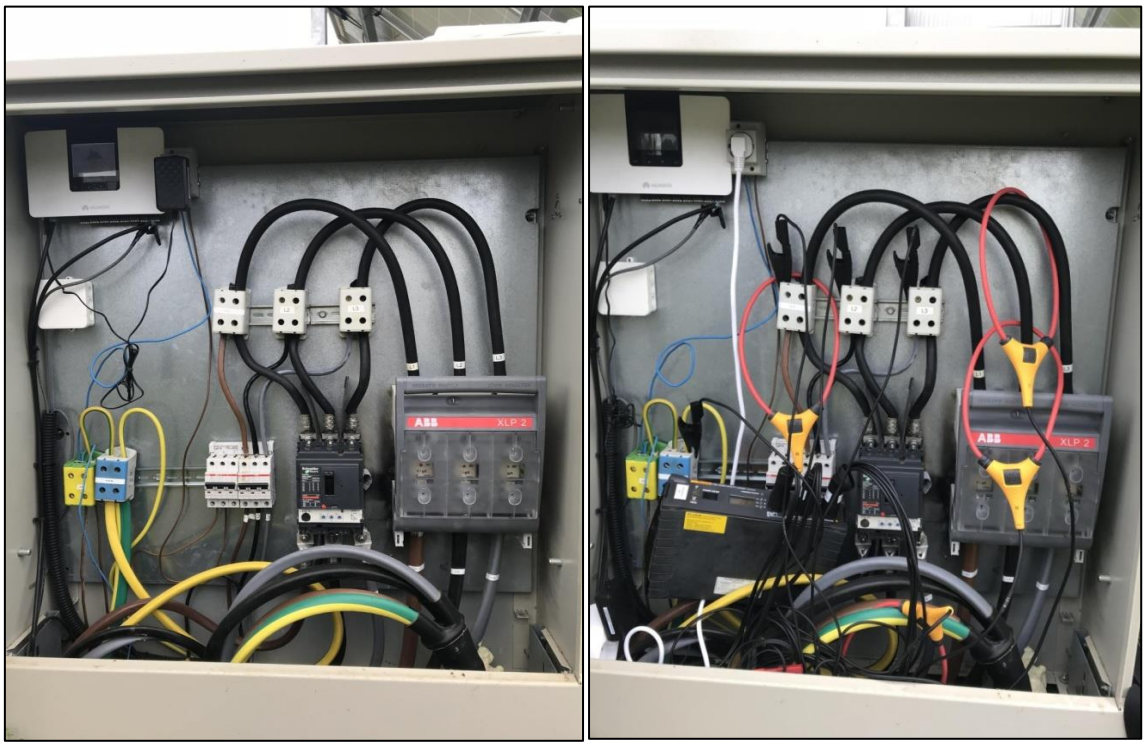
3. MÕÕTETULEMUSED JA ANALÜÜS

3.1 Mõõtmised

3.1.1 Pikemaajalised mõõtmised

Antud lõputöö raames teostati Laastu Talu päikeseelektrijaamas mõõtmisi perioodil 2. september kuni 25. septembrini 2018. aastal. Mõõtmised teostati Tallinna Tehnikaülikooli mõõteseadmega Fluke 1745 Power Quality Logger. Tegemist on kolmefaasilise mõõteseadmega, mis registreerib oma mällu pinge, voolu, aktiiv- ja reaktiivvõimsuse, sageduse, pingete asümmeetria ja ka pinge ning voolu harmooniliste komponentide osakaalu kuni 50. harmoonikuni. Mõõteseadet saab programmeerida andmeid salvestama 1-sekundilise, 1-minutiliste või 10-minutiliste keskväärtustena. Lisaks valitud perioodi keskväärtusele salvestas seade ka antud perioodi jooksul olnud minimaalsed ja maksimaalsed väärtused.

Mõõtmiste planeerimisel tekkis probleem, kuhu paigaldada mõõteseade, et see oleks kaitstud ilmastiku eest. Samuti pidi koht olema piisavalt turvaline, et mõõteseade töö käigus kaduma ei läheks. Koostöös jaama omanikuga leiti, et kõige sobilikum koht on peajaotuskilp, mis on nähtav joonisel 3.1. Seal oli seade kaitstud vihma ja otsese päikese eest. Lisaks asus see aiaga ümbritsetud alal, mis oli valve all.



Joonis 3.1. Laastu talu OÜ päikeseelektrijaama peajaotuskilp

Joonise 3.1 vasakpoolsel pildil on näha, milline oli päikeseelektrijaama peajaotuskilp enne mõõteseadme ühendamist. Parempoolsel pildil on lisatud Fluke 1745 mõõteseade koos nelja pinge mõõtmiseks vajaliku juhtmega ja voolu mõõtmiseks vajaliku Rogowski vööga. Iga faasi ja PEN juhi pinge ja voolu mõõtmiseks oli eraldi kindlaksmääratud juhe. Juhtmete ühendamisel tuli täpselt jälgida, et iga juhe oleks õiges kohas ja Rogowski vööd oleks lisaks sellele veel vastavalt voolu suunale õiget pidi. Vastasel juhul oleks saadud mõõteandmed ebakorrektsed. Parempoolsel pildil on ka näha mõõteseadet ennast, kuhu kõik mõõtejuhtmed kokku jooksevad. See toetati ettevaatlikult kilbis asetsevate jõukaablite peale.

Mõõtmiste alustamiseks tuli seadistada mõõteseade arvutis oleva programmi abil. Sealt sai ka määrata andmete salvestamise intervalli. Mida lühema intervalliga seade andmeid salvestab, seda täpsemad tulemused on. Antud Fluke 1745 seade võimaldas valida salvestusintervalliks 1 sekundi, 1 minuti või 10 minuti keskväärtused. Uurimise seisukohast oleks 1 sekundi keskväärtus olnud väga täpne ja võimalik registreerida ka pisemad muutused. See tähendab aga seda, et salvestatavaid andmeid oleks väga palju ja mälu oleks saanud täis umbes 2 päevaga. Kui mälu saab täis, peab seadme ühendama arvutiga ja andmed arvutisse laadima, et saaks edasi mõõta. Mõõtmisi oli plaanis teostada 3 nädala vältel ning lõputöö koostaja ja transpordi seisukohast oli iga 2 päeva järel andmeid arvutisse laadida ebamõistlik. Sellepärast valiti 1 minuti keskväärtus, mis tähendas, et mõõteseade oli suuteline andmeid salvestama 8 päeva jooksul. Mõõteperioodi ajal käis lõputöö koostaja iga nädala lõpus andmeid kogumas ja mõõteseadet uuesti seadistamas.

3.1.2 Lühiajaline mõõtmine katsete ajal

Enne mõõtmisi käis antud töö koostaja ka tutvumas Laastu talu päikeseelektrijaamaga. Suheldes jaama omanikuga tekkis idee teostada ka lisaks olmemõõtmistele katseid. Katsete sisuks oli jaama erakorraline väljalülitamine täielikult ja osaliselt võrgust hetkel, mil tootlikkus on lähedal maksimaalsele väljundvõimsusele. Eesmärgiks oli simuleerida olukorda, kui taevasse ilmuvad rünkpilved ja väljundvõimsus langeb hetkeliselt maksimaalselt minimaalsele. Kui töö koostaja kohtus 2018. aasta augusti lõpus Tallinna Tehnikaülikoolis professor Lauri Kütiga, et saada pikemaajalisteks mõõtmisteks Fluke 1745 mõõteseade ja õpetused selle kasutamiseks, arutleti ka nende katsete üle ja professor pakkus välja, et katsete ajaks annab teise seadme, mis on täpsem ja mõõdab rohkem andmeid. Katsete jaoks saadud seade oli A-Eberle PQ-Box 200. Antud seadme suureks eeliseks on võimekus salvestada andmeid palju väiksema intervalliga. Lisaks sellele on antud seadmel ka ostsillograafi funktsioon ja iga 2 minuti tagant salvestati 1 sekundi pikkune lõik.

3.2 Mõõtetulemused

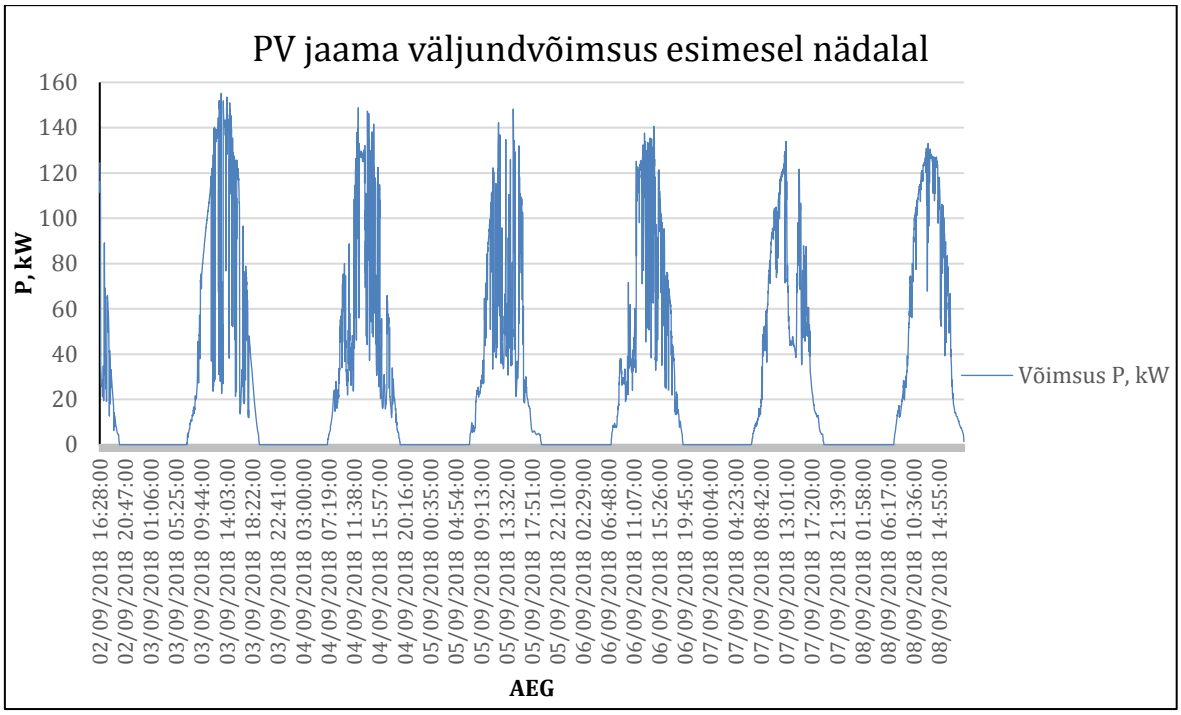
Pikaajalised mõõtmised kestsid 3 nädalat ja seadmed salvestasid terve selle aja jooksul võrgus toimuva 1-minutiliste intervallidena. See tähendab, et salvestatud mõõtepunkte on üle 30 000. Igas mõõtepunktis on iga faasi kohta toodud palju erinevaid parameetreid ja nende graafiliseks esitamiseks kasutati Microsoft Office'i poolt loodud tabelitöötlus programmi Excel. Järgnevates alapeatükkides on välja toodud ja analüüsitud valik mõõteseadme poolt salvestatud andmetest.

Joonistel 3.2...3.19 on toodud mõõtetulemused üldiselt ühe nädala pikkuste perioodidena. Joonistel 3.20...3.37 on näha samad graafikud päevade lõikes. Töö koostaja valis mõõteperioodist kolm eriilmeliste mõõtmistulemustega päeva. Valituks osutusid 3., 8. ja 15. septembri mõõtetulemused. 3. septembril oli tootlikkus väga kõikuv ehk päikese ette ilmus tihti suuremaid pilvi. 8. septembril oli tootlikkus stabiilselt kõrge ja siit võib järeldada, et tegemist oli selge ilmaga. 15. september oli madala tootlikkusega ning see võib tähendada, et taevas oli ühtlaselt pilves terve päeva vältel. Iga päeva järel on tehtud ka vahekokkuvõtted ja märkused, mida on täheldatud mõõteandmetest.

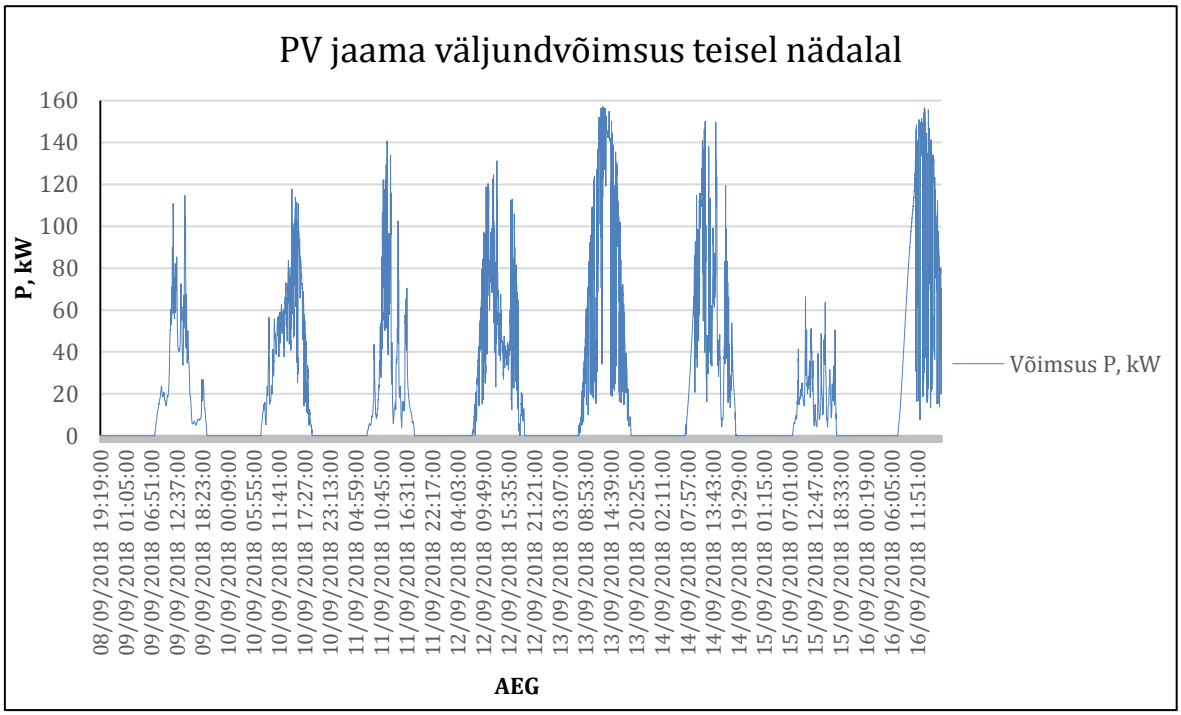
Joonistel 3.38...3.52 on toodud 14.10.2018 läbi viidud katseliste lülitamiste mõõteandmed. Katsete käigus lülitati kõigepealt kolmel korral välja ja siis sisse tagasi kaks 20 kVA võimsusega inverterit ja hiljem samuti kolmel korral kõik kuus inverterit korraga ehk kogu päikeseelektrijaam. Väljalülitamiseks kasutati Laastu talu päikeseelektrijaama peajaotuskilbis vastavaid kaitselüliteid.

3.2.1 Kogu mõõteperioodi koondtulemused

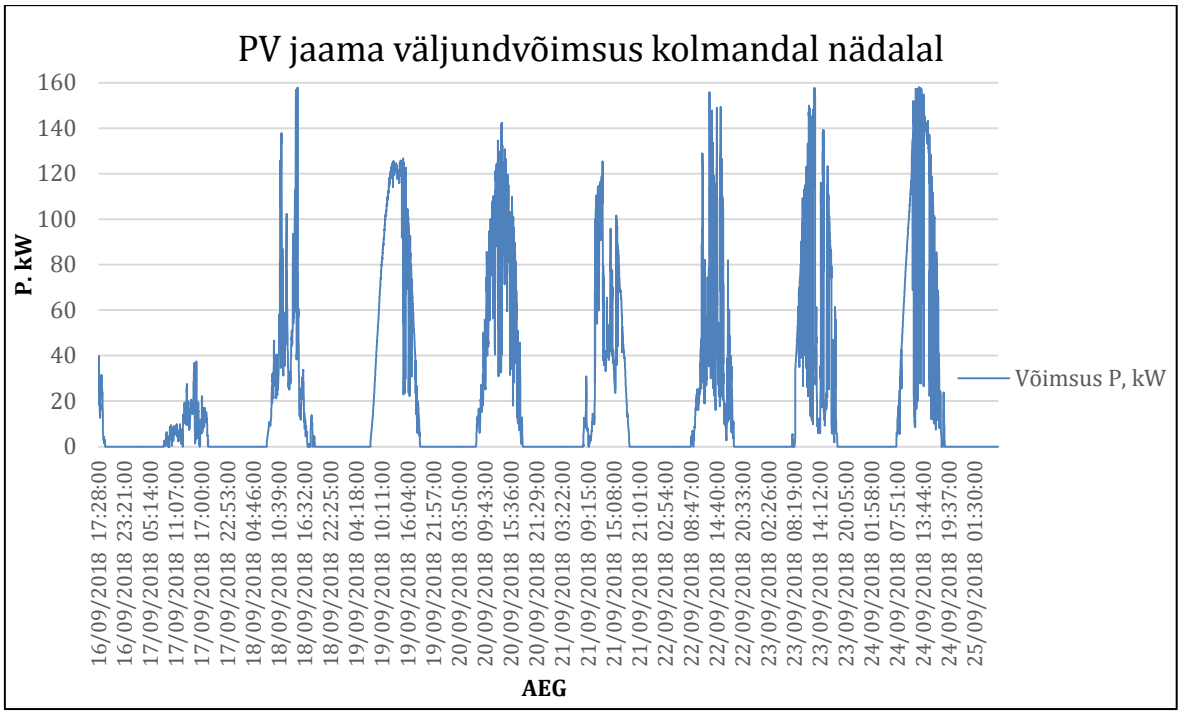
Selles alapeatükis on toodud Laastu talu OÜ päikeseelektrijaamas teostatud mõõtmiste tulemused graafiliselt ühe nädala pikkuste perioodidena. Joonistel 3.2…3.4 on päikeseelektrijaama väljundvõimsus nädalate kaupa.



Joonis 3.2. Laastu talu OÜ päikeseelektrijaama väljundvõimsus perioodil 2.09-8.09.2018



Joonis 3.3. Laastu talu OÜ päikeseelektrijaama väljundvõimsus perioodil 8.09-16.09.2018



Joonis 3.4. Laastu talu OÜ päikeseelektrijaama väljundvõimsus perioodil 16.09-25.09.2018

Joonistel 3.2...3.4 on toodud Laastu talu OÜ päikeseelektrijaama 3 nädala väljundvõimsus kW-des nädala kaupa. Antud jaama inverterite koguvõimsus on 160 kW ja arvutuslikult oli esimese nädala keskmine väljundvõimsus 56,01 kW, teisel nädalal 47,42 kW ja kolmandal nädalal 49,71 kW. Keskmiste arvutamisel kasutati mõõtepunkte alates hetkest, mil jaam hommikul elektritootmist alustas kuni hetkeni, kui õhtul tootmine lõppes.

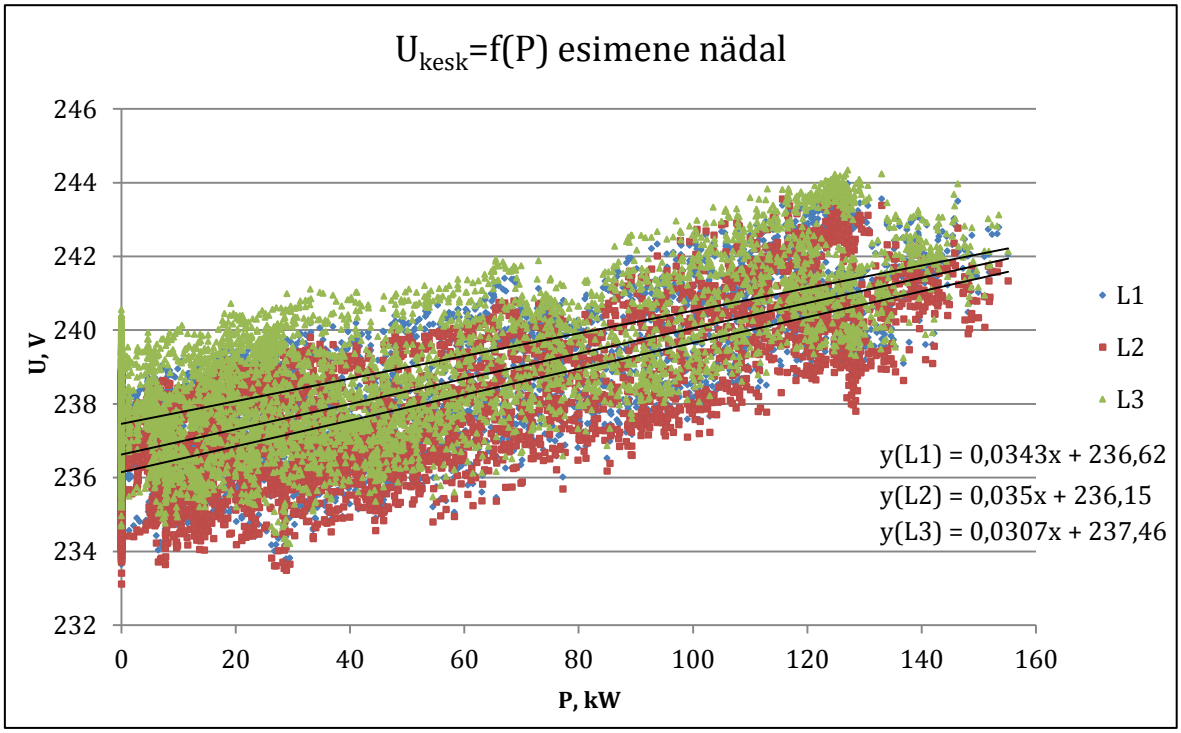
Joonisel 3.4 on näha, et 17. septembril oli väga pilvine ilm, sest keskmine väljundvõimsus oli 9,34 kW. Samal joonisel on näha, et 19. septembril oli pigem selge ilm. Siis oli päeva keskmine väljundvõimsus 76,97 kW. Selge ilma tunnuseks on asjaolu, et tootlikkus on stabiilselt üsna kõrge. Kui võrrelda 19. ja 23. kuupäeva tootmiskõveraid, on näha, et 23. septembril on päikese ette tulnud rünkpilved, mis on väljundvõimsuses põhjustanud tugevaid hüppeid. 19. kuupäeva tootmiskõver on päeva esimeses pooles stabiilselt kõrge ja õhtupoole on tekkinud mõned hüppelised muutused. Riigi Ilmateenistuse lähim vaatluspunkt Laastu talu päikeseelektrijaamale on Kuusikus. Vaatlusandmete põhjal oli 17. septembril 2018. aastal pilves ja vihmane ilm. Pilvisuse astmeks hinnati 9/10. 19. septembril oli päeva esimeses pooles selge ja pärast lõunat poolpilves ilm. Pilvisuse astmeks hinnati päeva esimeses pooles 1/10 ja pärast lõunat 4/10. 23. septembril esines päeva jooksul nõrka hoovihma ja pilvisuse astmeks hinnati 6/10.[11]

Elektrienergia tootmise üheks suureks probleemiks on tarbimise juhuslikkus. Joonistel 3.2...3.4 on näha, et päikeseenergiast elektritootmine on väga sõltuv ilmastikust ja seetõttu ennustamatu ja

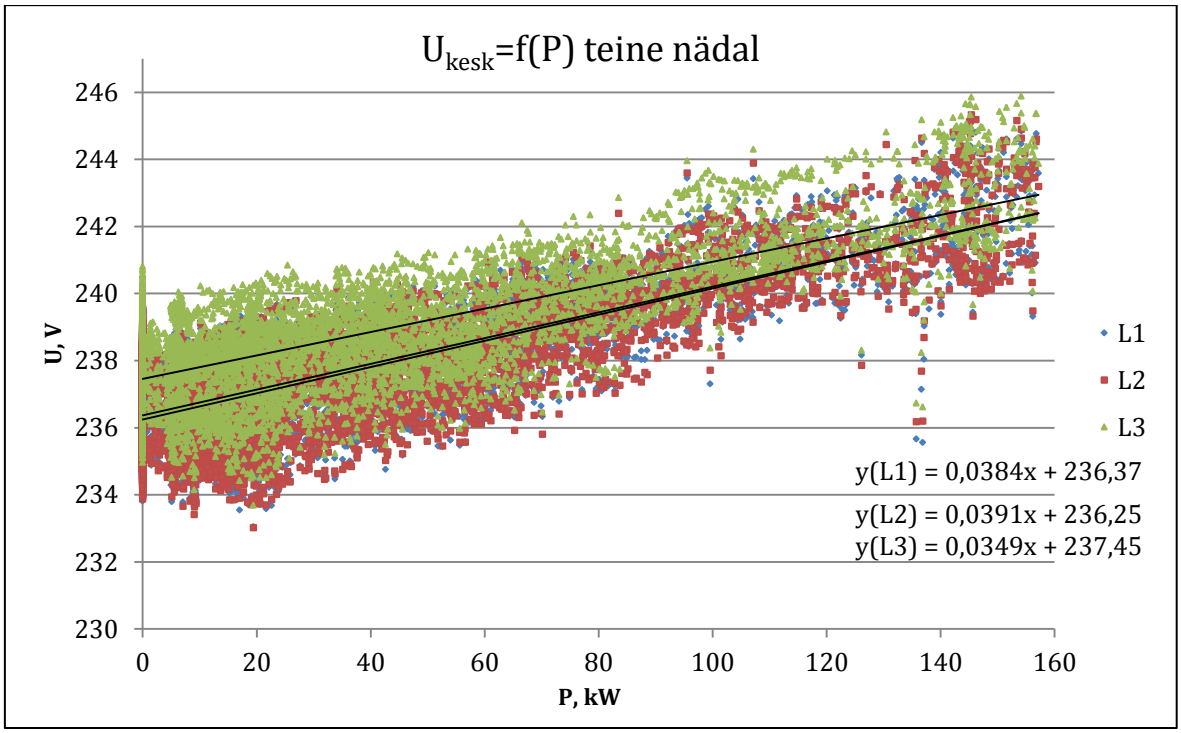
kiiresti muutuv. Ühel päeval võib olla väga päikseline ilm ja teisel sajune. Samasugune muutus võib toimuda ka loetud tundide jooksul. Elektrienergia tootmises võib see tähendada ligi kümnekordset tootlikkuse erinevust. Põhjus, miks ilusatel ilmadel ei olnud tootlikkus maksimaalse võimaliku lähedal rohkem võib tuleneda sellest, et mõõtmised teostati septembris, mil päikesekiirgus langeb väiksema nurga all paneelidele kui suvekuudel.

Eesti kiirguskliima teatmikus on toodud keskpäevased päikese kõrgused kraadides kuu 15. kuupäeval Eesti meteoroloogiajaamades. Kuusiku ilmavaatluspunkti andmetel on juunis päike kõige kõrgemal ning nurk horisondi ja päikese vahel on keskpäeval 54,3°. Päike on kõige madalamal detsembris ja nurk horisondi ja päikese vahel vaid 7,8°. Mõõtmiste perioodil septembris oli päikese nurk 34,1° ja oktoobris oli nurk 22,6°.[12]

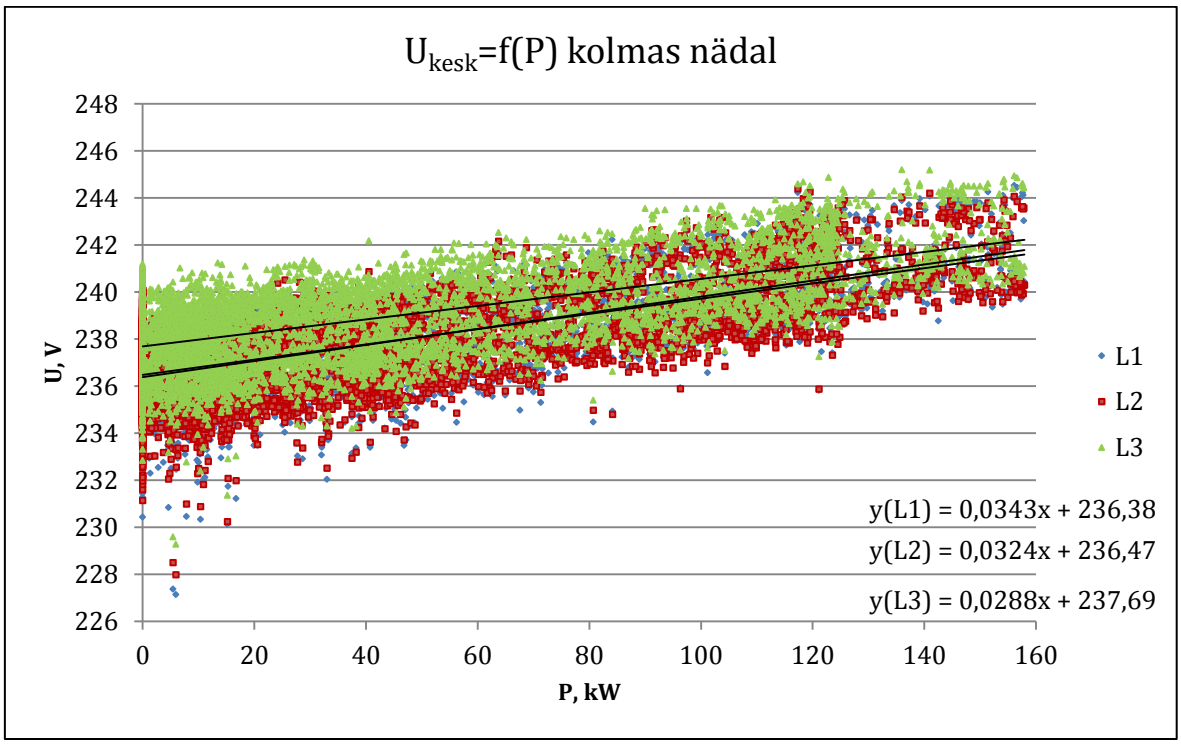
Joonistel 3.5…3.7 on esitatud päikeseelektrijaamast väljuva kaabli klemmidelt mõõdetud faasipingete sõltuvus jaama väljundvõimsusest.



Joonis 3.5. Faasipingete sõltuvus päikeseelektrijaama võimsusest esimesel nädalal



Joonis 3.6. Faasipingete sõltuvus päikeseelektrijaama võimsusest teisel nädalal



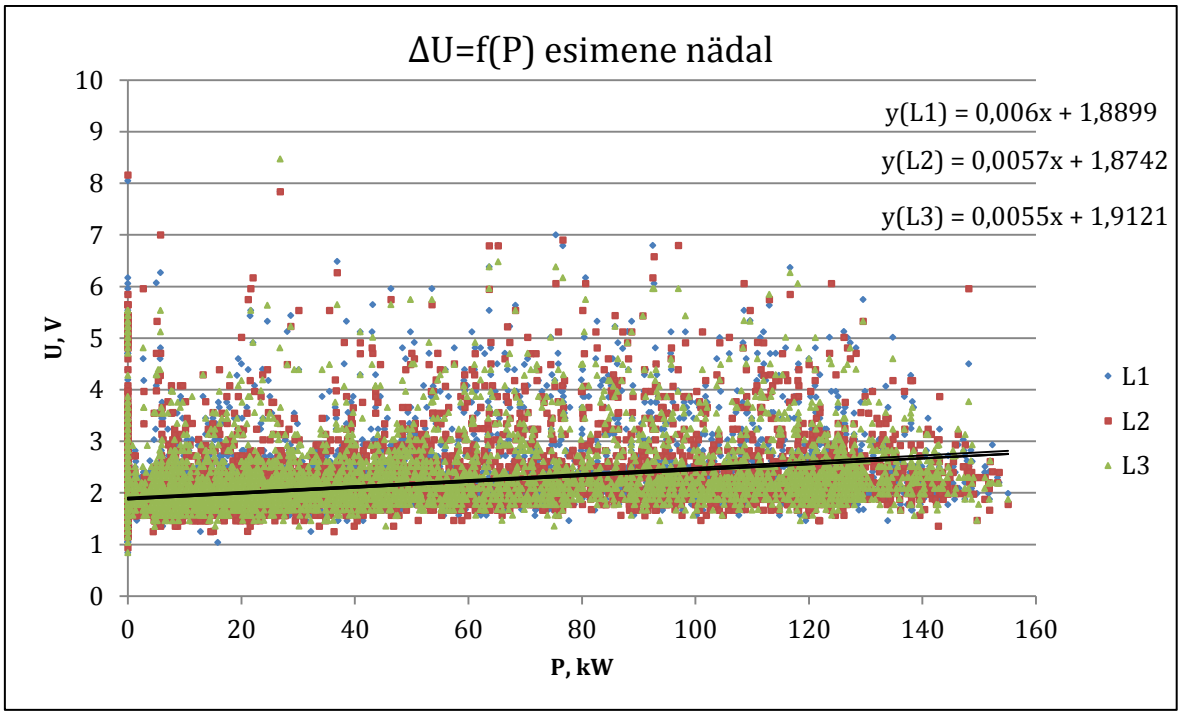
Joonis 3.7. Faasipingete sõltuvus päikeseelektrijaama võimsusest kolmandal nädalal

Joonistel 3.5...3.7 on toodud pinge sõltuvus väljundvõimsusest nädala lõikes. Kui neid kolme graafikut vaadelda, on näha, et päikeseelektrijaama väljundvõimsuse tõusmisega kasvab selgelt

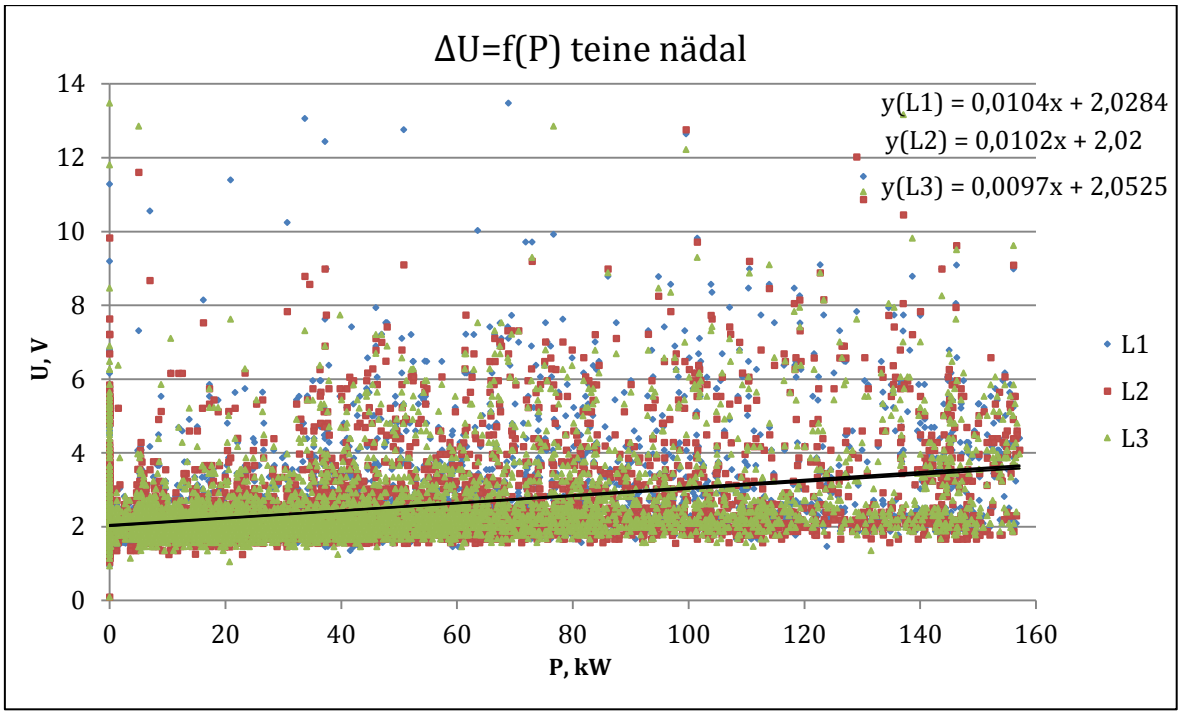
võrgupinge. Joonistel on toodud ka mõõtepunktide abil konstrueeritud lineaarsed trendijooned faaside kaupa.

Trendijoonte võrrandid on kirjas legendi juures ja nende tõusud kolme nädala peale on vahemikus 0,0288x kuni 0,0391x, kus x on vastav väljundvõimsus kW-des. Tõusude järgi saab arvutada välja, et keskmiselt tõuseb pinge 160 kW tootlikkuse juures 4,6...6,3V. Kolme nädala jooksul on faasipingete väärtused muutnud vahemikus 232 V kuni 246 V.

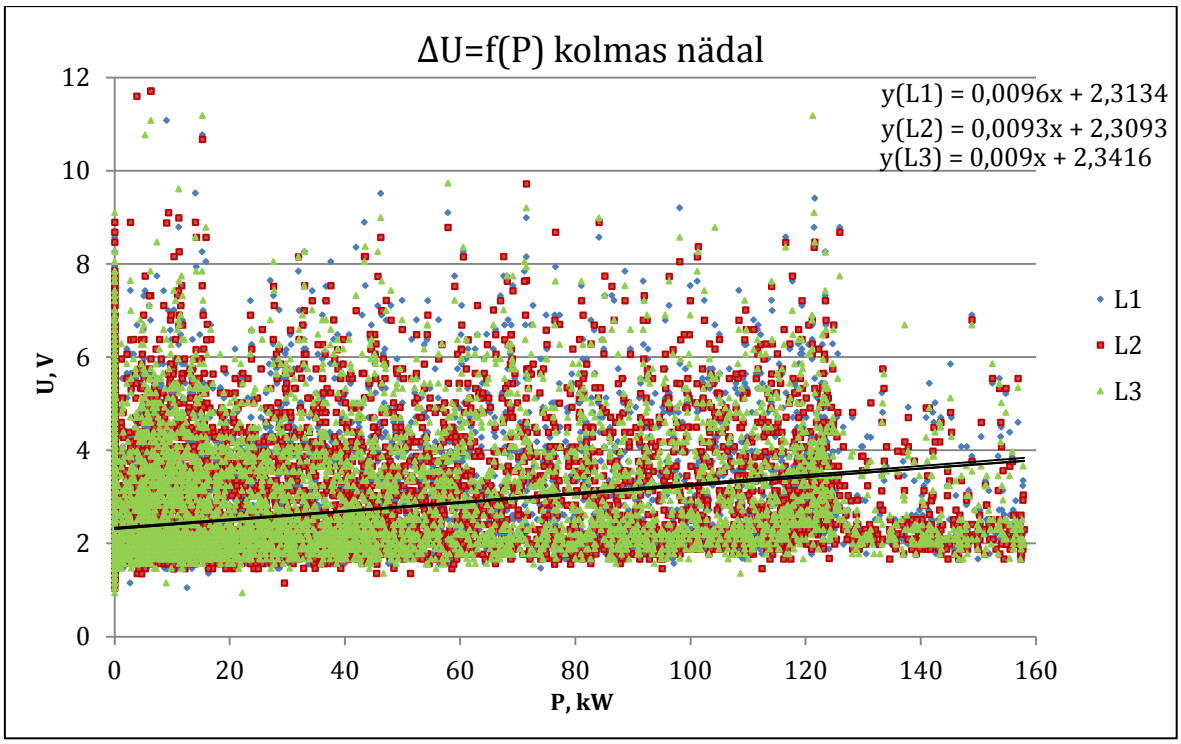
Joonistel 3.8…3.10 on 1-minutiliste perioodide vältel salvestatud pingete maksimum- ja miinimumväärtuste vahe, et vaadelda pinge kõikumist.



Joonis 3.8. Pingete max-min väärtuste vahe sõltuvus päikeseelektrijaama väljundvõimsusest esimesel nädalal



Joonis 3.9. Pingete max-min väärtuste vahe sõltuvus päikeseelektrijaama väljundvõimsusest teisel nädalal

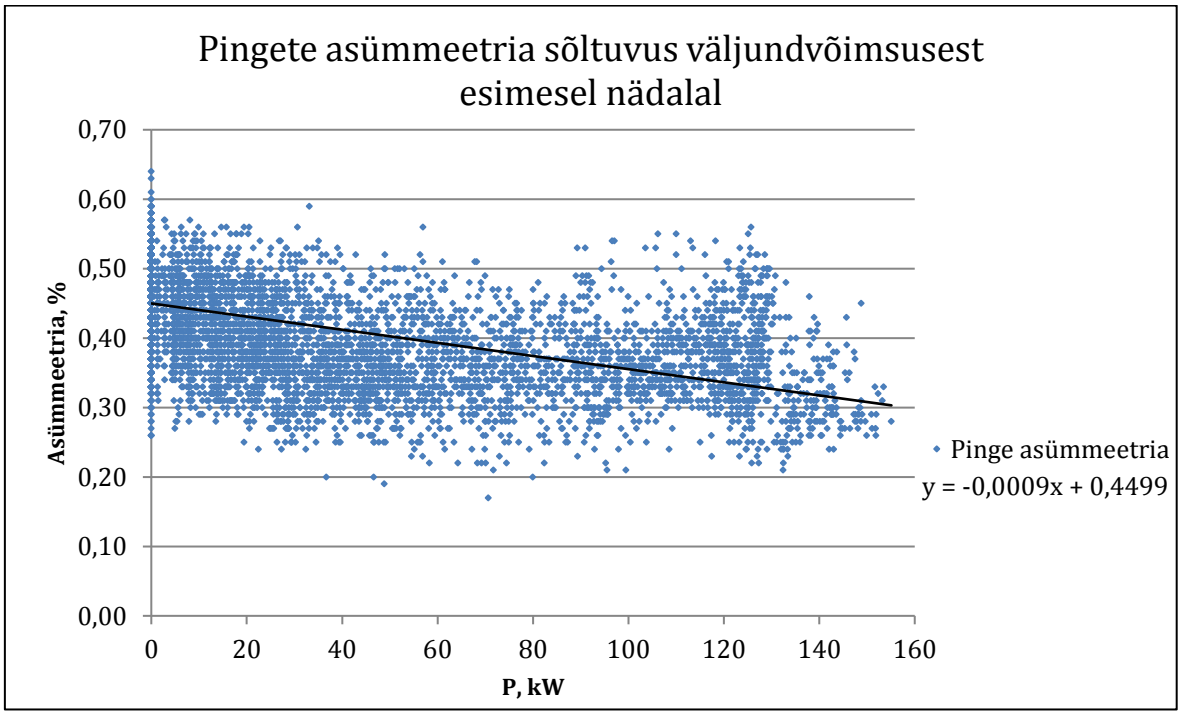


Joonis 3.10. Pingete max-min väärtuste vahe sõltuvus päikeseelektrijaama väljundvõimsusest kolmandal nädalal

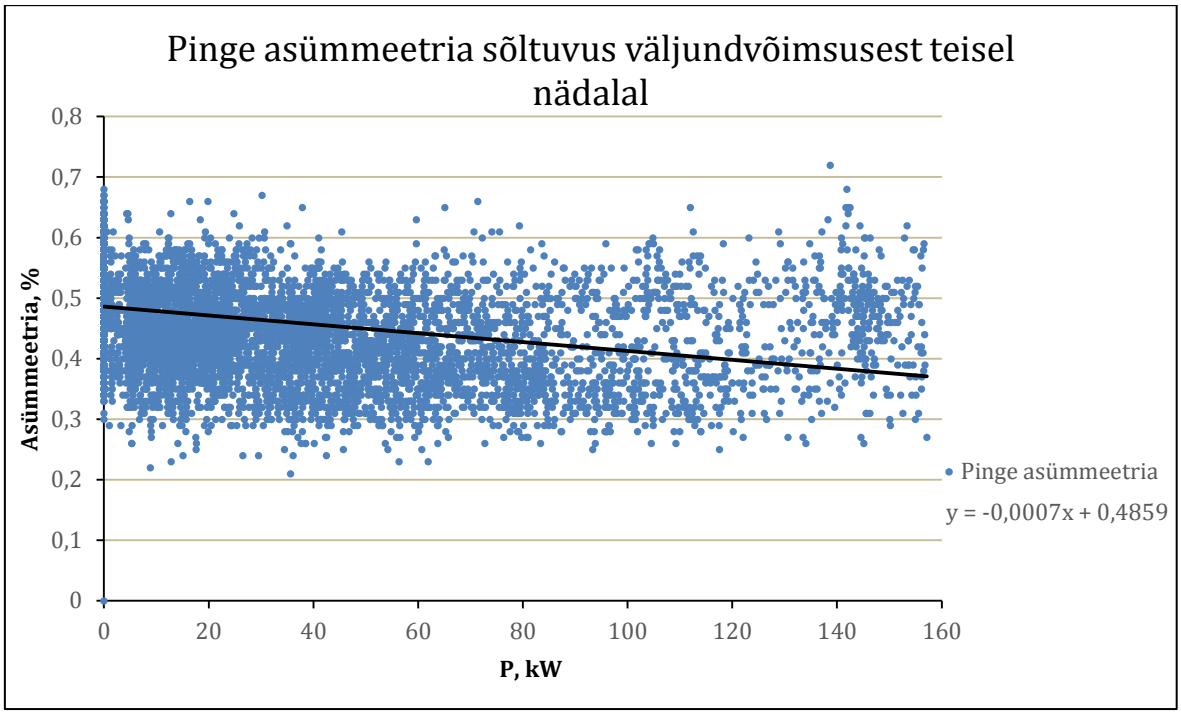
Joonistel 3.8...3.10 on toodud pingete maksimum- ja miinimumväärtuste vahe sõltuvus päikeseelektrijaama väljundvõimsusest. Mõõtmiseks kasutatav seadeldis salvestas lisaks ühe

minuti keskväärtusele ka sama minuti vältel olnud pingete maksimum- ja miinimumväärtuse. Kolme nädala jooksul oli pingete muutus ühe minuti jooksul enamasti vahemikus 1,5…8 V. Üksikutel juhtumitel oli ka kuni 13 V. Kuigi joonistel toodud trendijooned on tõusvad sirged, on nende tõusud väikesed. Seega võib väita, et antud päikeseelektrijaama võimsuse suurenedes, ei suurene pinge kõikumine ühe minutilise perioodi vältel.

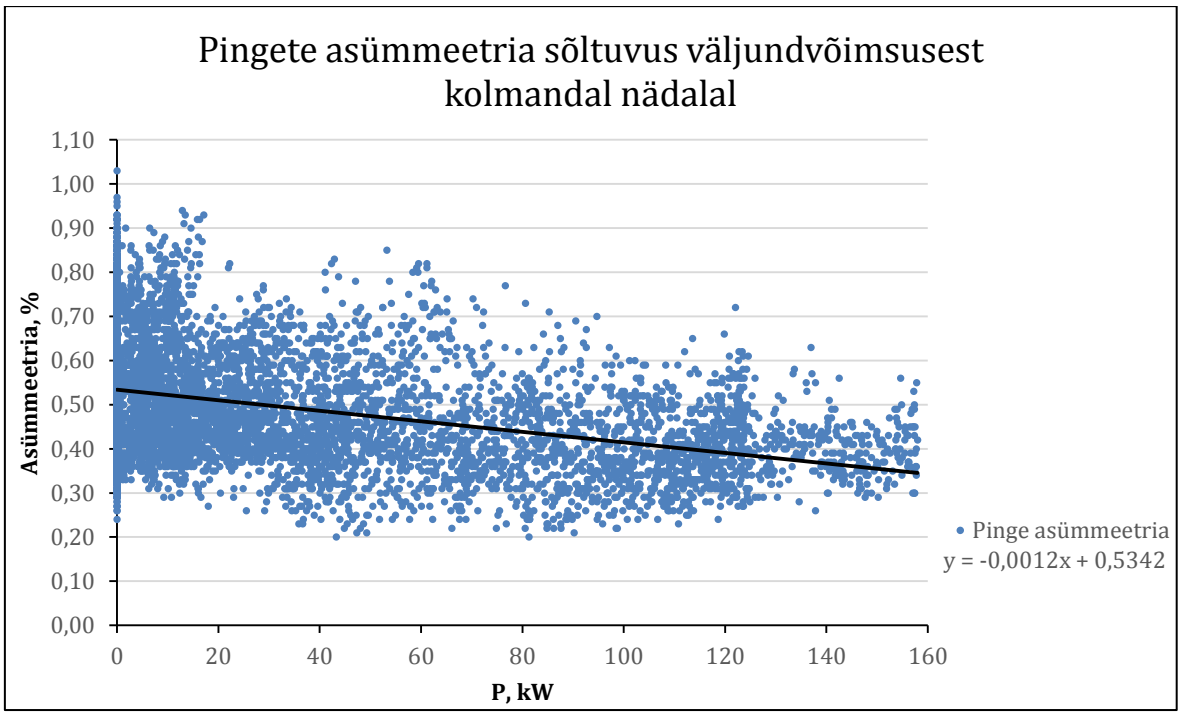
Järgnevalt on joonistel 3.11…3.13 toodud kolmenädalasel mõõteperioodil salvestatud andmed pingete asümmeetria kohta ja selle sõltuvus päikeseelektrijaama väljundvõimsusest.



Joonis 3.11. Pingete asümmeetria sõltuvus päikeseelektrijaama väljundvõimsusest esimesel nädalal



Joonis 3.12. Pingete asümmeetria sõltuvus päikeseelektrijaama väljundvõimsusest teisel nädalal

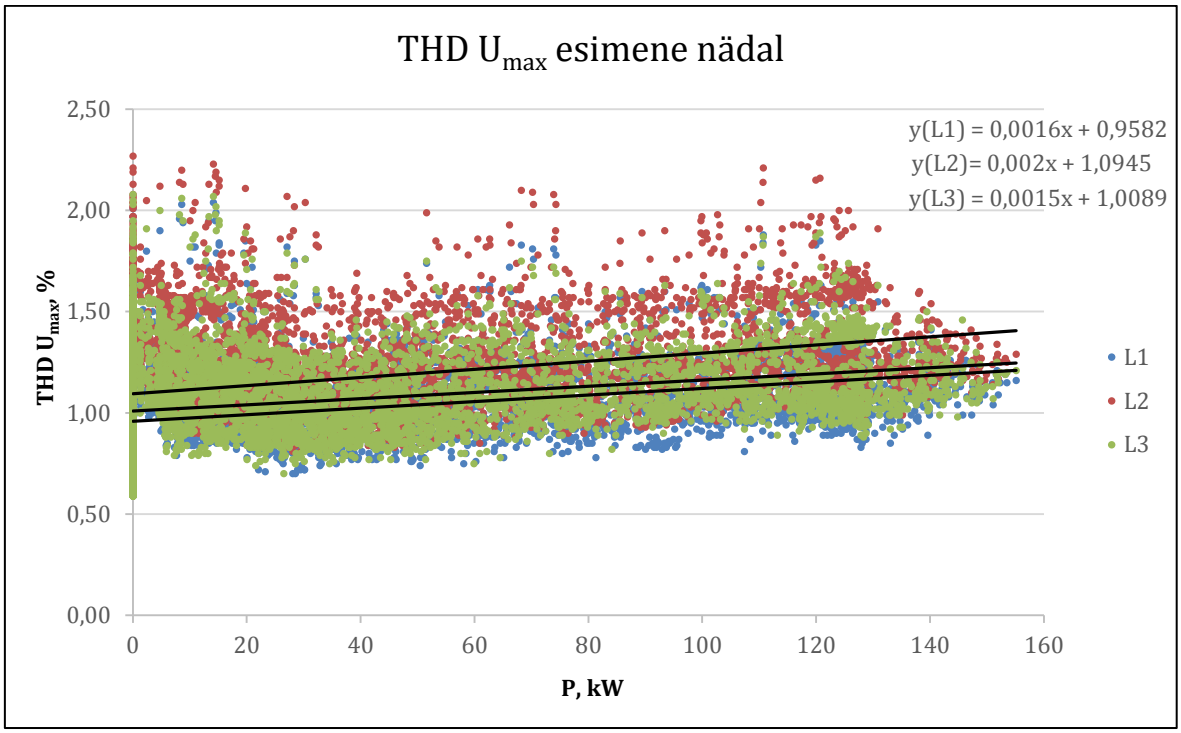


Joonis 3.13. Pingete asümmeetria sõltuvus päikeseelektrijaama väljundvõimsusest kolmandal nädalal

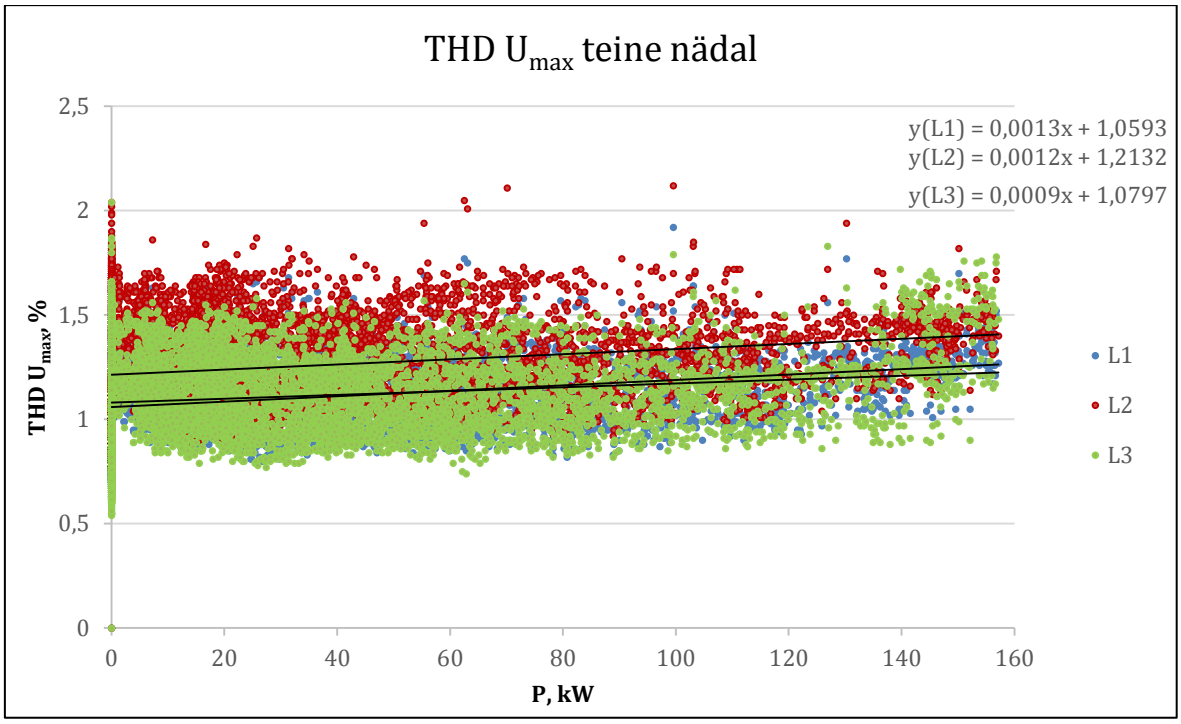
Joonistel 3.11...3.13 on toodud pinge asümmeetria sõltuvus päikeseelektrijaama väljundvõimsusest. Joonisel 3.12 on visuaalselt näha, et punktid asetsevad pigem horisontaalselt, kui tõusvalt või langevalt, kuigi trendijoon on langev. Joonistel 3.11 ja 3.13 on mõõtepunktide asetuses võimalik täheldada päikeseelektrijaama väljundvõimsuse tõusuga asümmeetria

langemist. Esimesel ja kolmandal nädalal oli ka võrreldes teise nädalaga keskmine tootlikkus suurem. Trendijoonte järgi langes keskmiselt asümmeetria väljundvõimsuse tõusuga 0,50%-lt 0,35%-ni ehk 0,15%. Asümmeetria muutus toimus kolme nädala jooksul vahemikus 0,2% kuni 0,95%.

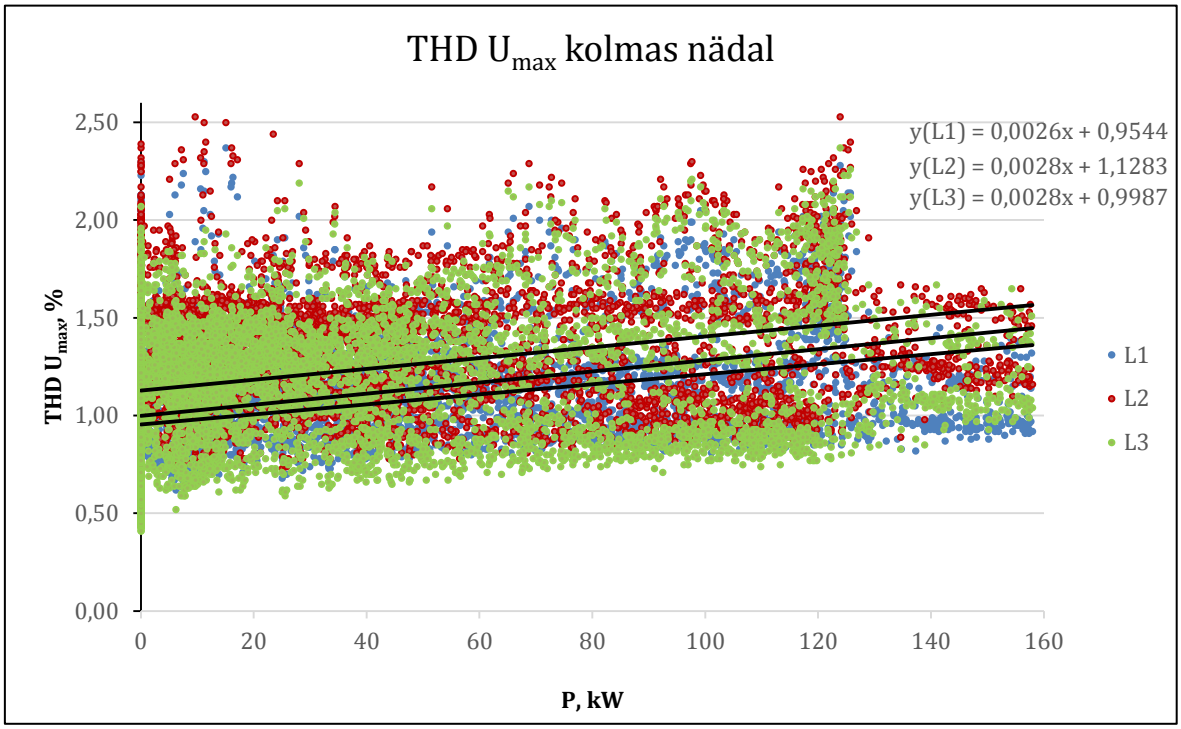
Joonistel 3.14…3.16 on toodud pingete harmooniliste kogumoonutuste sõltuvus päikeseelektrijaama väljundvõimsusest.



Joonis 3.14. Pingete harmooniliste kogumoonutuste sõltuvus päikeseelektrijaama väljundvõimsusest esimesel nädalal



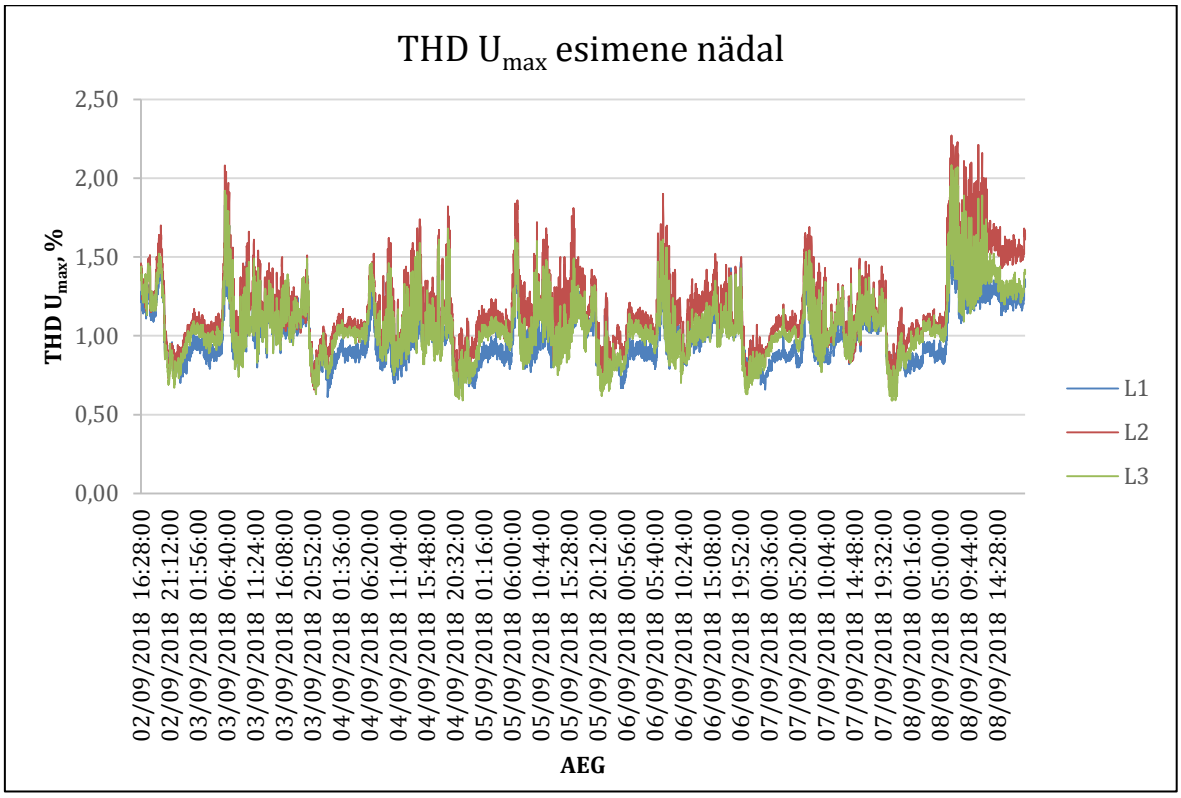
Joonis 3.15. Pingete harmooniliste kogumoonutuste sõltuvus päikeseelektrijaama väljundvõimsusest teisel nädalal



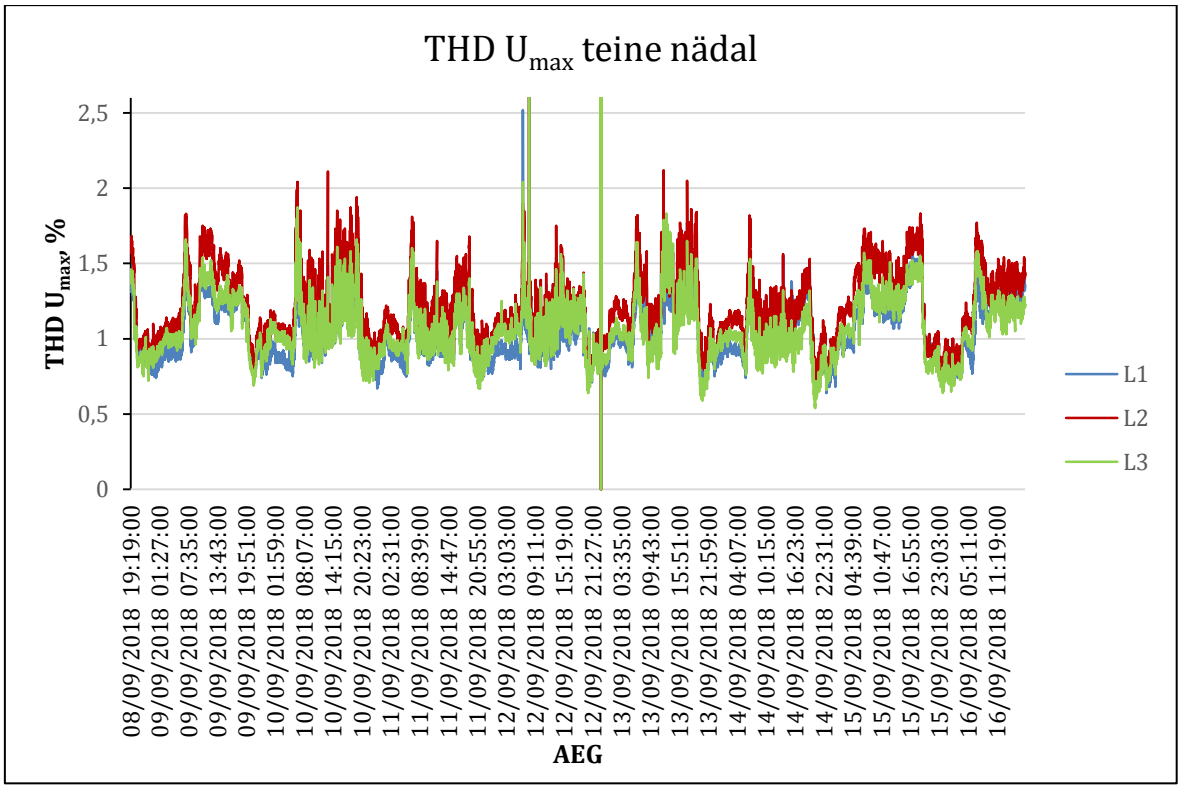
Joonis 3.16. Pingete harmooniliste kogumoonutuste sõltuvus päikeseelektrijaama väljundvõimsusest kolmandal nädalal

Joonistel 3.14...3.16 on toodud pingete harmooniliste kogumoonutuste sõltuvus Laastu talu päikeseelektrijaama väljundvõimsusest. Väljundvõimsuse kasvades on võimalik täheldada kerget pingete harmooniliste moonutuste tõusu. Kolme nädala trendijoonte tõusud on vahemikus 0,0009x kuni 0,0028x, kus x on vastav väljundvõimsus kW-des. Kui asendada x inverterite koguvõimsusega, tõusevad pingete harmoonilised kogumoonutused maksimaalse väljundvõimsuse juures keskmiselt 0,144% kuni 0,448% võrra.

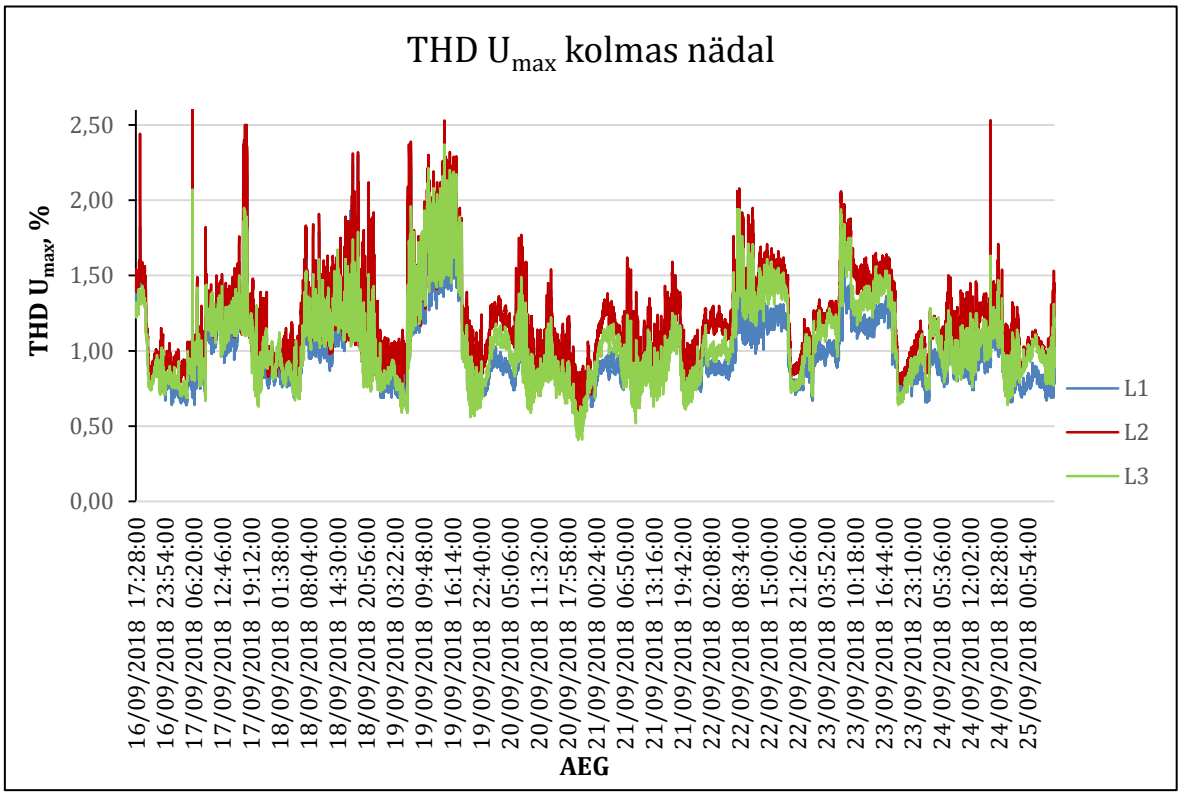
Joonistel 3.17…3.19 on esitatud samad pingete harmoonilised kogumoonutused ajaliselt nädalate kaupa.



Joonis 3.17. Pingete harmoonilised kogumoonutused esimesel nädalal



Joonis 3.18. Pingete harmoonilised kogumoonutused teisel nädalal



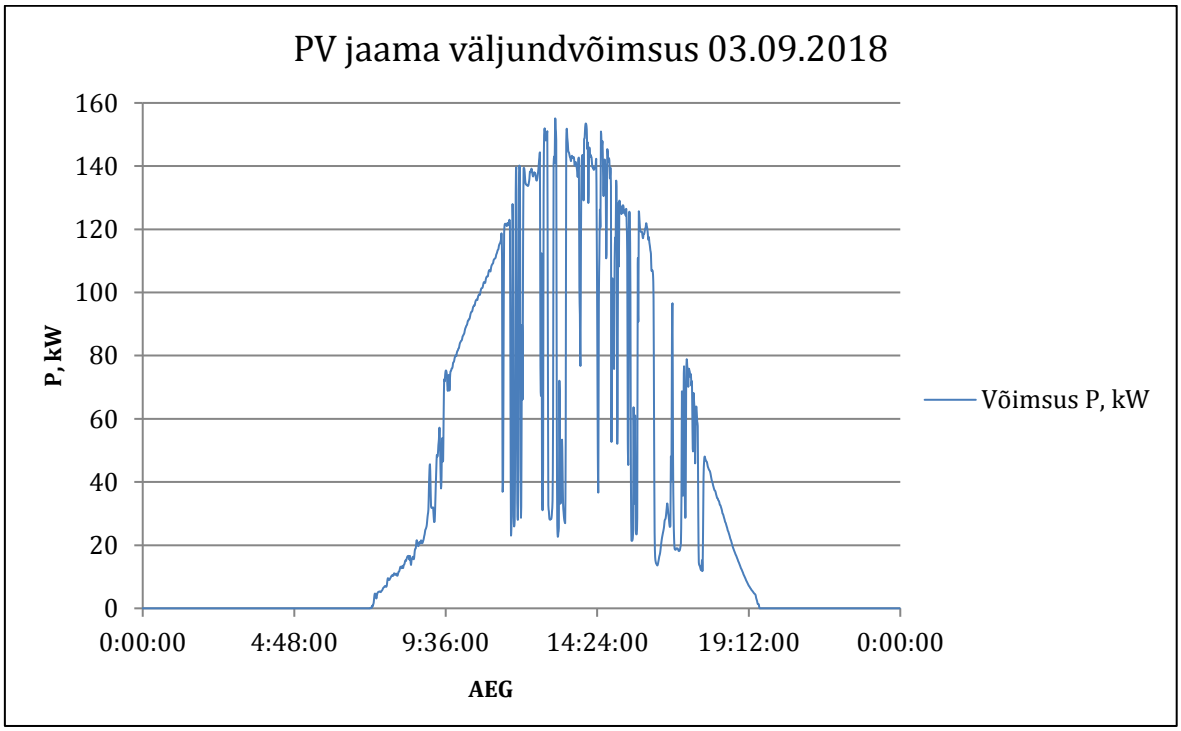
Joonis 3.19. Pingete harmoonilised kogumoonutused kolmandal nädalal

Joonistel 3.17...3.19 on toodud kolme nädala pingete kogu harmooniline moonutus ajaliselt. Nendelt joonistelt on võimalik selgelt näha, et öisel perioodil on pingete kogu harmoonilise moonutuse tase palju väiksem kui päevasel ajal. Selle üheks põhjuseks võib olla päikeseelektrijaama inverterite töö, aga samas ka asjaolu, et võrgus olevad tarbijad kasutavad päevasel ajal rohkem seadmeid, mis võivad tekitada võrgus harmoonilisi moonutusi.

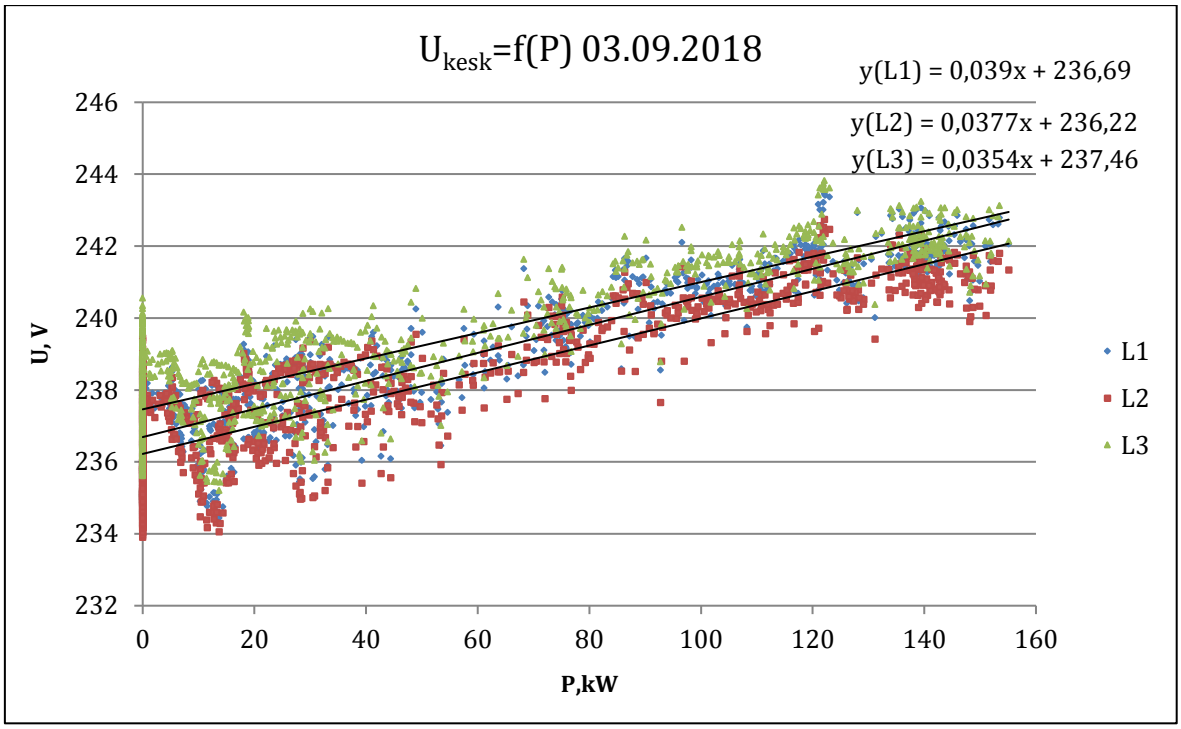
3.2.2 03.09.2018 mõõtetulemused

3. septembril oli päikeseelektrijaama väljundvõimsus väga kõikuv ehk päikese ette ilmus tihti suuremaid pilvi, mis peagi liikusid eest ära. Riigi Ilmateenistuse vaatlusandmete järgi Kuusiku vaatluspunktis oli 3. septembril 2018. aastal poolpilves ilm ja päevane õhutemperatuur kuni 20°C. Pilvisuse astmeks on hinnatud 4/10.[11]

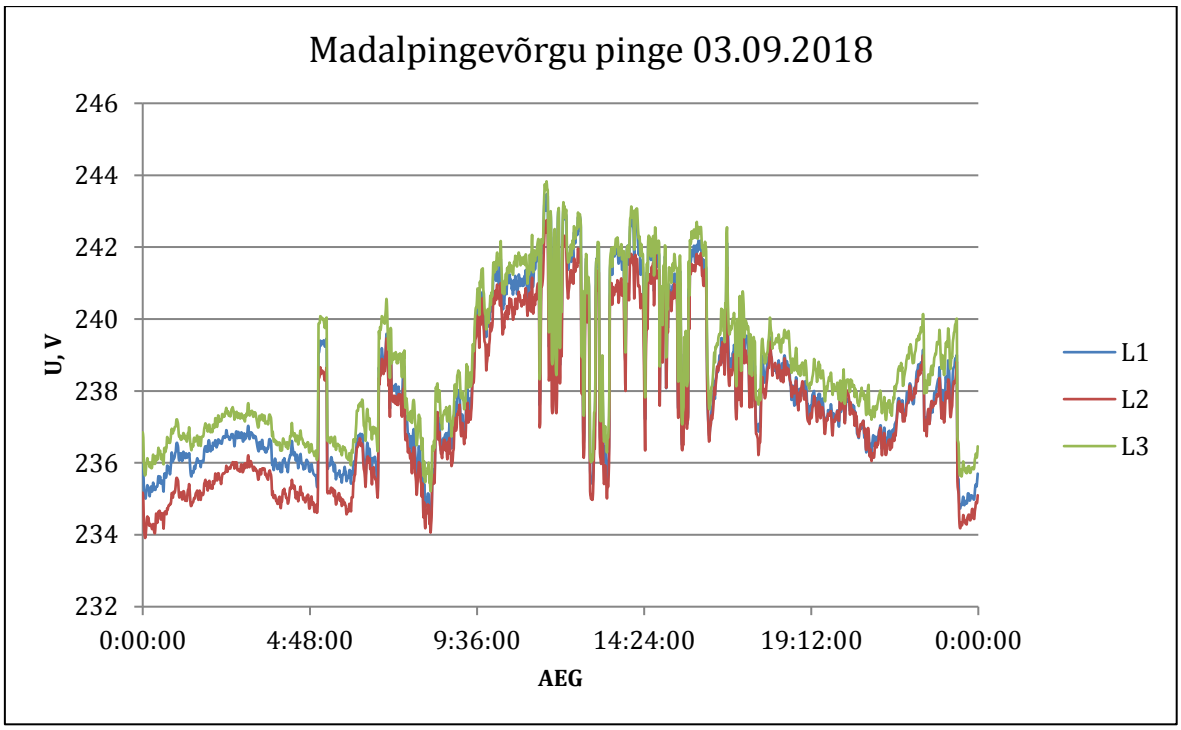
Allpool joonistel 3.20...3.25 on toodud mõõtetulemused 3. septembril salvestatud andmetest.



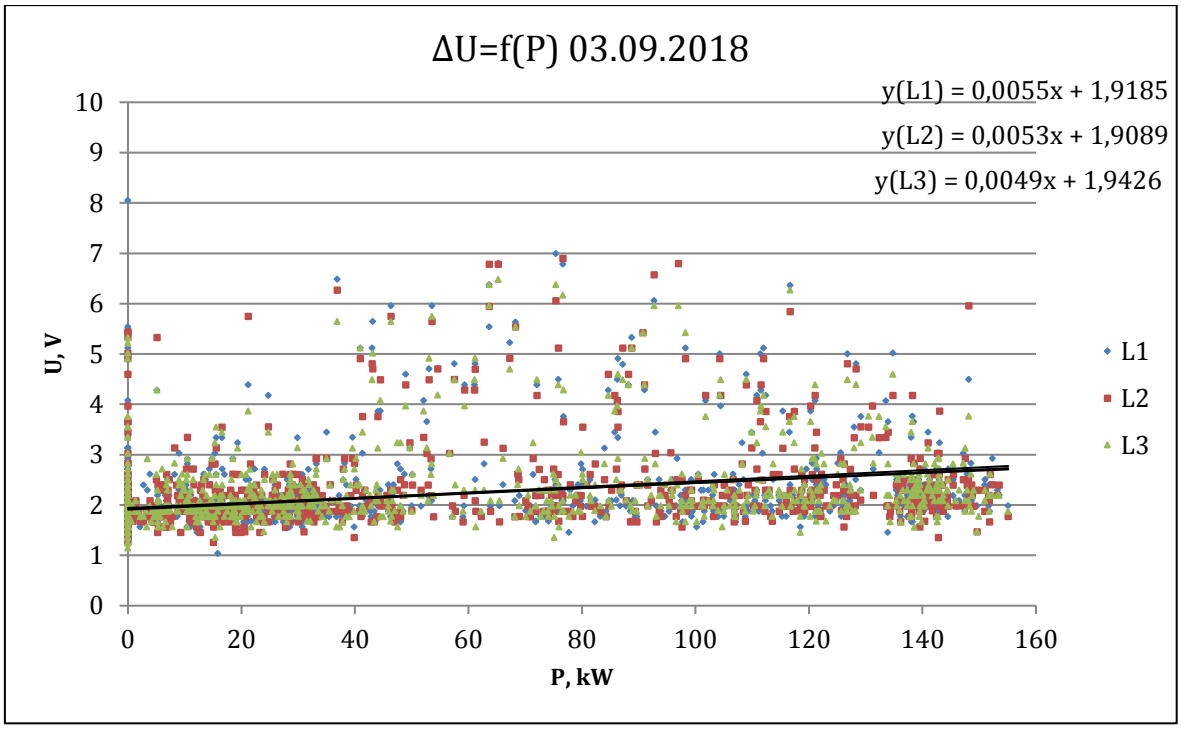
Joonis 3.20. Laastu talu OÜ päikeseelektrijaama väljundvõimsus 03.09.2018



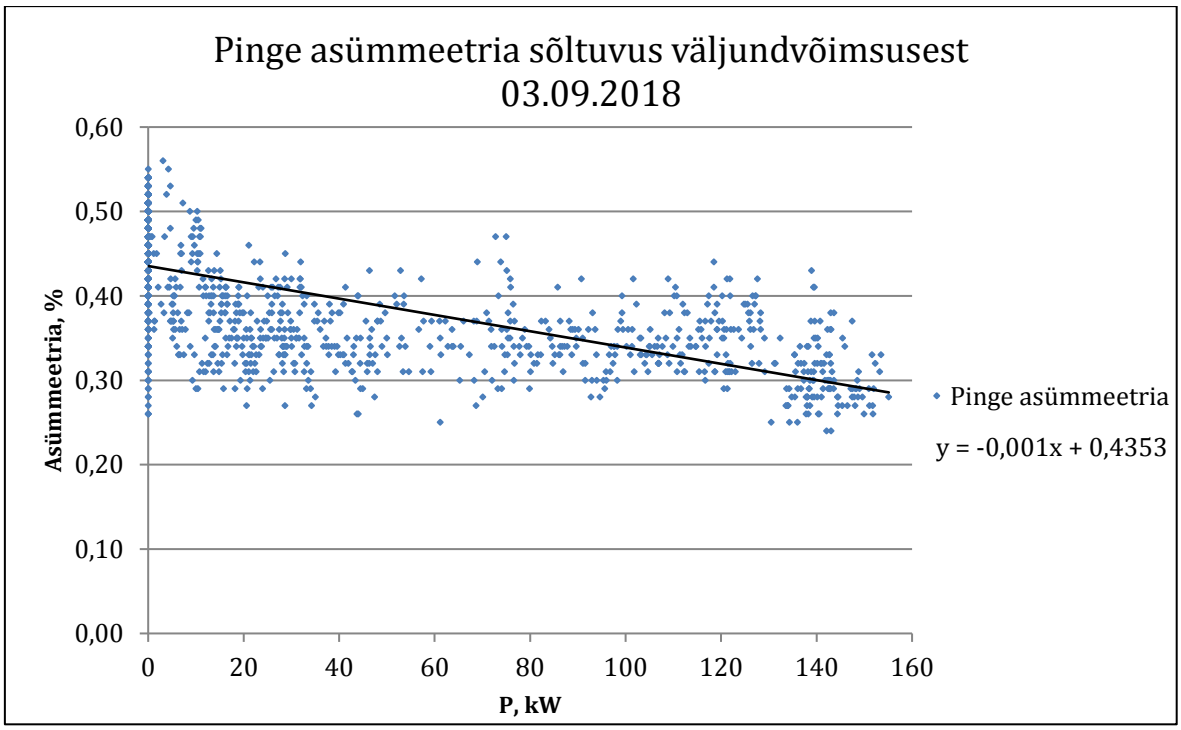
Joonis 3.21. Madalpingevõrgu keskmise pinge sõltuvus päikeseelektrijaama väljundvõimsusest 03.09.2018



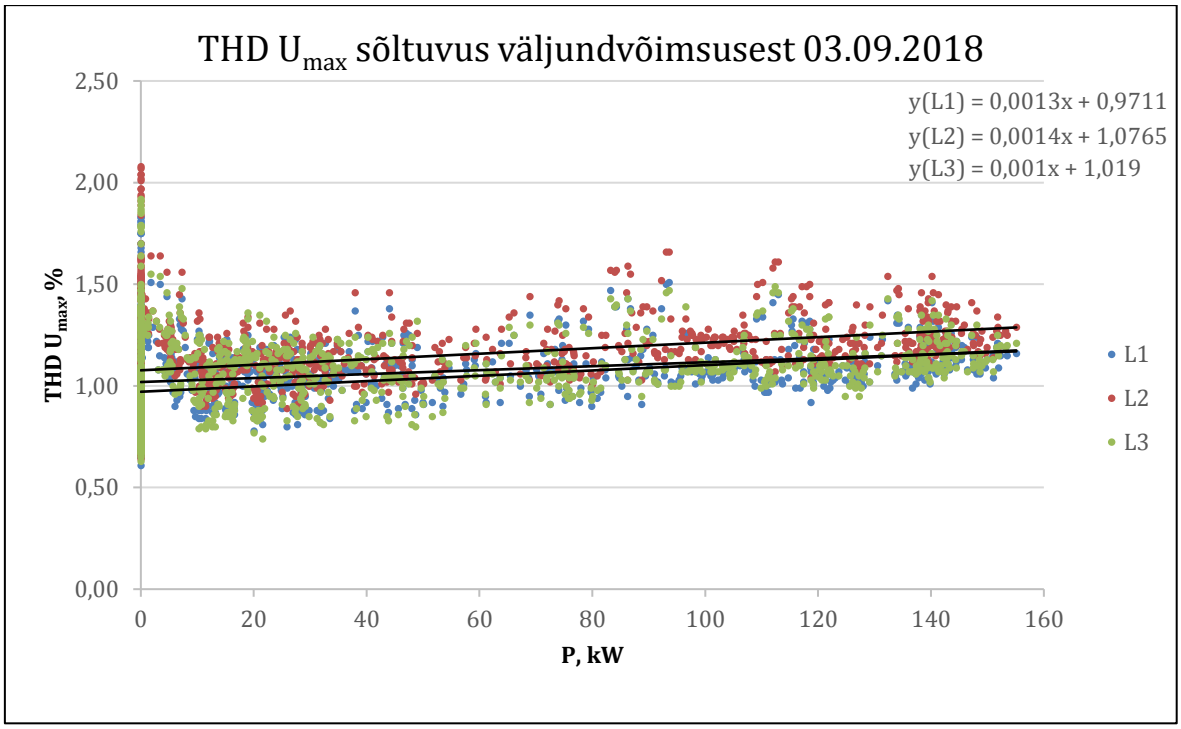
Joonis 3.22. Faasipinged Tiiuvälja alajaama madalpingevõrgus 03.09.2018



Joonis 3.23. Pingete max-min vahe sõltuvus päikeseelektrijaama väljundvõimsusest 03.09.2018



Joonis 3.24. Pinge asümmeetria sõltuvus väljundvõimsusest 03.09.2018



Joonis 3.25. Harmooniliste kogumoonutuste sõltuvus päikeseelektrijaama väljundvõimsusest 03.09.2018

Joonistel 3.20...3.25 on toodud 3. septembril mõõdetud andmed. Antud päeval salvestatud päikeseelektrijaama väljundvõimsus on iseloomulik päevale, kui taevas on mõned rünkpilved, kuid on ka täielikku päikesepaistet elektrijaama paneelidele. Sellisel päeval vaheldub väljundvõimsus maksimumi lähedase ja üsna väikse võimsuse vahel. Antud päeval kõigub Laastu talu OÜ päikeseelektrijaama väljundvõimsus mõnel juhul 25 kW ja 155 kW vahel. Vahe on 130 kW ning muutused toimuvad hüppeliselt. Päeva keskmine tootlikkus on 67,69 kW.

Keskmine pinge tõuseb joonisel 3.21 olevate trendijoonte järgi päikeseelektrijaama väljundvõimsuse kasvades 236,22 V pealt 243,12 V-ni. Üksikutel mõõtmishetkedel muutub pinge vahemikus 234 V kuni 244 V.

Jooniselt 3.22 on näha, kuidas päeva keskel väljundvõimsuse kõikumine mõjutab ka Tiiuvälja alajaama madalpingevõrgus pinget. Päeva esimeses pooles, kui päikeseelektrijaam võrku lisaenergiat ei andnud, muutus võrgupinge väikse amplituudiga. Pärast seda, kui päikeseelektrijaam hakkas tööle, suurenes ka võrgupinge muutumise amplituud. Õhtusel ajal, kui päikeseelektrijaam lõpetas töötamise, muutus ka võrgupinge stabiilsemaks.

Üheminutilise mõõteperioodi maksimum- ja miinimumpingete vahe muutub vahemikus 1,5 V kuni 7 V. Kuni 7 V järsud muutused üheminutilise mõõteperioodi sees toimuvadki siis, kui on järsk väljundvõimsuse muutus. Sellist juhtumit täheldas ka antud lõputöö koostaja päikeseelektrijaamas

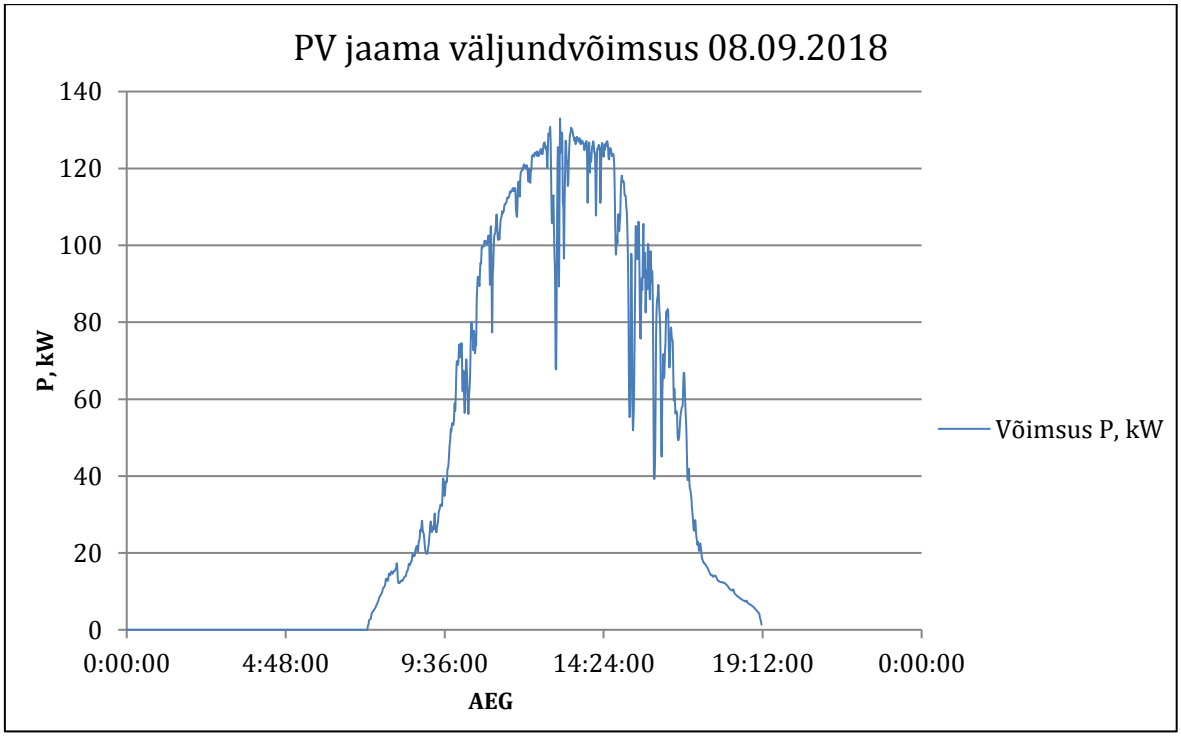
kohapeal olles, kui toimus mõõteandmete salvestamine arvutisse. Päikeselisel päeval, kui ilmusid üksikud suured pilved päikese ette, langes tootlikkus umbes 130 kW sekundi jooksul ja samal ajal langes ka võrgupinge 6,5 V.

Tootlikkuse kasvades vähenes võrgus ka pingete asümmeetria 0,55% pealt 0,25%-ni. Pingete kogu harmooniline moonutus koormuse tõustes kasvab keskmiselt 1% juurest 1,3%-ni ja päevasel ajal kõigub vahemikus 0,75% kuni 1,6%.

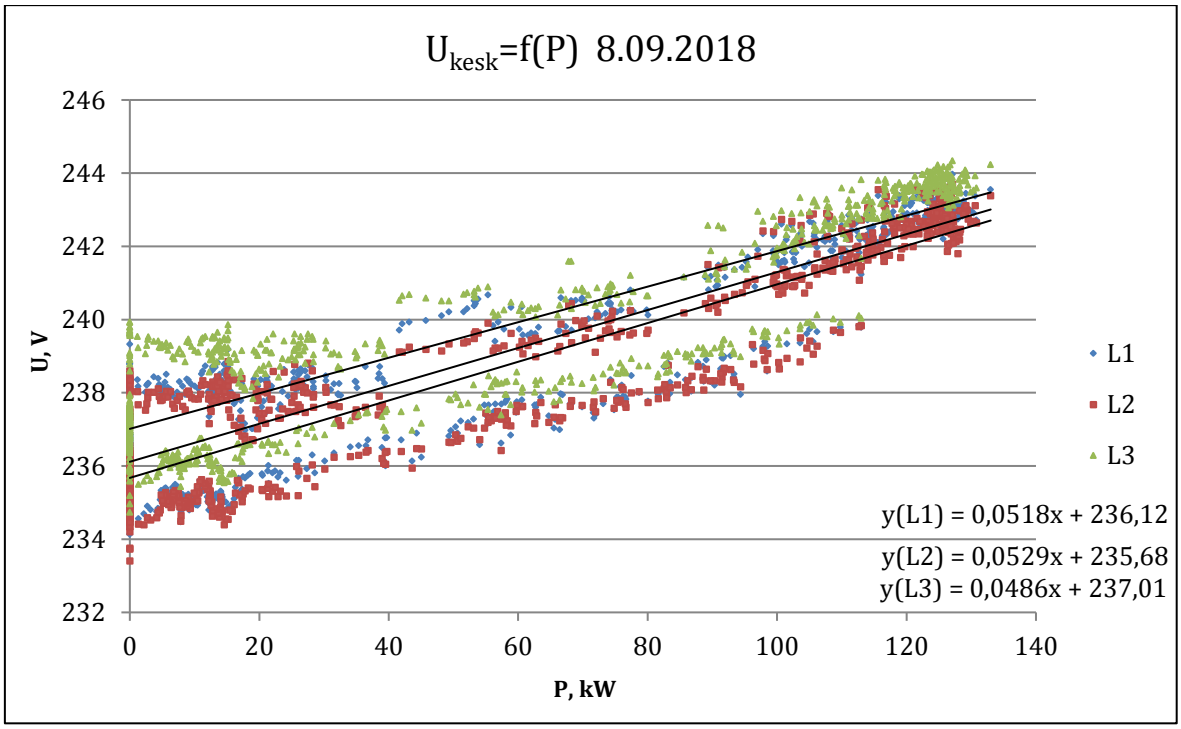
3.2.3 08.09.2018 mõõtetulemused

8. septembril päikeseelektrijaama väljundvõimsus ei muutunud päeva jooksul nii palju suure amplituudiga ehk segavaid pilvi oli taevas vähe. Sama kinnitavad Riigi Ilmateenistuse vaatlusandmed. Kuusiku vaatluspunktis oli 8. septembril 2018. aastal selge ilm väheste pilvedega ja päevane õhutemperatuur kuni 24,5^{o}C. Pilvisuse astmeks on hinnatud 1/10.[11]

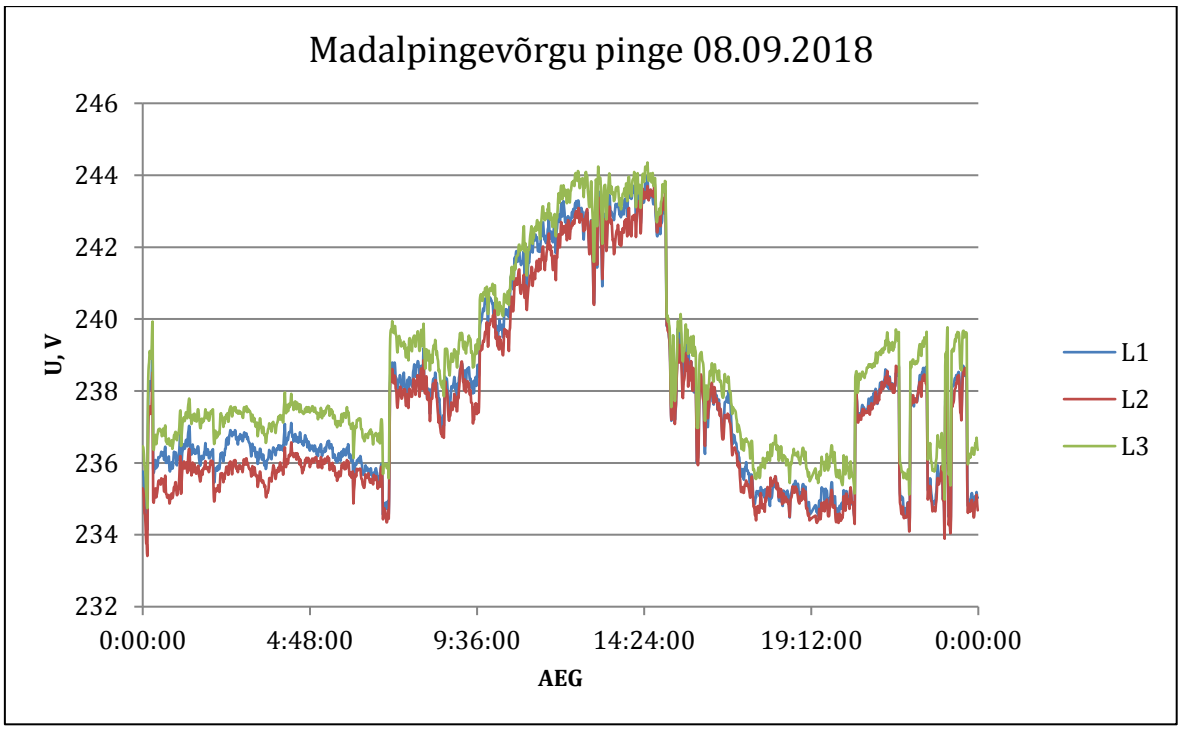
Allpool on toodud joonistel 3.26...3.31 mõõtetulemused 8. septembril salvestatud andmetest.



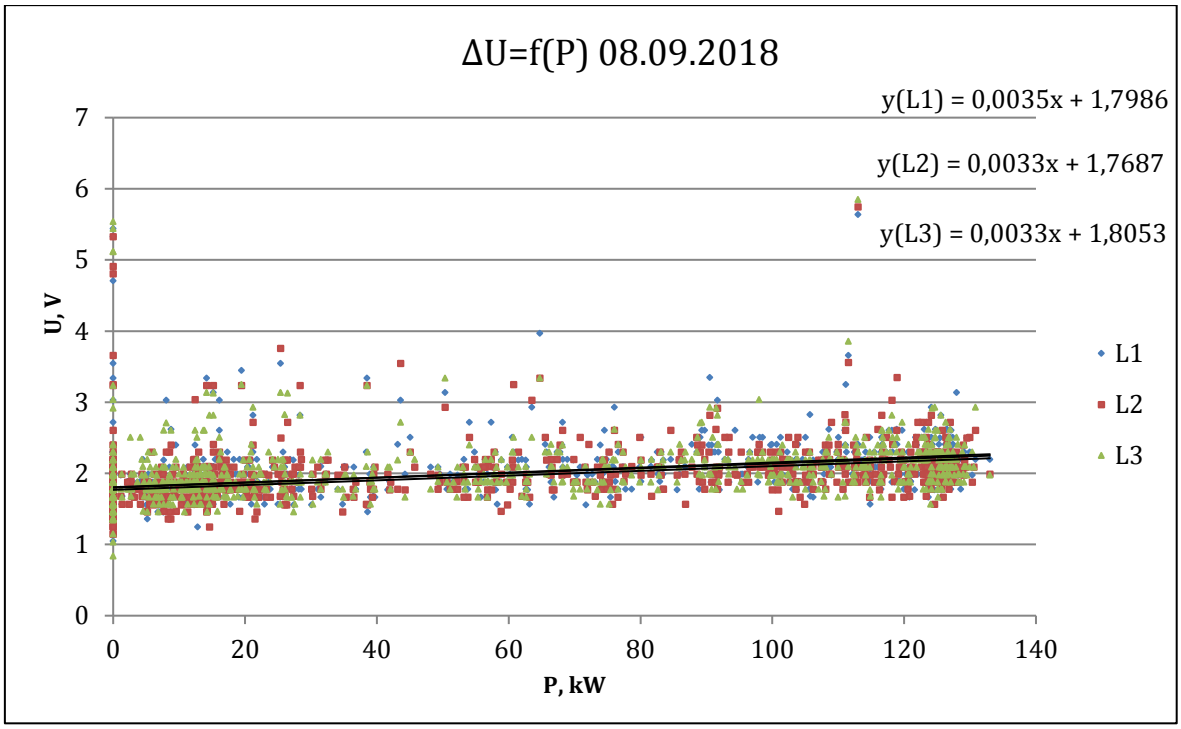
Joonis 3.26. Laastu talu OÜ päikeseelektrijaama väljundvõimsus 08.09.2018



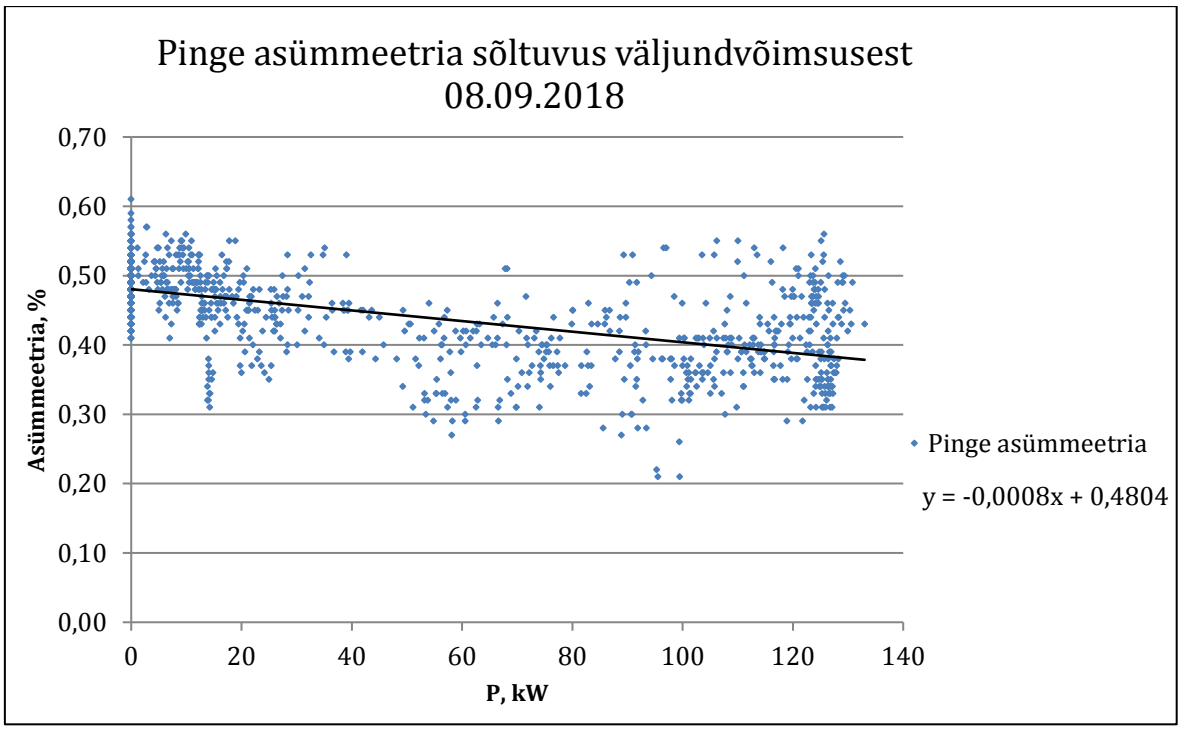
Joonis 3.27. Madalpingevõrgu keskmise pinge sõltuvus päikeseelektrijaama väljundvõimsusest 08.09.2018



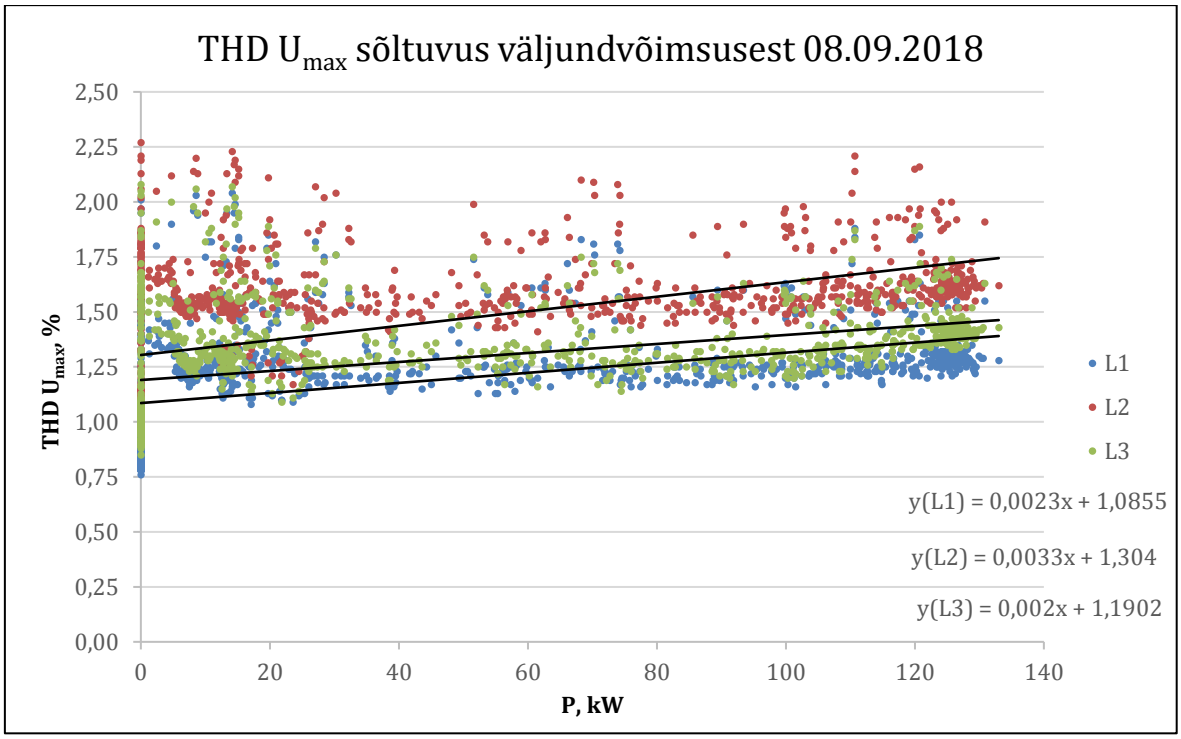
Joonis 3.28. Faasipinged Tiiuvälja alajaama madalpingevõrgus 08.09.2018



Joonis 3.29. Pingete max-min vahe sõltuvus päikeseelektrijaama väljundvõimsusest 08.09.2018



Joonis 3.30. Pingete asümmeetria sõltuvus päikeseelektrijaama väljundvõimsusest 08.09.2018



Joonis 3.31. Harmooniliste kogumoonutuste sõltuvus päikeseelektrijaama väljundvõimsusest 08.09.2018

Joonistel 3.26...3.31 on toodud 8. septembril mõõdetud andmed. Terve mõõteperioodi kolme nädala peale oli ainult kaks päeva, mille tootmisgraafikute abil võib väita, et tegemist oli pilvitu ilmaga. Üheks selliseks päevaks oli 8. september ja teine oli 19. september. Lähemalt otsustati uurida esimest päeva, sest siis oli maksimaalne väljundvõimsus natukene kõrgem. Päeva keskmine tootlikkus oli 66,56 kW. Antud päeva keskmine väljundvõimsus jäi alla 3. septembri keskmisele, kuna 8. septembri maksimaalne võimsus oli 133,00 kW, aga 3. septembril oli 155,11 kW.

Võrgupinge keskmine väärtus muutus päeva jooksul tootlikkuse tõustes keskmiselt 235,68 V pealt 243,33 V-ni. Üksikutel mõõtehetkedel kõikus pinge 234 V ja 244 V piirides sarnaselt 3. septembri mõõtetulemustele. Erinevuseks on see, et 3. septembri mõõtetulemustes on näha, kuidas mõõtepunktide tihedus on ühtlaselt jaotunud ümber trendijoonte. 8. septembri mõõtetulemustel, mis on toodud joonisel 3.26 on näha, et tootlikkuse kasvades on pinge muutumine justkui koondunud kaheks sirgjooneliselt kasvavaks mõõtetulemuste piirkonnaks. Üks võib olla hommikusel ajal päikeseelektrijaama tootlikkuse sujuval tõusmisel tekkiv pinge tõus ja teine mõõtetulemuste piirkond õhtusel ajal tootlikkuse langemisel tekkiv sujuv võrgupinge langemine.

Joonisel 3.28 on näha, et terve päeva vältel on 1 minuti keskmine võrgupinge olnud üsna stabiilne ja ei ole muutunud nii suure amplituudiga nagu joonisel 3.22. Selle põhjuseks võib lugeda

päikeseelektrijaama ühtlaselt suur väljundvõimsus. Seega võib vahelduva pilvisusega ilm mõjutada võrgupinge kvaliteeti halvasti.

Antud teooriat, et selge ilmaga on võrgupinge stabiilsem toetab ka joonis 3.27, kus on toodud minutilise mõõtevahemiku pinge maksimum- ja miinimumväärtusevahe. Sealt on näha, et pinge on kõikunud minutise perioodi jooksul üle 3 V üksikutel juhtudel. Seega pilvitu ilma korral, kui päikeseelektrijaama tootlikkus ei kõigu suure amplituudiga on ka võrgupinge stabiilsem.

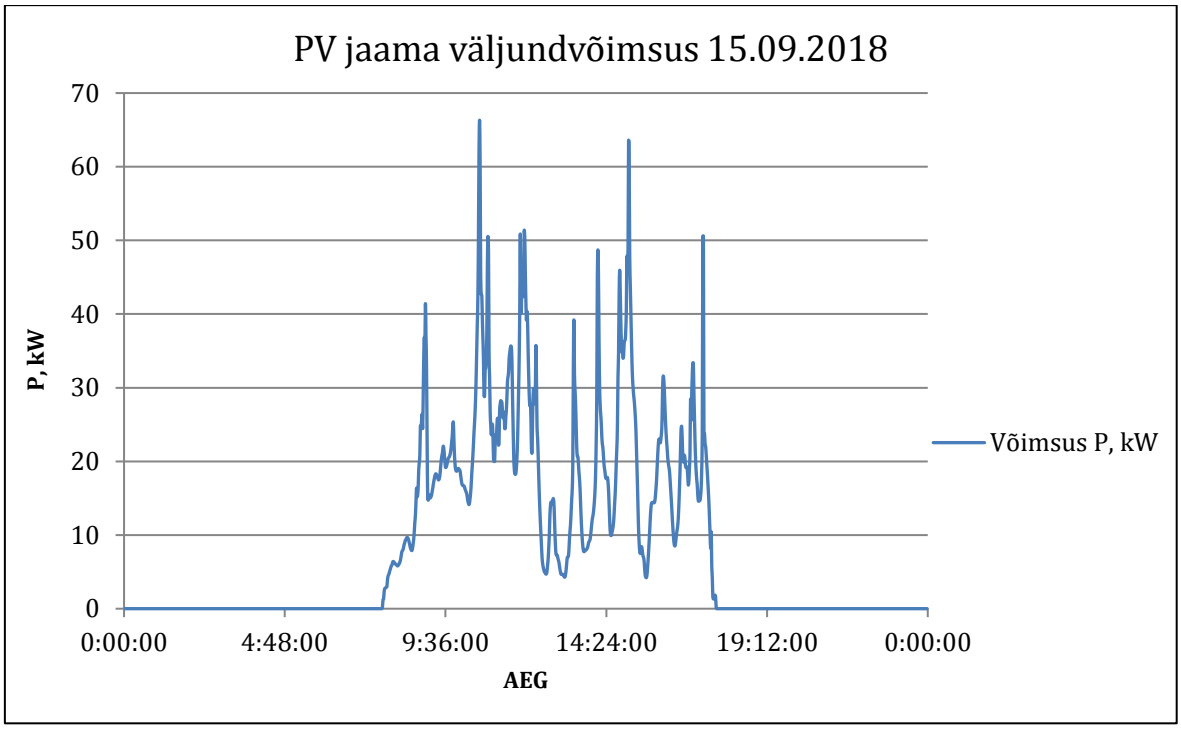
Pingete asümmeetria muutub vahemikus 0,3% kuni 0,55%. Kui joonisel 3.24 on võimalik näha tootlikkuse tõustes asümmeetria selget vähenemist, siis joonisel 3.30 asümmeetria küll väheneb, aga maksimaalse tootlikkuse juures kõigub suurema amplituudiga. Üheks põhjenduseks võib olla asjaolu, et selge ilmaga tehtud mõõtmistel on maksimaaltootlikkuse juures rohkem mõõtetulemusi asümmeetria hindamiseks. Joonisel 3.24 esitatud tulemustel töötas päikeseelektrijaam vähemat aega maksimaalse tootlikkusega.

Pingete harmoonilised kogumoonutused päikeseelektrijaama väljundvõimsuse kasvamisega tõusid keskmiselt 1,086% pealt 1,733%-ni. Kogu päeva vältel kõikusid mõõtetulemused vahemikus 1,08% ja 2,3% vahel.

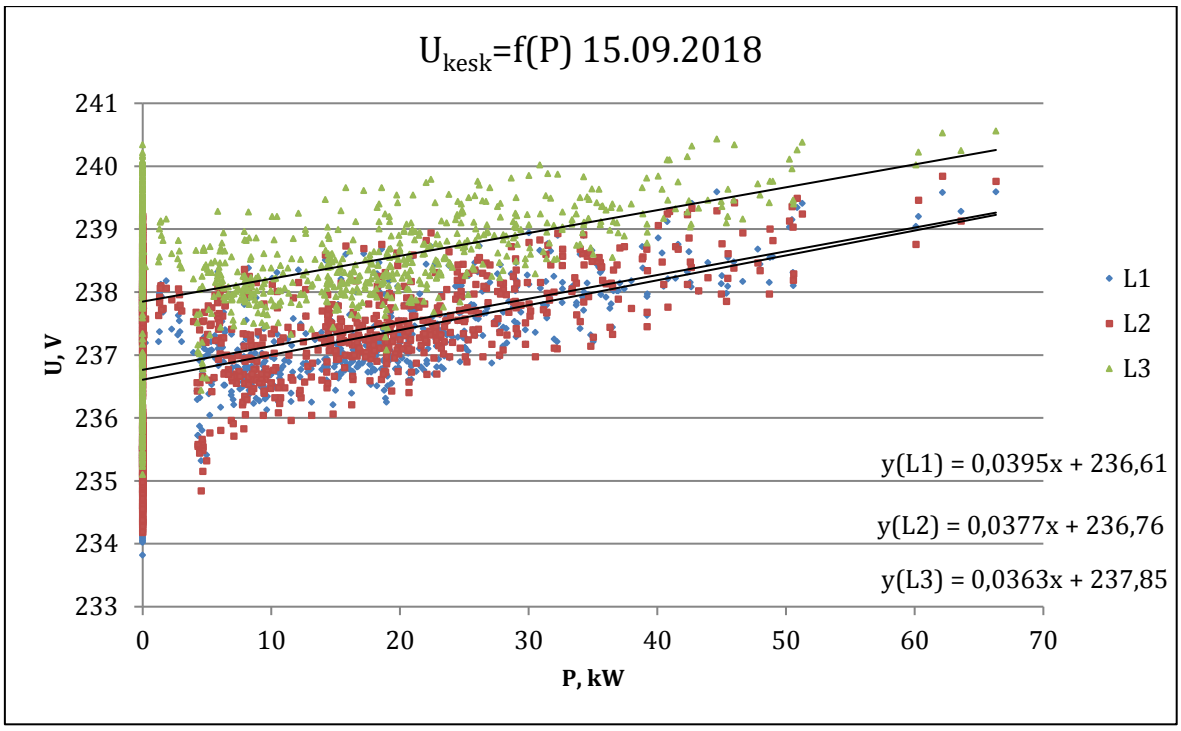
3.2.4 15.09.2018 mõõtetulemused

15. septembril oli päikeseelektrijaama keskmine väljundvõimsus madal ja võib eeldada, et oli pilvine ilm. Riigi Ilmateenistuse vaatlusandmete järgi oli Kuusiku vaatluspunktis 15. septembril 2018. aastal õhutemperatuur kuni 16°C ja mõõduka vihmaga pilves ilm. Pilvisuse astmeks on hinnatud 9/10.[11]

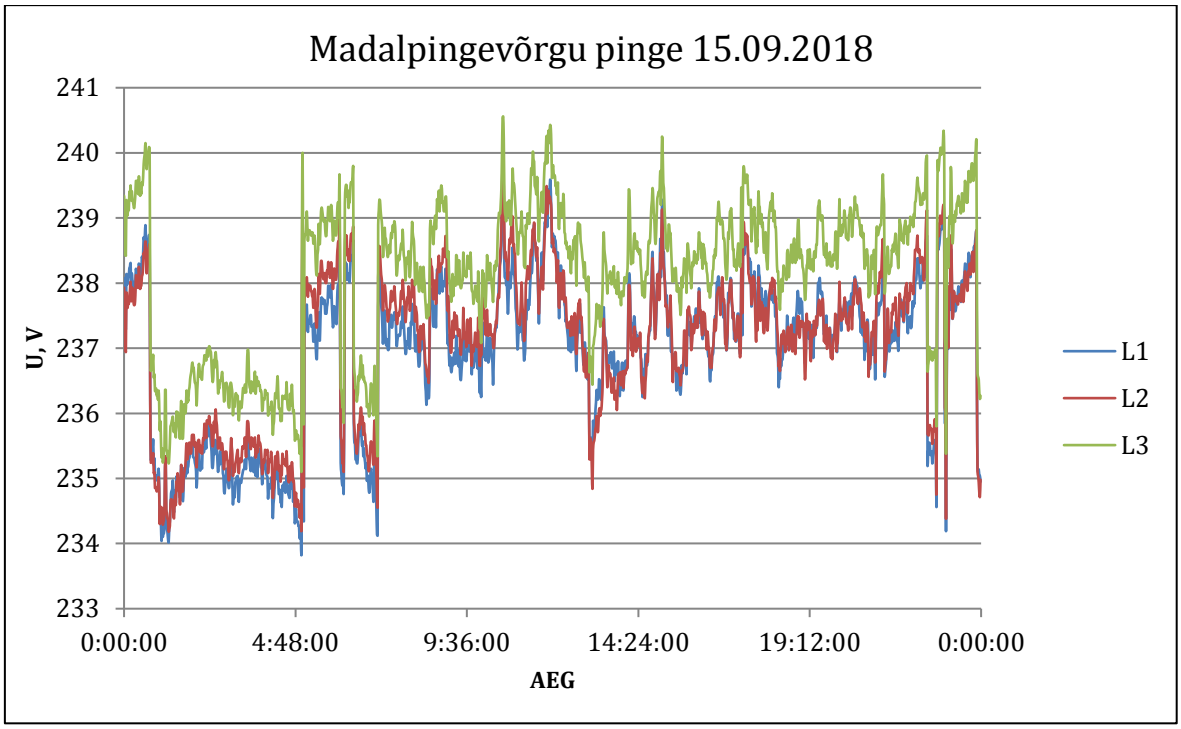
Joonistel 3.32...3.37 on toodud mõõtetulemused 15.09.2018 salvestatud andmetest.



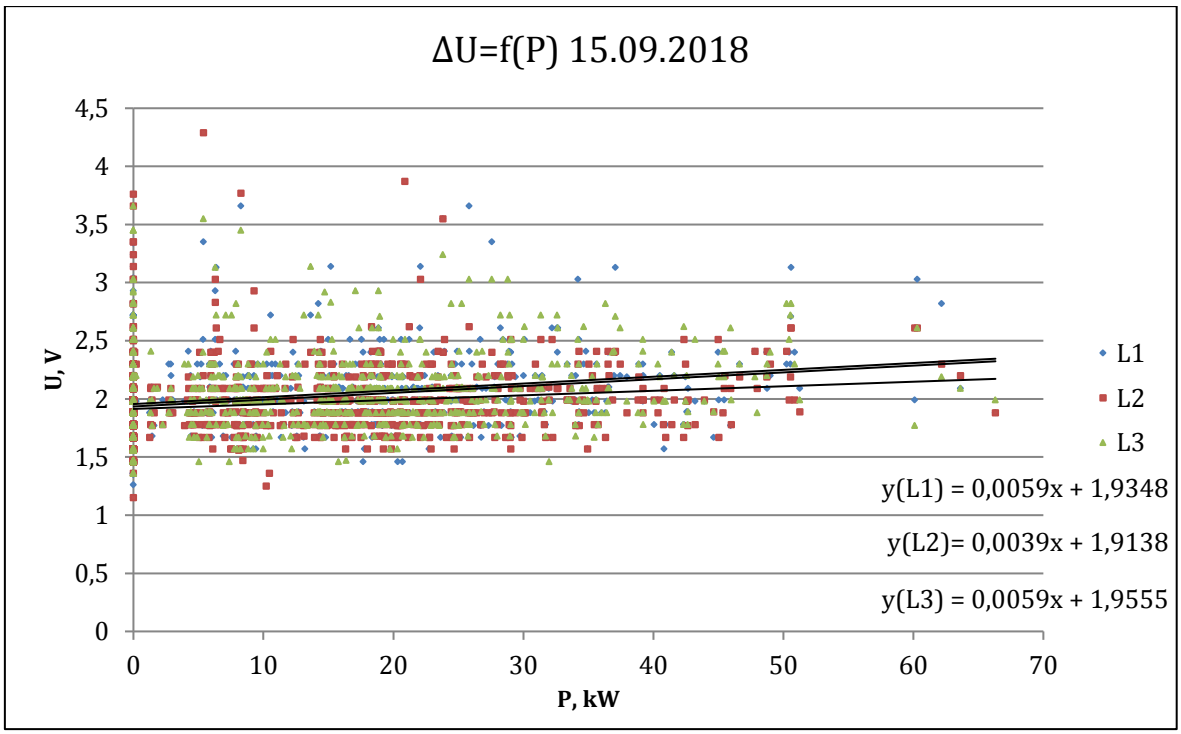
Joonis 3.32. Laastu talu OÜ päikeseelektrijaama väljundvõimsus 15.09.2018



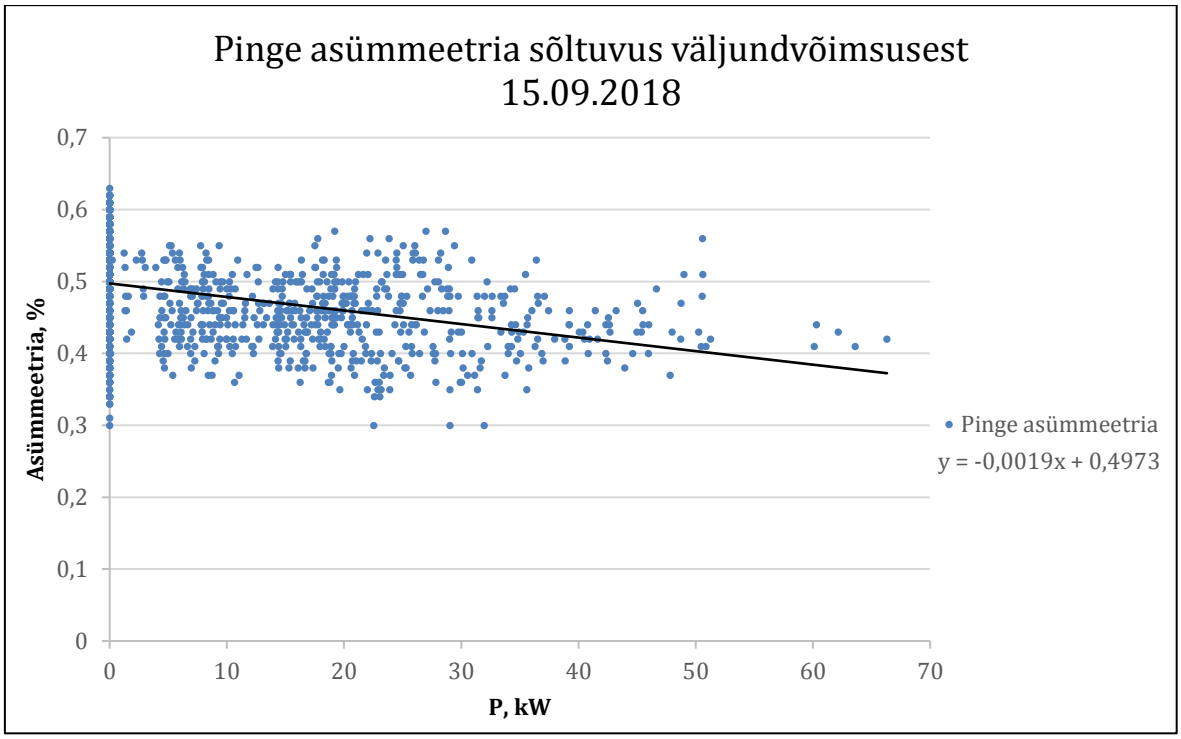
Joonis 3.33. Madalpingevõrgu keskmise pinge sõltuvus päikeseelektrijaama väljundvõimsusest 15.09.2018



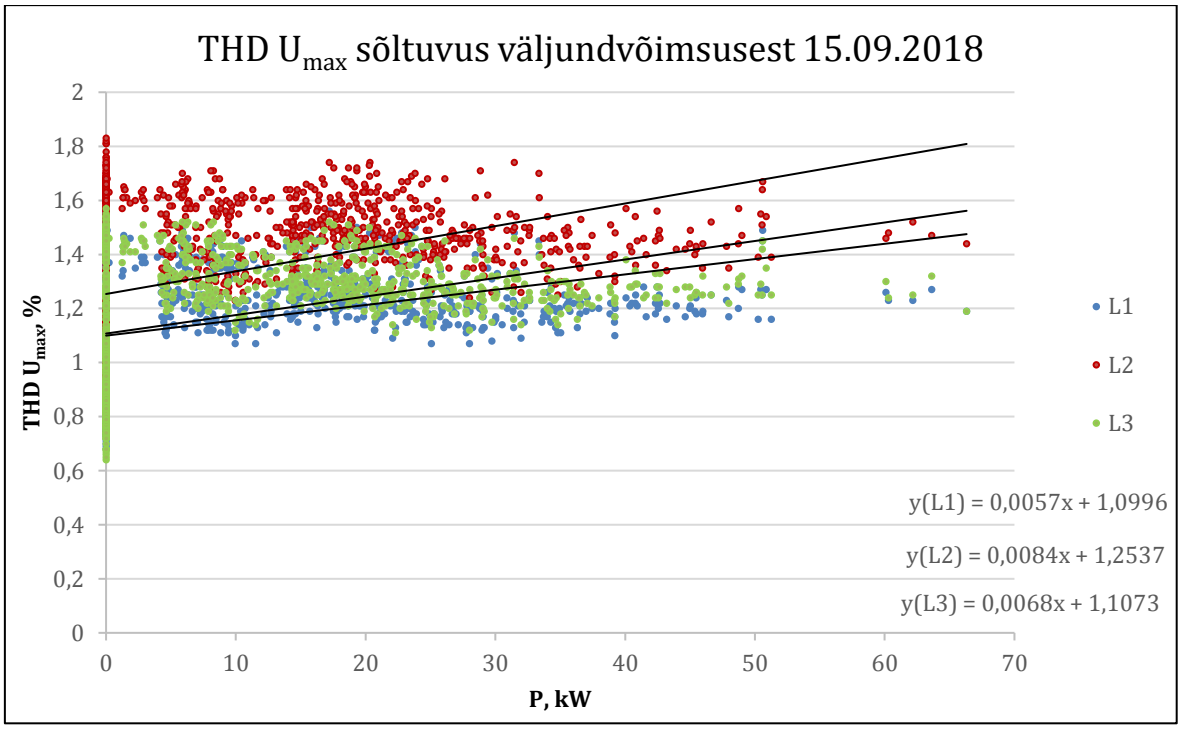
Joonis 3.34. Faasipinged Tiiuvälja alajaama madalpingevõrgus 15.09.2018



Joonis 3.35. Pingete max-min vahe sõltuvus päikeseelektrijaama väljundvõimsusest 15.09.2018



Joonis 3.36. Pinge asümmeetria sõltuvus päikeseelektrijaama väljundvõimsusest 15.09.2018



Joonis 3.37. Harmooniliste kogumoonutuste sõltuvus päikeseelektrijaama väljundvõimsusest 15.09.2018

15. septembril oli keskmine väljundvõimsus päeva jooksul 19,67 kW. Kõige suurem väljundvõimsus päeva jooksul oli kell 10:37 hetkeks 66,31 kW. Keskmise pinge trendijooned väljundvõimsuse tõusuga suurenesid 236,61 V pealt 240,21 V-ni. Üksikutel mõõtehetkedel muutus pinge vahemikus

234 V kuni 240,5 V. Kuna päikeseelektrijaama väljundvõimsus oli väike, muutusid ka pinge väärtused pigem väikses amplituudis.

Joonisel 3.34 on näha, et päeva lõikes võrgupinge on üsna ühtse profiiliga kõikuv. Kuna keskmine päikeseelektrijaama väljundvõimsus on väike, ei avalda see nii suurt mõju võrgupinge muutusele nagu eelnevad kaks päeva, mida vaadeldi lähemalt. Kui aga võrrelda jooniseid 3.28 ja 3.34, on joonisel 3.34 võrgupinge kõikumine suurem. Siit võib järeldada, et Laastu talu päikeseelektrijaama stabiilne elektritootmine aitab hoida Tiiuvälja alajaama madalpingevõrgus ühtlasemat pingetaset.

Kuna päikeseelektrijaama väljundvõimsuses ei olnud suure amplituudiga kõikumisi, ei olnud suuri hüppeid ka maksimaalse ja minimaalse pinge väärtuse vahel minutilistes mõõtevahemikes. Jooniselt 3.35 on näha, et muutus jääb enamasti 1,5 V kuni 3 V-ni. Pingete asümmeetria vähenes tootlikkuse tõustes 0,6%-lt 0,3%-ni.

Pingete harmoonilised kogumoonutused jäi kogu päeva jooksul vahemikku 1% kuni 1,7%. Joonisel 3.37 toodud pingete harmooniliste kogumoonutusete trendijooned on kasvavad aga kui vaadelda väljundvõimsuse suurenedes harmoonilise moonutuse mõõtetulemusi, on need pigem horisontaalsed. Trendijooned on kasvavad sellepärast, et öisel ajal, kui päikeseelektrijaam oli 0 kW väljundvõimsusega, oli pingete harmoonilised kogumoonutused päevasest tasemest madalam.

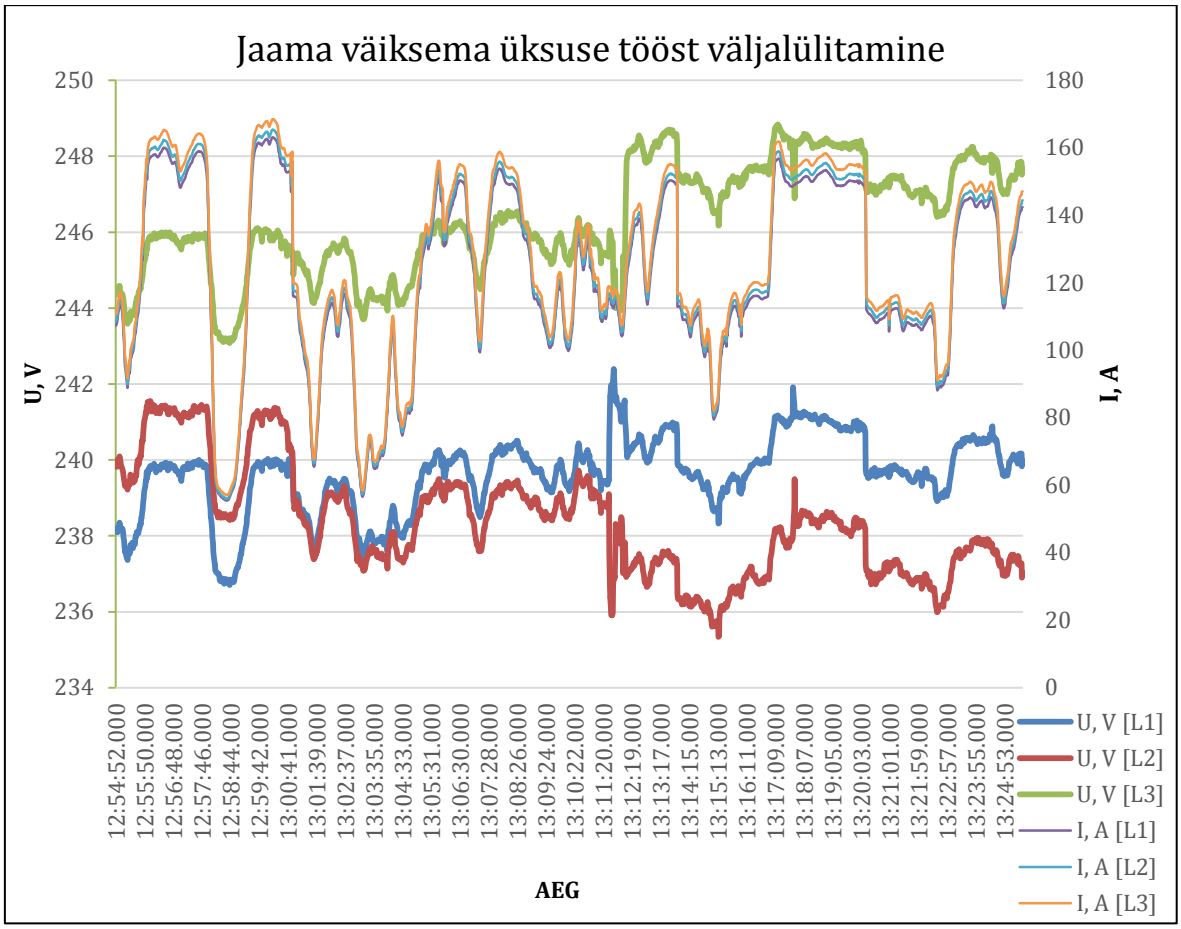
3.2.5 14.10.2018 katseliste lülitamiste mõõteandmed

14. oktoobril 2018 teostati Laastu talu OÜ päikeseelektrijaamas mõõtmisi elektrijaama katselise väljalülitamistega. Kõige efektiivsemaks viisiks teostada väljalülitamisi oli peajaotuskilbis kaitseautomaadi ja sulavkaitsmete ploki välja lülitamine, mida on võimalik näha joonisel 3.1. Mõõtmised teostati A-Eberle mõõteseadmega, mis salvestas ka iga kahe minuti järel 1 sekundi pikkuse lõigu andmeid ostsillograafiga.

Peajaotuskilbis koondusid kaks 20 kVA inverterist tulevad juhtmed ühe kaitseautomaadi klemmide alla ja ülejäänud neli 30 kVA inverterist tulevad juhtmed koondusid teise kaitseautomaadi alla. Mõlemast kaitseautomaadist väljusid juhtmed neid faaside kaupa koondavate klemmideni ja sealt läksid juhtmed edasi tervet päikeseelektrijaama kaitsevate sulavkaitsmete plokini, mis lülitati välja terve jaama tööst väljaviimiseks.

Riigi Ilmateenistuse vaatlusandmete järgi oli Kuusiku vaatluspunktis antud päeval mõõtmiste teostamise ajal selge ilm ja õhutemperatuur 17,5^{o}C. Pilvisuse astmeks on hinnatud 0/10.[11]

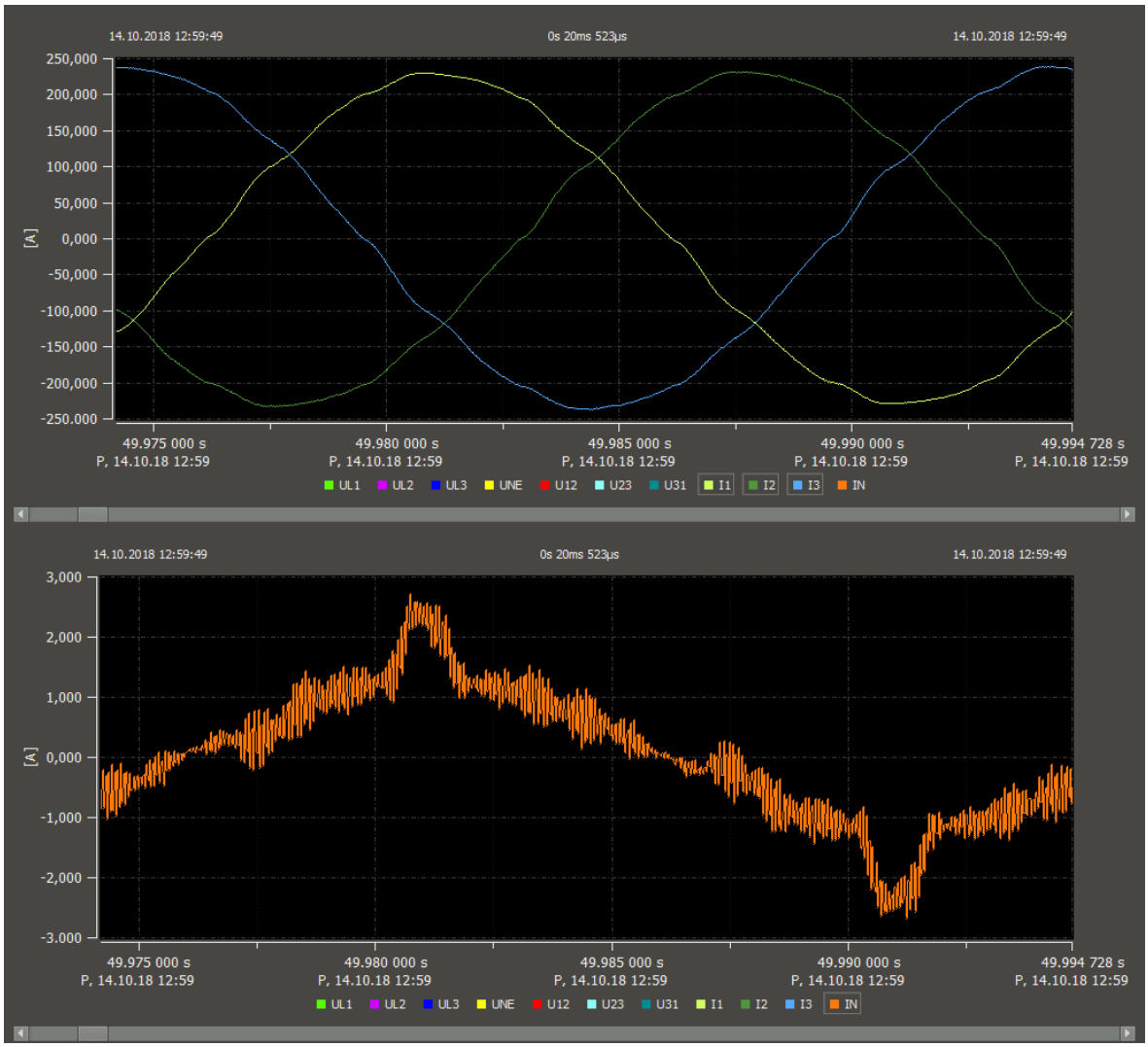
Allpool joonisel 3.38 on esitatud katseliste lülitamiste esimese osa ehk väiksema tootmisüksuse eraldamise katsete pinge ja voolu mõõtetulemused.



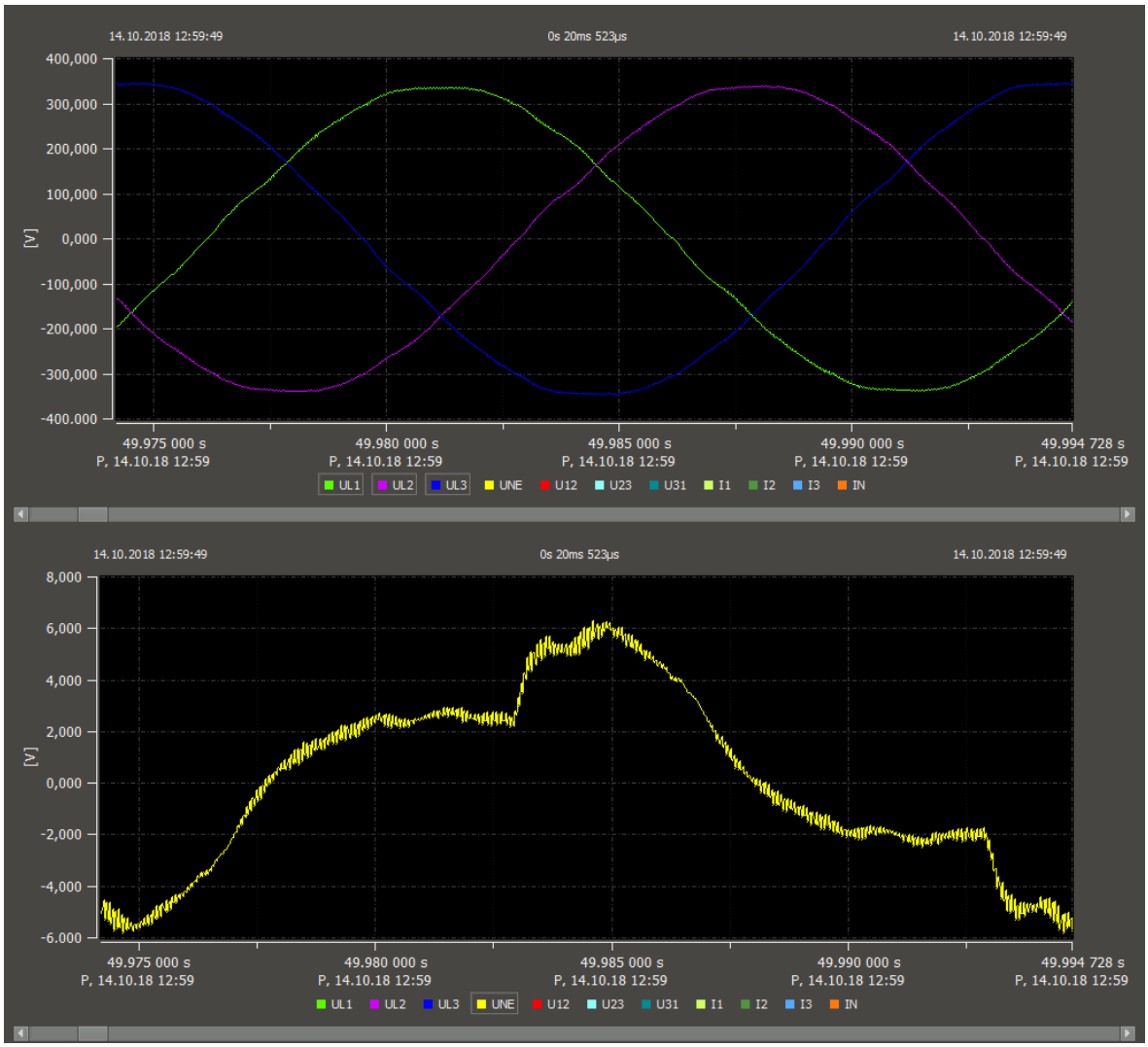
Joonis 3.38. 2x20 kVA inverterite väljalülitamine lühiajaliselt

Joonisel 3.38 on toodud väiksema tootmisüksuse väljalülitamisperioodil salvestatud pinge ja voolu mõõteandmed. Esimene väljalülitamine toimus kell 13:00, teine kell 13:13 ja kolmas kell 13:20. Graafikult on näha, et tootmise järsk vähenemine avaldab kohest mõju ka pingele. Kuna kaks väiksemat inverterit kokku moodustab ainult 25% tervest jaamast, on muutused graafikul üsna väiksed. Pärast väljalülitamist oodati umbes pool minutit ja seejärel lülitati kaitseautomaat uuesti sisse. Esimese ja teise väljalülitamise vahe venis pikemaks, sest pilved ilmusid päikesepaneelide ja päikse vahele ning jaama väljundvõimsus ei olnud maksimaalne, mis sel päeval võimalik.

Joonistel 3.39 ja 3.44 on toodud ostsillograafi väljavõtted pinge ja voolu kujust erinevate väljundvõimsuste korral. Joonisel 3.39 ja 3.40 on toodud suure väljundvõimsuse, joonistel 3.41 ja 3.42 keskmise ning joonistel 3.43 ja 3.44 madala väljundvõimsuse korral.



Joonis 3.39. Ühe perioodi kolme faasi (ülemine pilt) ja PEN-juhi (alumine pilt) voolu kuju suure väljundvõimsuse korral

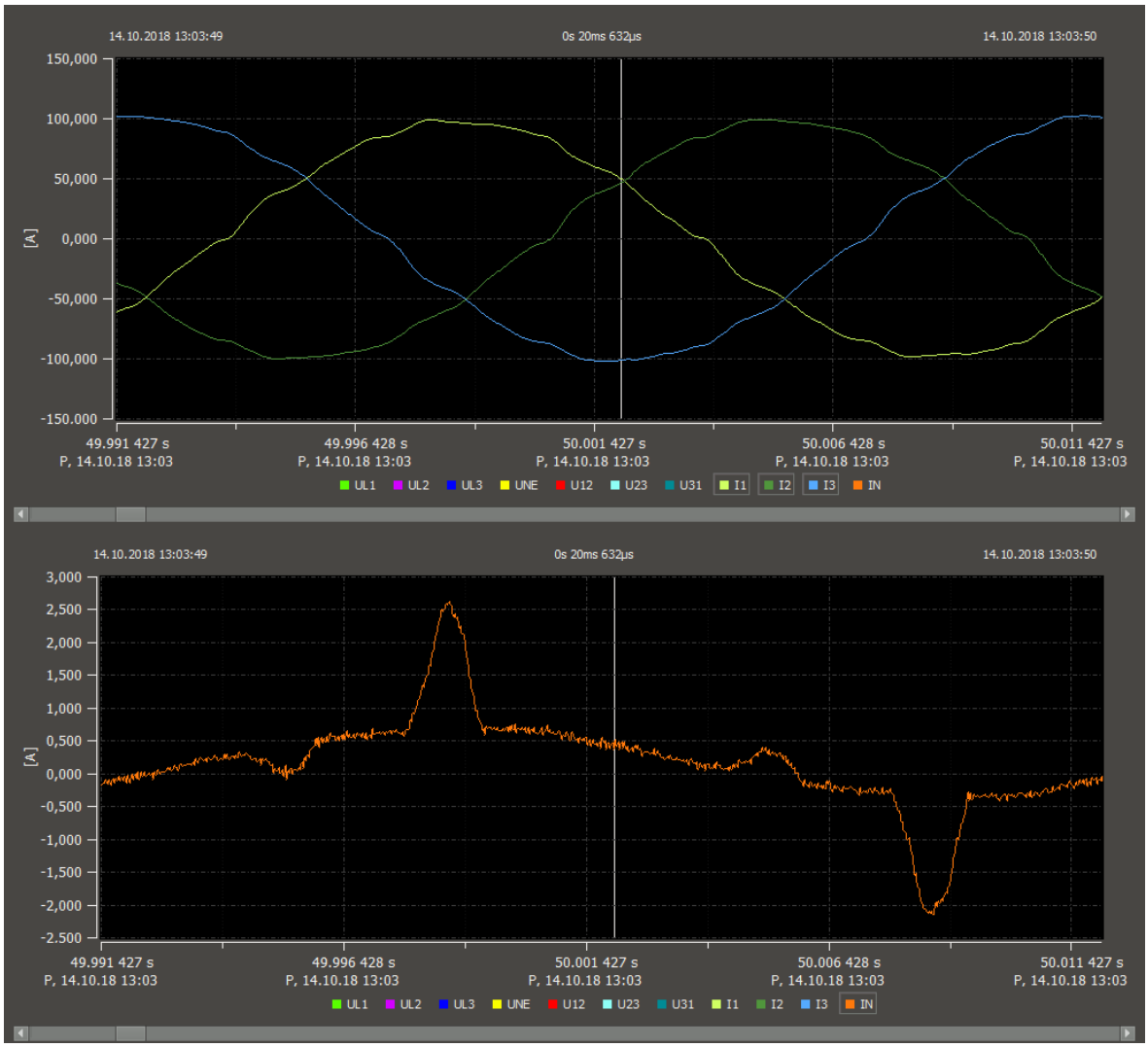


Joonis 3.40. Ühe perioodi kolme faasi (ülemine pilt) ja PEN-juhi (alumine pilt) pinge kuju suure väljundvõimsuse korral

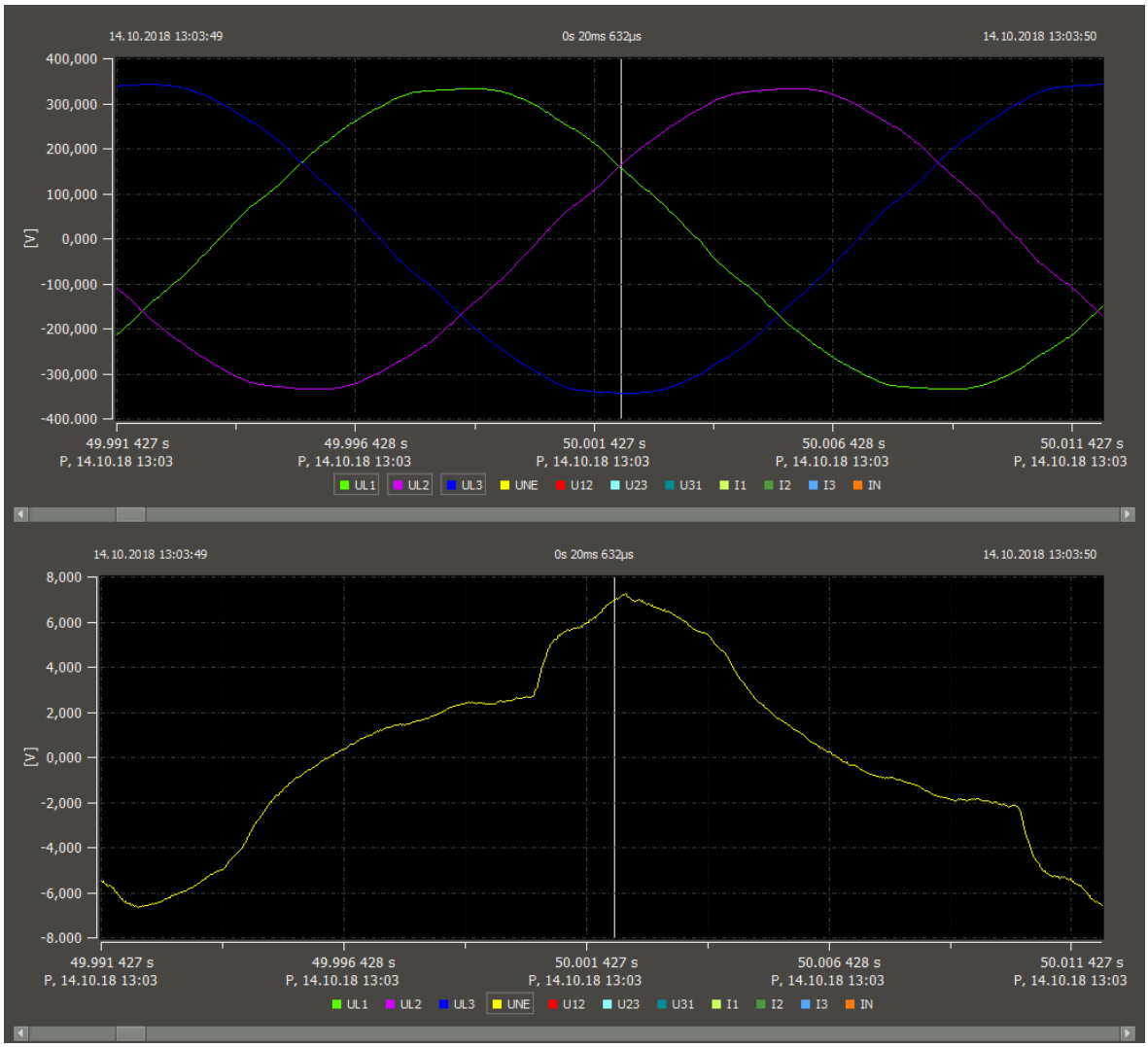
Joonistel 3.39 ja 3.40 on toodud välja ühe perioodi pikkune lõik pinge ja voolu siinusest. Mõlemal joonisel on näha, et faasides voolu ja pinge siinuskujus erilisi moonutusi ei ole. Pingete siinus on sujuvam voolude omast, kuid vahe on väga väike.

Joonise 3.39 PEN-juhi voolu pildil on näha, et toimub umbes 1A ulatuses värelemine kõrge sagedusega. Ühe perioodi lõigust on võimalik täheldada ka seda, et PEN-juhi vool on L1 faasi vooluga samas faasis ehk siis, kui L1 faasi vool on maksimumis on ka PEN-juhi vool maksimumis.

Joonise 3.40 PEN-juhi pinge pildil on näha, et sarnaselt voolule nii suurt värelemist ei ole. Küll aga on muutumine ühe perioodi lõikes hüppeline. Kui PEN-juhi vool oli ühe faasiga samas taktis suurenev, siis PEN-juhi pinge on maksimumis sellel hetkel, kui L1 ja L2 pingete jooned ristuvad.



Joonis 3.41. Ühe perioodi kolme faasi (ülemine pilt) ja PEN-juhi (alumine pilt) voolu kuju keskmise väljundvõimsuse korral

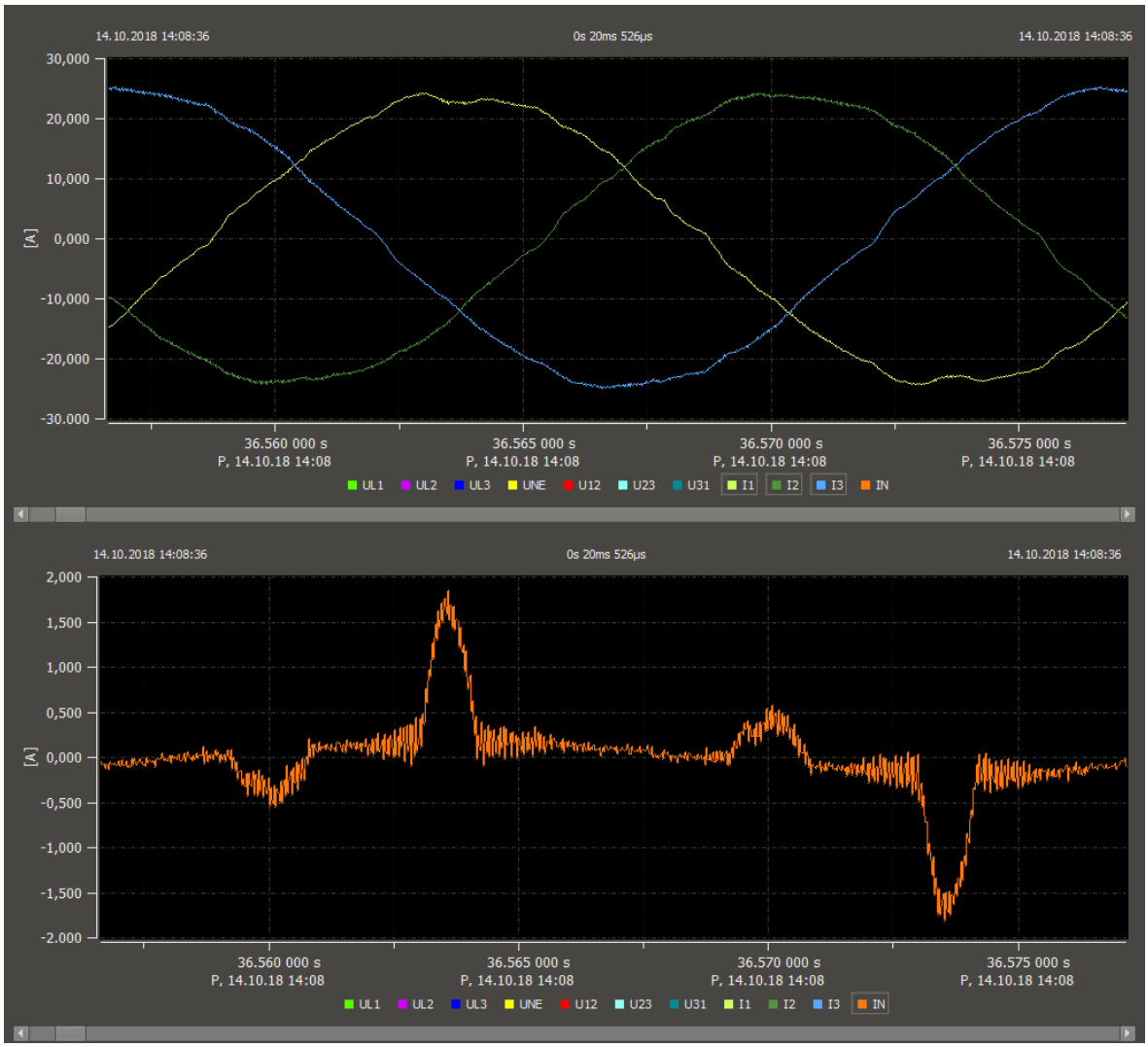


Joonis 3.42. Ühe perioodi kolme faasi (ülemine pilt) ja PEN-juhi (alumine pilt) pinge kuju keskmise väljundvõimsuse korral

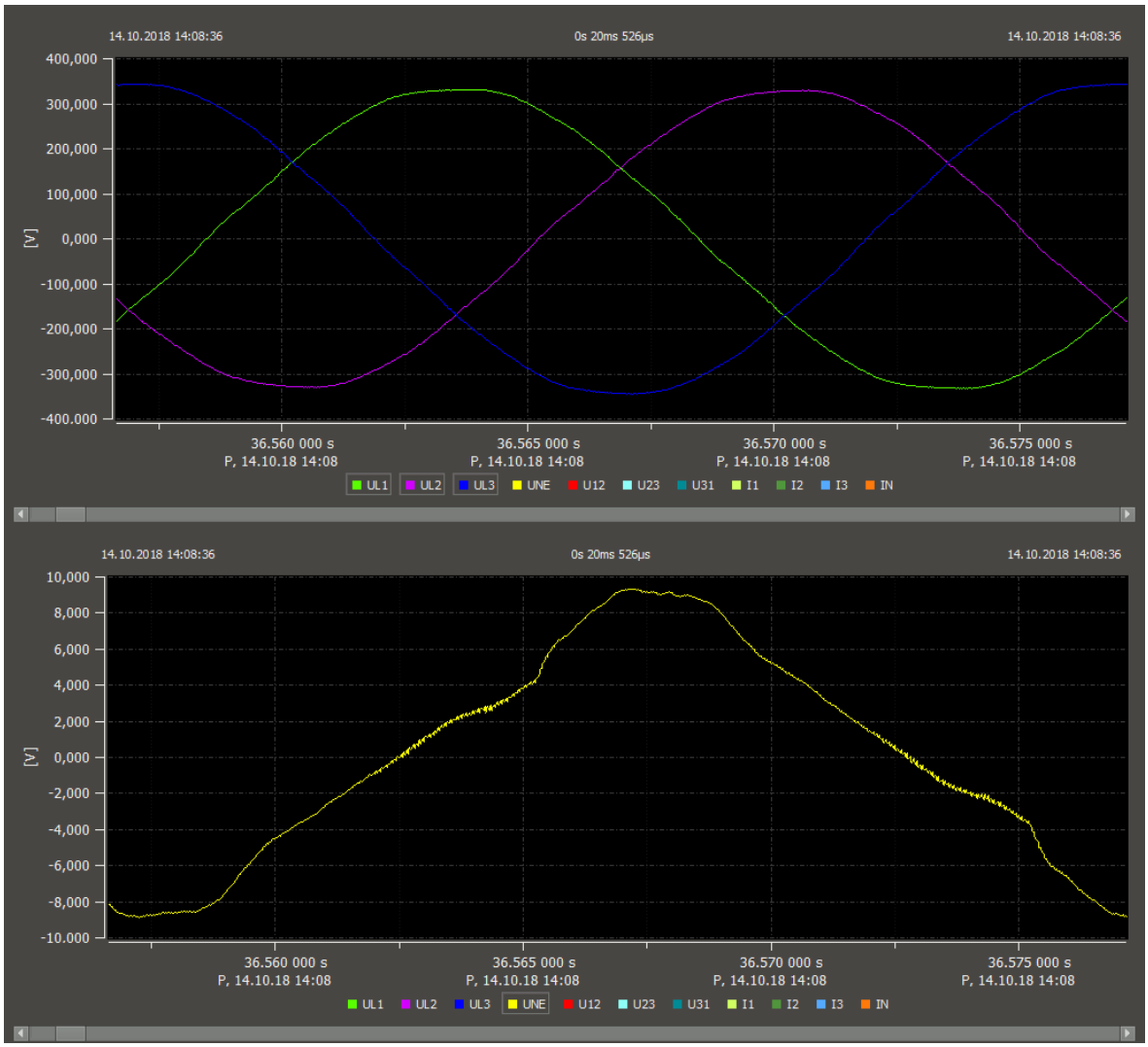
Joonisel 3.41 ja 3.42 on toodud samad graafikud nagu joonistel 3.39 ja 3.40, kuid hetkel, mil päikeseelektrijaama väljundvõimsus oli eelnevast olukorrast poole väiksem. Oluline erinevus, mis on kohe näha tuleb PEN-juhi voolu ja pinge piltidelt. Joonistel 3.39 ja 3.40 oli näha kõrge sagedusega värelemist, aga joonistel 3.41 ja 3.42 on PEN-juhi jooned palju selgemad. Pinge pildil pole värelemist üldse näha.

Joonisel 3.41 PEN-juhi voolu pildil maksimumväärtus on samaks jäänud, aga voolu kuju siinuseline võnkumine on jäänud väiksemaks ja maksimumide väärtused on põhifoonist rohkem esile kerkinud.

Joonisel 3.42 on näha, et PEN-juhi pinge kuju on samaks jäänud, kuid maksimum on ligikaudu 1 V võrra tõusnud.



Joonis 3.43. Ühe perioodi kolme faasi (ülemine pilt) ja PEN-juhi (alumine pilt) voolu kuju madala väljundvõimsuse korral



Joonis 3.44. Ühe perioodi kolme faasi (ülemine pilt) ja PEN-juhi (alumine pilt) pinge kuju madala väljundvõimsuse korral

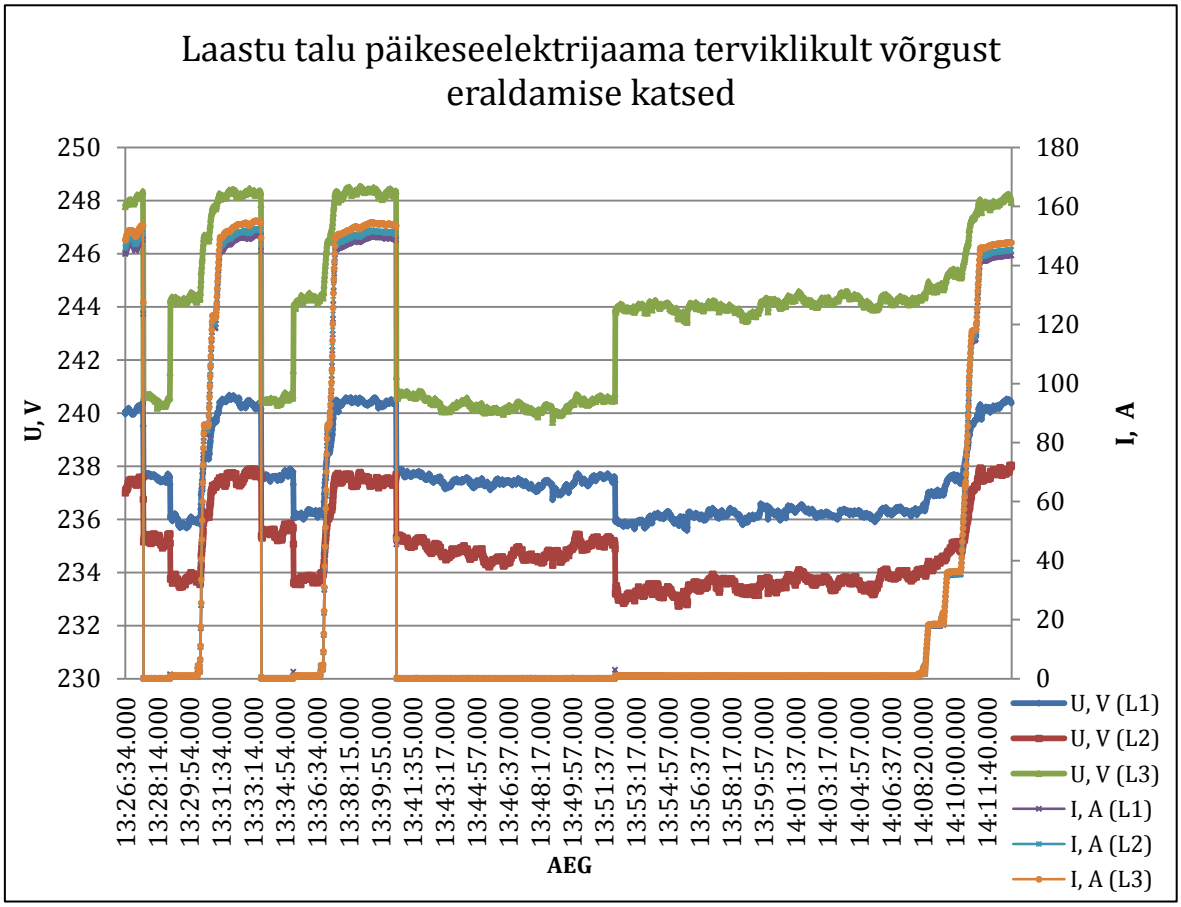
Joonistel 3.43 ja 3.44 on toodud voolu ja pinge ühe perioodi väljavõtted ostsillograafilt päikeseelektrijaama madala väljundvõimsuse korral. Kolme faasi voolu ja pinge kujudes olulisi muutusi madal väljundvõimsus endaga kaasa ei too. PEN-juhi voolu ja pinge kujudes on aga erinevused nähtavad.

Kui võrrelda omavahel joonise 3.39, 3.41 ja 3.45 PEN-juhi voolu ühe perioodi pilte on näha, et mida väiksemaks muutub päikeseelektrijaama väljundvõimsus, seda vähem siinuseline on PEN-juhi voolu kuju. Madalama väljundvõimsusega on ka PEN-juhi voolu maksimum vähenenud, aga voolu maksimum on ikka L1 faasi vooluga samas taktis. Väljundvõimsuse vähenemisega on hakanud ka rohkem välja tulema veel üks maksimum. Kui L2 vool on maksimumis, tekitab see ka PEN-juhis ühe

maksimumi, aga võrreldes L1-ga, on see palju väiksem ja tuleb välja ainult madalama väljundvõimsusega. Joonisel 3.39 ei ole seda üldse võimalik näha ja joonisel 3.41 ainult natukene.

Joonisel 3.44 on näha, et päikeseelektrijaama väljundvõimsuse vähenemisega muutub PEN-juhi pinge signaal sujuvamaks aga samas maksimumväärtus kasvab. Suure väljundvõimsusega on PEN-juhi pinge 6 V, keskmise väljundvõimsuse korral 7 V ja joonisel ja madala väljundvõimsuse korral tõuseb pinge 9 V-ni.

Joonisel 3.45 on toodud terve Laastu talu päikeseelektrijaama võrgust eraldamise katse pingete ja voolude graafik.



Joonis 3.45. Terve jaama võrgust eraldamise katsetel võrgupinge ja jaamast väljuva voolu graafik

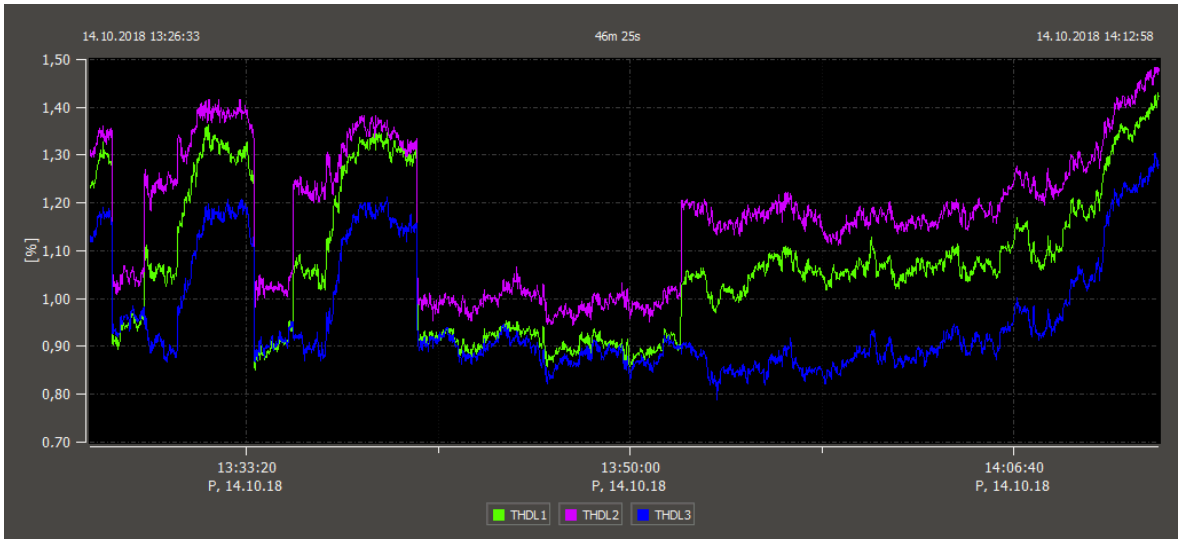
Joonisel 3.45 on pingete ja voolude graafik, mis salvestati terve jaama väljalülitamise katsete ajal. Esimene väljalülitamine toimus kell 13:27, teine 13:33 ja kolmas väljalülitamine oli 13:40. Alates kella 13:40-st kuni 13:52 hoiti päikeseelektrijaam võrgust eraldatuna. Samal ajal lülitati kõik kuus inverterit käsitsi tühijooksu režiimile ja 13:52 ühendati päikeseelektrijaama inverterid tühijooksu

režiimis võrguga. Alates kella 14:08-st hakati järjest invertereid lülitama töörežiimi, et taastuks elektrienergia tootmine elektrivõrku.

Laastu talu päikeseelektrijaam hoiti pikemat aega võrgust eraldatuna ja ka tühijooksu režiimis, et jälgida pikema perioodi vältel mõlemat režiimi. Nende katsete tulemusel selgus asjaolu, et Laastu talu elektrijaamas kasutatavad inverterid suurendavad Tiiuvälja alajaama madalpingevõrgus faasidevahelist pingete erinevust. Joonisel 3.45 on näha, et peajaotuskilbis sulavkaitsmete ploki sisselülitamisel suureneb neutraali nihkepinge, sest pinged faasides L1 ja L2 vähenevad umbes 2 V võrra ja faasis L3 suureneb umbes 4 V võrra. Selle tagajärjel on faaside L2 ja L3 pingete erinevus 10 V eelneva 4-6 V asemel. Faasipinged peaksid faasides olema võrdsed kuid tekkiv 10 V suurune vahe on väga suur.

Kell 13:28 ja 13:35 on graafikult näha, et pärast päikeseelektrijaama sisselülitamist läheb inverteritel umbes 2 minutit aega, et päikeseelektrijaam saaks hakata elektrit tootma. Kui esimesel kahel juhul on tootlikkus kasvanud järsult, siis pärast tühijooksu režiimis olekut kasvas tootlikkus astmeliselt. Kuna inverterid asusid üksteisest kaugel, ei olnud võimalik neid üheaegselt sisse lülitada ja kõigi kuue inverteri juures tuli käia eraldi lülitamas. Kõigepealt lülitati sisse 20 kVA inverterid ja seejärel ülejäänud neli 30 kVA inverterit.

Joonisel 3.46 on toodud terve jaama väljalülitamise mõju pingete harmoonilisele kogumoonutusele.

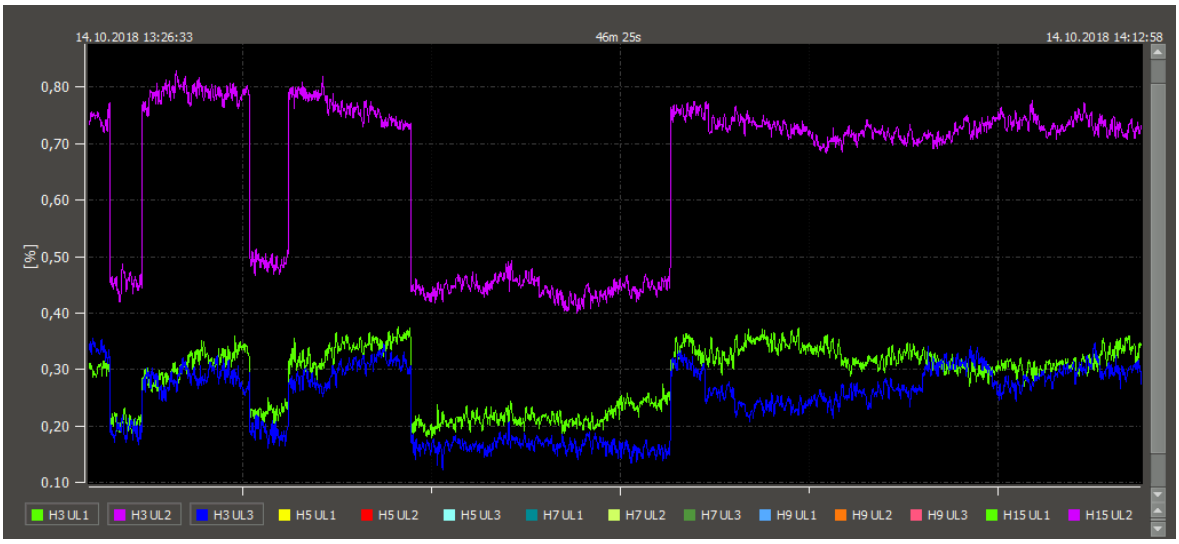


Joonis 3.46. Kolme faasi pingete harmooniline kogumoonutus jaama võrgust eraldamise katsete ajal

Joonisel 3.46 on toodud terve jaama väljalülitamise katsete ajal salvestatud Tiiuvälja alajaama faasipingete harmooniline kogumoonutus madalpingevõrgus. Graafikult on näha, et harmooniliste

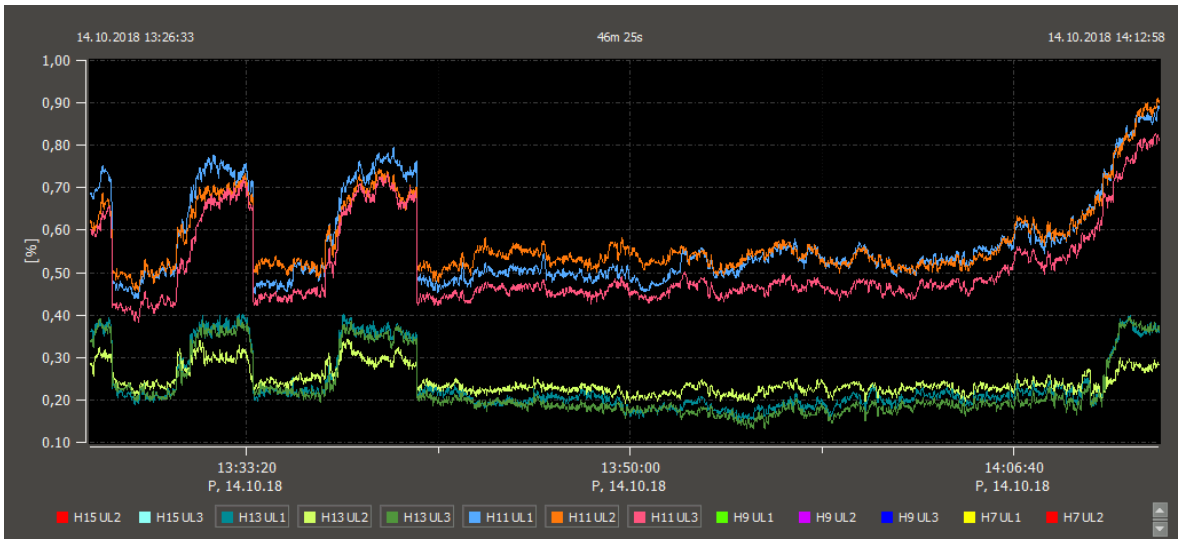
moonutuste tase on kõige madalam siis, kui Laastu talu päikeseelektrijaam on võrgust eraldatud. Moonutus on siis kuni 1%. Sellel ajahetkel, kui päikeseelektrijaama inverterid lülitatakse tühijooksu režiimis sisse, suureneb kahes faasis harmooniliste kogumoonutuste tase umbes 0,2%. Samuti on jooniselt näha seda, et kui päikeseelektrijaama väljundvõimsus hakkab tõusma, kasvab ka pinge harmooniliste kogumoonutuste osakaal kuni 1,5%-ni.

Joonistel 3.47...3.49 on välja toodud eraldi 3., 11., 13., 17. ja 19. pinge harmooniku graafikud. Töös on välja toodud ainult need harmoonikud sellepärast, et teised harmoonikud olid liiga madala tasemega ja nende tase ei sõltunud päikeseelektrijaama režiimist.



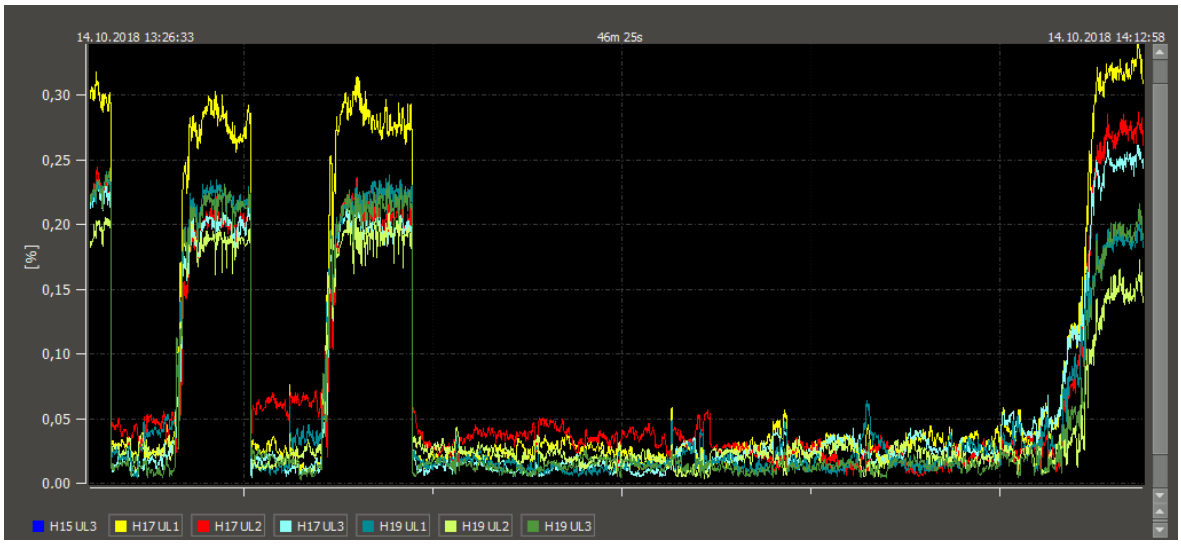
Joonis 3.47. Pinge 3. harmooniku graafik kogu jaama võrgust eraldamise katsete ajal

Joonisel 3.47 on näha madalpinge võrgu 3. harmooniku tase. Faasi L2 tase on faaside L1 ja L3 tasemest umbes 2 korda suurem. Graafikult on näha, et 3. harmooniku tase ei sõltu Laastu talu päikeseelektrijaama tootlikkusest. Harmooniku tase tõuseb järsult sel hetkel, kui inverterid ühendatakse tühijooksu režiimis elektrivõrku ja edasi püsib üsna stabiilsena 0,7% ja 0,8% vahel. Standardis lubatud 3. harmooniku väärtus on 5%.



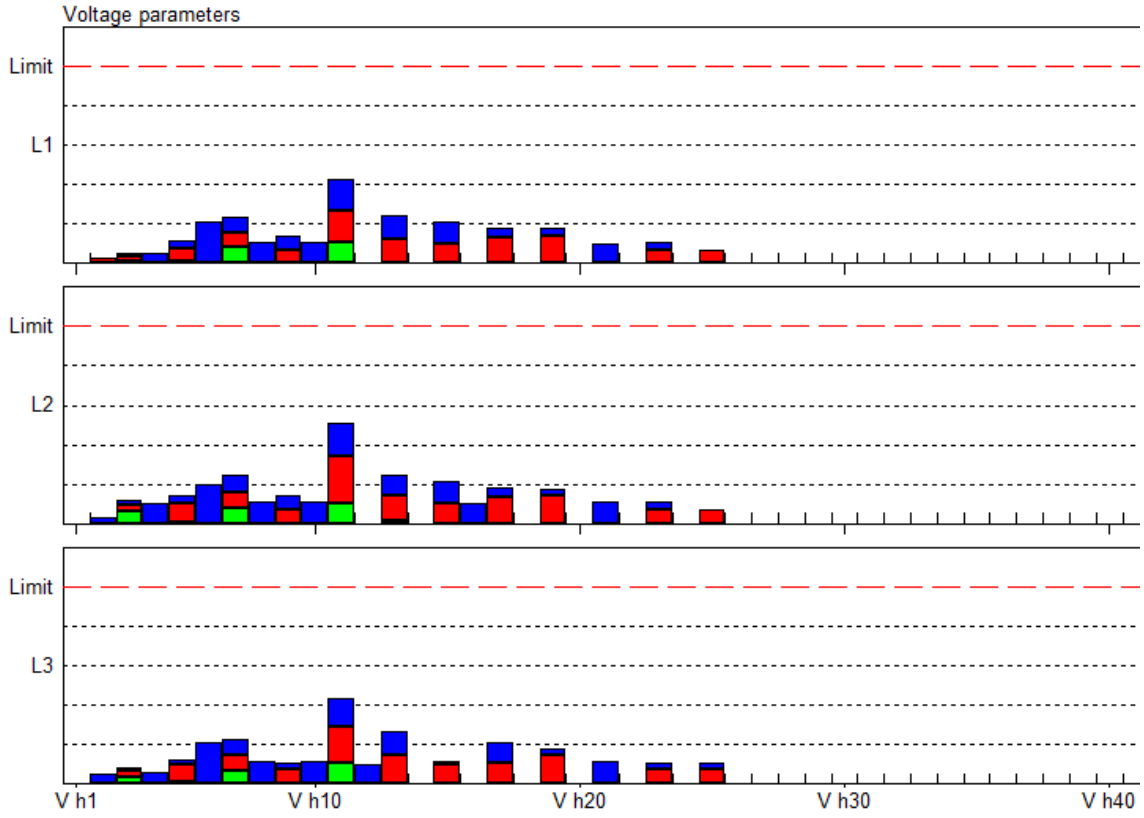
Joonis 3.48. Pinge 11. ja 13. harmooniku graafik kogu jaama võrgust eraldamise katsete ajal

Joonisel 3.48 on toodud Tiiuvälja alajaama madalpinge võrgu pinge 11. ja 13. harmooniku tasemed. Erinevalt 3. harmoonikust suurenevad nende harmoonikute osakaal alles siis, kui Laastu talu päikeseelektrijaam hakkab võrku elektrit tootma. 11. harmooniku tase on kuni 0,9% ja 13. harmooniku tase on kuni 0,4%. Standardi järgi on 11. ja 13. harmooniku lubatud väärtused vastavalt 3,5% ja 3,0%.



Joonis 3.49. Pinge 17. ja 19. harmooniku graafik kogu jaama võrgust eraldamise katsete ajal

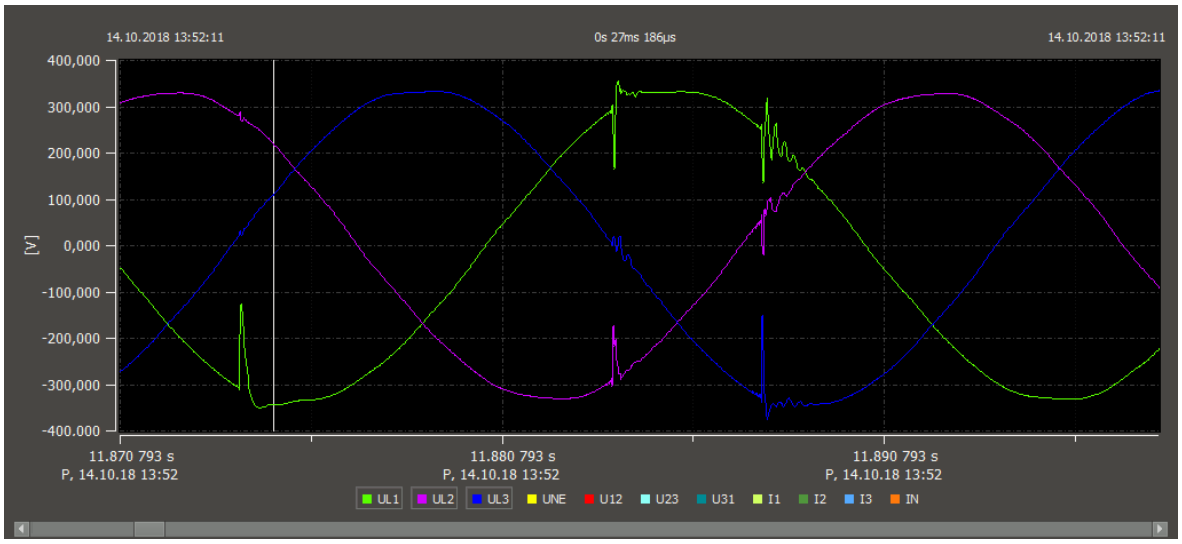
Joonisel 3.49 on näha, et sarnaselt joonisele 3.48, tõuseb 17. ja 19. harmooniku osakaal elektrivõrgus alles sel hetkel, kui päikeseelektrijaam toodab võrku energiat. Nende harmoonikute tase on kuni 0,4% ja standardi järgi on 17. harmoonikul lubatud väärtus 2,0% ja 19. harmoonikul 1,5%. Joonisel 3.50 on toodud ühe nädala mõõtmisel kujunenud pinge harmoonikute spekter.



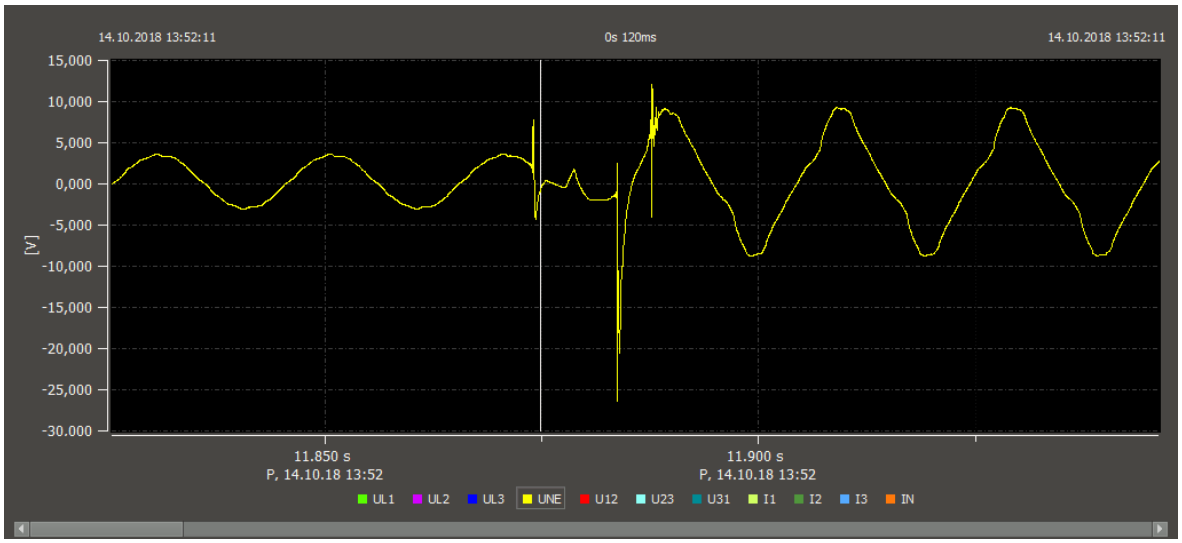
Joonis 3.50. Pinge harmoonikute spekter

Joonisel 3.50 on kujutatud iga harmooniku osakaal, kuid mitte ühises skaalas. Iga harmoonik on eraldi skaalas vastavalt standardis lubatud väärtusele. Punane horisontaalne katkendjoon tähistab standardiga määratud lubatud taset ja selle järgi saab hinnata, kui lähedal on üksiku harmooniku väärtus lubatule. Joonisel 3.50 esitatud spekter pärineb ühe nädala jooksul kestnud mõõtmistest. Standardi järgi peab ühe nädalase perioodi jooksul mõõdetud andmetest 95% kõigist väärtustest olema allpool piirväärtust ehk joonisel näidatud *limit* joonest allpool. Joonisel 3.50 näitab punane tulp 95% mõõdetud väärtuste taset iga harmooniku kohta. Rohelist värvi tulbad näitavad ülejäänud 5%, mis ületavad 95% mõõdetud väärtuste taset. Sinist värvi on maksimum tase, mis mõõdetud. Selleks, et pinge harmoonikute tase oleks standardiga vastavuses, peab iga harmooniku kohta toodud sinine ja punane tulp kokku olema allpool punasest piirväärtuse joonest. Piirväärtusele kõige lähemal on 11. harmooniku väärtus.

Joonistel 3.51...3.53 on vaadeldud lähemalt ostsillograafi abil sisselülitamise hetke. Kuna ostsillograaf salvestas iga kahe minuti järel ainult ühe sekundilise lõigu, ei õnnestunud katsete teostamise ajal tabada hetke, mil oleks väljalülitamise hetk salvestunud ostsillograafile.



Joonis 3.51. Elektrivõrgu kolme faasipingete graafik hetkel, kui jaama inverterid ühendati tühijooksu režiimis võrguga

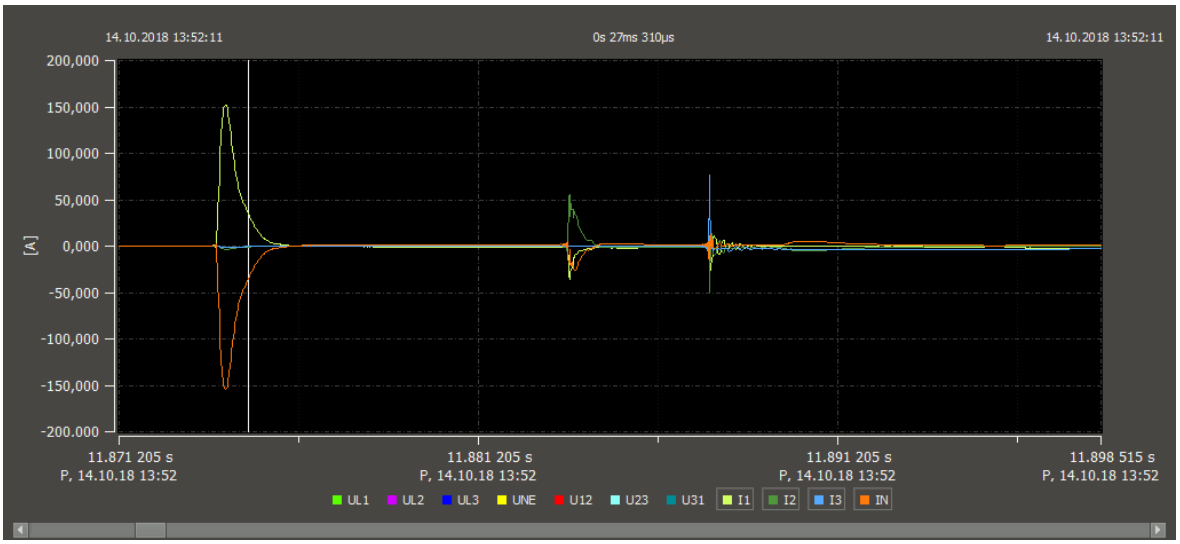


Joonis 3.52. Elektrivõrgus PEN-juhi pinge graafik hetkel, kui jaama inverterid ühendati tühijooksu režiimis võrguga

Joonistel 3.51 ja 3.52 on toodud Tiiuvälja alajaama madalpinge võrgus toimuvad muutused hetkel, kui Laastu talu päikeseelektrijaama peakaitse lülitatakse sisse ja elektrijaama inverterid ühendatakse tühijooksu režiimis võrguga. Faasipingete graafikul on näha, kuidas faasides tekivad transientpinged, mis sumbuvad koheselt. Tekkivate transientpingete amplituud on keskmiselt umbes 150 V.

PEN-juhis on näha, et enne päikeseelektrijaama inverterite ühendamist madalpingevõrguga on pinge amplituudväärtus 4 V, aga ühendamise hetkel toimub suur hüpe ja pinge maksimum tõuseb 10 V-ni. Lisaks suurele pinge muutusele muutub ka siinuseline PEN-juhi pinge saehambakujuliseks. Pinge kuju muutus võib tuleneda harmooniliste kogumoonutuste osakaalu suurenemisega ja

sulgumisega läbi PEN-juhi. Faasipingete siinuselisuses moonutusi ei toimu pärast transientpingete sumbumist.



Joonis 3.53. Kolme faasi ja PEN-juhi voolude graafik hetkel, kui jaama inverterid ühendati tühijooksu režiimis võrguga

Joonisel 3.53 on toodud päikeseelektrijaama tühijooksu režiimil võrguga ühendamise hetkel tehtud kolme faasi voolu ja PEN-juhi ostsillograafi pilt. Antud graafikul on ka näha faasi L1 ja PEN-juhi omavaheline sõltuvus, sest lülitamise hetkel toimub nii L1 faasis kui ka PEN-juhis 150 A suurune tõuge, mis sumbub kiiresti.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on hinnata ühe keskmise võimsusega päikeseelektrijaama mõju elektrivõrgule ja selleks kasutati Laastu talu OÜ päikeseelektrijaama, mis on ühendatud elektrivõrguga läbi Tiiuvälja 10/0,4 kV alajaama. Mõju hindamiseks teostati antud päikeseelektrijaama peajaotuskilbis mõõtmisi, kust suundus kaabel edasi alajaama madalpinge lattidele. Pikaajalised mõõtmised tehti 3.-25. septembrini aastal 2018. Lisaks teostati päikeseelektrijaama erakorralise võrgust eraldamise katsed maksimaalse väljundvõimsuse juures sama aasta 14. oktoobril.

Laastu talu OÜ päikeseelektrijaam maksimaalne väljundvõimsus on 160 kW. Mõõtmiste esimese nädala päevane keskmine oli 56,01 kW, teisel nädalal 47,42 kW ja kolmandal nädalal 49,71 kW. Mõõteperioodi kõige pilvisem päev oli 17. septembril ning siis oli keskmine väljundvõimsus 9,34 kW. Kõige stabiilsema väljundvõimsusega, 76,97 kW, oli päikeseelektrijaam 19. septembril. Kolme nädala jooksul, mil toimusid mõõtmised, ei saavutanud päikeseelektrijaam maksimaalset väljundvõimsust 160 kW. Esimese nädala maksimaalne väljundvõimsus oli 155,11 kW, teisel nädalal 157,17 kW ja kolmandal nädalal 157,96 kW.

Mõõtetulemuste analüüsi käigus tuli välja, et Tiiuvälja alajaama madalpingevõrgu faasipinged on otseselt seotud Laastu talu päikeseelektrijaama tööga. Keskmiselt tõusid faasipinged 236 V pealt 242 V peale, kui jaama väljundvõimsus oli maksimaalse lähedal. Kolme nädala jooksul kõikusid faasipinged 230 V ja 246 V vahel.

Lisaks pinge tõusule, vastavalt väljundvõimsuse tõusmisele, avaldab päikeseelektrijaam mõju pinge kiirele muutusele. Kui taevas on palju üksikuid rünkpilvi, mille tõttu kohati päikeseelektrijaama väljundvõimsus äkiliselt langeb ja kasvab, muutub ka pinge järsult. Mõõtmistel kasutatud seade salvestas 1 minuti jooksul maksimaalse ja minimaalse pinge väärtused. Nende väärtuste vahe oli kolme nädala jooksul sageli kuni 8 V. Kui antud magistritöö koostaja käis mõõteseadmest andmeid salvestamas, täheldas ta sama nähtust ka kohapeal jälgides. Pilve liikumisel päikese ette langes jaama väljundvõimsus 130 kW võrra, mille tagajärjel langes ka pinge 7 V. Samuti on joonistelt näha, et öisel ajal on võrgupinge stabiilsem kui päeval.

Standardi järgi peab tarbijatel olema pinge nimipingest ±10% ehk vahemikus 207 V kuni 253 V. Tegemist on suure pinge vahemikuga. Tundlikumad elektroonikaseadmed võivad standardi järgi lubatud pinge alumisel piiril lülitada end alapinge tõttu välja ja pidevalt 253 V juures võivad vanemad elektriseadmed, mille isolatsioon ei ole enam nii tugev, läbilöögi tagajärjel rikneda. Soovituslik pinge tarbijapunktis võiks antud magistritöö koostaja hinnangul olla näiteks

minimaalselt 215 V ja maksimaalselt 245 V. Siis oleks lubatud pinge vahemik 30 V varasema 43 V asemel. Nimipingele lähemal olev pinge väärtus tagab seadmete täpsema ja ohutuma töö.

Toitepinge väärtus tarbijapunktis sõltub alajaamast väljuvate liinide parameetritest ja olemasolevate andmete järgi ei ole võimalik hinnata, kas tarbijate toitepinge on üle 207 V. Kuna võrgus ei ole ühtegi teist tootjat, on võimalik öelda, et päikeseelektrijaama tootmise tõttu Tiiuvälja 10/0,4 kV alajaama madalpingevõrgus ülepinget ei teki.

Laastu talu päikeseelektrijaama positiivne mõju madalpingevõrgule avaldub pingete asümmeetria vähendamises väljundvõimsuse kasvamisega. Keskmine asümmeetria vähenemine 160 kW väljundvõimsuse juures on 0,50%-lt 0,35%-ni ehk 0,15%. Kuni 1%-st asümmeetriat loetakse kvaliteedinäitaja kõrgtasemeks, mistõttu asümmeetriaga küll probleeme pole, kuid sellegipoolest aitab päikeseelektrijaam seda vähendada.

Mõõtmistega loodeti saada vastus küsimusele, kui suurt mõju avaldavad päikeseelektrijaama inverterid pinge harmoonilistele kogumoonutusele. Päikeseelektrijaama võrgust eraldamise katsete ajal mõõdeti 12 minutit võrgus esinevat harmoonilist kogumoonutust inverteriteta. Seejärel lülitati inverterid tühijooksurežiimi ja ühendati võrguga ning mõõdeti 16 minutit harmoonilist kogumoonutust nii, et elektrienergia tootmist võrku ei toimunud. Pärast seda hakati järjest invertereid töörežiimi lülitama. Nende mõõtmistega selgus, et kõige väiksem on pingete harmooniline kogumoonutus hetkel, mil päikeseelektrijaam on võrgust täielikult eraldatud. Moonutus tõusis umbes 0,2% võrra, kui inverterid lülitati tühijooksurežiimis võrguga ja kui hakati elektrienergiat võrku tootma, suurenes pingete harmoonilise kogumoonutuse osakaal veel umbes 0,3%. See tähendab, et Laastu talu päikeseelektrijaama tõttu suureneb võrgus harmooniline kogumoonutus 0,5% võrra. Kuna 3 nädala jooksul oli ainult üksikutel juhtudel pingete harmooniline kogumoonutus üle 2%, ei põhjusta päikeseelektrijaama inverterid lubatud väärtuse ületamist.

Mõõtmised Laastu talu OÜ päikeseelektrijaamas võib lugeda edukaks, sest mõõtmiste perioodi ajal oli nii päikselisi, vahelduvalt pilviseid ja ka lauspilvitusega päevi. Tänu sellele oli võimalik salvestada päikeseelektrijaama erinevaid töörežiime. Kuna mõõtmised teostati septembrikuus, kui päikese intensiivsus ei ole enam nii suur, oleks hea teostada lisamõõtmisi suve keskel, mil päikese intensiivsus suurim ja valge aeg pikim. Samuti tuleks teostada antud madalpingevõrgus mõõtmisi talvel, kui päikeseelektrijaam on suure osa ajast oote- mitte töörežiimis. Nende lisamõõtmiste abil oleks võimalik täpsemalt hinnata antud päikeseelektrijaama mõju madalpingevõrgule.

Lisaks võiks teha katseid, kuidas antud päikeseelektrijaam käitub, kui trafo lülitatakse tööst välja. Tiiuvälja alajaama trafo ja Laastu talu päikeseelektrijaama inverterite koguvõimsus on mõlemal

juhul 160 kVA. Ei ole teada, kas päikeseelektrijaam jääb töösse ja reguleerib vastavalt tarbimisele oma väljundvõimsust või lülitab end välja. Kui jääb töösse, siis millise kvaliteediga on inverteritest tulev väljundpinge ja vool? Nendele küsimustele vastamiseks vajalikud katsed oleks vaja eelnevalt kooskõlastada tarbijatega, sest võib tekkida toitepinge katkestusi. Samuti ei ole hetkel teada, kuidas reageerib antud päikeseelektrijaam lühisele nii madalpinge kui ka kõrgepinge võrgus.

Käesolevas magistritöös teostatud mõõtmisi tuleks teostada ka veel teistes keskmise suurusega päikeseelektrijaamades, kus on tarbijate hulk ja trafo võimsus erinev. Sellisel juhul on võimalik mõõteandmeid võrreldes täpsemalt mõista, kuidas keskmise suurusega päikeseelektrijaamad mõjutavad elektrivõrku.

Antud magistritöö raames teostatud mõõtmised ja ka andmete analüüs oli töö teostaja jaoks väga huvitav, sest tekkisid selged mustrid andmetest, kuidas päikeseelektrijaama väljundvõimsus avaldab mõju madalpingevõrgule. Kuigi päikeseelektrijaam suure väljundvõimsusega tõstab pinget märkimisväärselt, ei ületa see standardiga lubatud väärtusi. Samuti ei lange öisel ajal pinge alajaama madalpinge osas liiga madalale. Inverteritest tulenev harmooniline mõjutus sai samuti kinnitust, aga võrgus olev harmoonilise mõjutuse tase on piisavalt madal ja inverterid ei tõsta lubatud väärtustest kõrgemale. Päikeseelektrijaama positiivne mõju avaldub pinge asümmeetria vähendamises, aga inverterite ühendamine võrguga suurendab neutraali nihkepinget, mille tagajärjel faaside L2 ja L3 pingete vahe suureneb 4 V pealt 10 V-ni ja faaside L1 ja L3 pingete vahe suurenes 2 V pealt 8 V-ni. Põhjuseks, miks tühijooksu režiimis inverterid suurendavad võrgupingete vahet faaside vahel, võib olla pinge 3. harmooniku osakaalu suurenemine lülitamise ajal hüppeliselt.

Kõige suurem negatiivne mõju, mida Laastu talu päikeseelektrijaam avaldab elektritootmisega madalpingevõrgule, on pingete kiire muutus väljundvõimsuse hüppelise muutusega, kui pilved piiravad päikesevalgust. Üks lahendus sellele probleemile võib olla näiteks akuseadmete ühendamine päikeseelektrijaamale. Kui pilv tuleb päikese ette ja jaama väljundvõimsus langeb järsult, aitaks akuseadmed hoida pinget nii kaua samal tasemel, kuni pilv eest ära liigub või siis vähemalt pinge kukuks sujuvamalt ja mitte nii järsult. Kui võimas see akuseade peaks olema, kui palju sellest kasu oleks ja kas selline investeering oleks majanduslikult mõistlik, vajab aga täiendavat uurimist ja ka võibolla uusi katseid ning mõõtmisi.

SUMMARY

The aim of this master thesis is to evaluate the impact of PV station to power grid on example of Laastu talu OÜ's PV station, which is connected to power grid via Tiiuvälja 10/0,4 kV substation. Impact assessment was done by doing measurements in the station's main electrical fuse box on the cable that connected the PV station and substation. Long-term measurements were taken from 3. to 25. September 2018. Also, additional experiments took place on 14. October 2018 when the PV station was suddenly switched off several times to see, what kind of impact it has on power grid.

Maximum output power of PV station in Laastu talu is 160 kW. On the first week, the average daily output power was 56,01 kW, on the second week 47,42 kW and on the third week 49,71 kW. September 17th was the cloudiest day of the three week period and on that day the average output power was 9,34 kW. On September 19th, the output power of PV station was most stable and the average output power reached to 76,97 kW. During the three week period of measuring, the PV station never reached it's peak output 160 kW – on first week maximum power was 155,11 kW, on second week 157,17 kW and on third week maximum output power was 157,96 kW.

After analysing the data, it was clear that voltage in Tiiuvälja substations low-voltage grid is directly connected to Laastu talu PV station's output power. Averagely voltage rised from 236 V to 242 V when PV station worked with maximum or close to maximum output power. Voltage varied during the three week period from 230 V to 246 V.

In addition to rising voltage in substation, the PV station has impact on quick change of voltage. When there are lots of clouds in the sky that occasionally disturb PV stations work, the voltage suddenly drops and when clouds move away, output power rises fast and so does voltage. The measuring device worked in 1 minute periods saving the lowest and highest voltage during that time. In the course of the three week period, the difference was often up to 8 V. When the author of this thesis was on site to collect data from the measuring device, it could be seen with one's own eyes how PV station's output power dropped by 130 kW, when clouds blocked the sun. That caused voltage to drop by 7 V instantly. During night time voltage is more stable as seen on the graphics.

By standard, voltage has to be in range of ±10% from nominal voltage, this means between 207 V to 253 V. It is a big range and more sensitive electronical devices may shut down due to low voltage even if by standard voltage is within 10%. Also, older devices may brake down if voltage is constantly close to 253 V. According to the opinion of the author of this master thesis, recommended voltage should be from 215 V to 245 V. This means the range would be 30 V instead

of 43 V. Voltage closer to the nominal voltage ensures more accurate and safe work for electrical devices.

Since distance from substation to consumer makes voltage drop due to resistance of the power lines, it is not possible to evaluate the exact voltage that reaches consumers by the data collected within this theses. To calculate the voltage drop, more data of power lines is needed. However, there is no other electricity producer connected to power grid, so it can be said, that Laastu talu PV station does not cause overvoltage.

Laastu talu PV stations positive effect to Tiiuvälja power grid is lowering voltage unbalance as output power rises. Average voltage unbalance lowers with maximum output power of 160 kW from 0,50% to 0,35%. Up to 1% voltage unbalance in power grid is stated as high quality. This means the quality is already high, but the PV station helps to improve it even more.

By doing measurements, the author of this theses hoped to get an answer to the question, how PV stations inverters impact voltage total harmonic distortion in power grid. During PV station disconnecting experiment, author measured for 12 minutes the voltage total harmonic distortion without inverters. After that, the inverters were switched to stand-by mode, where they were connected to power grid but did not produce energy. In that mode total harmonic distortion was measured for 16 minutes and after that all inverters were switched to work mode one after another. With these measurements it was clear, that voltage total harmonic distortion was lowest when PV station was totaly disconnected from power grid. Distortion rised about 0,2% when inverters were switched to stand-by mode. When they were switched to work mode and started to produce energy, total harmonic distortion rised more about 0,3%. This means that Laastu talu PV station is responsible of about 0,5% of voltage total harmonic distortion. Since the level was over 2% in the three week period only a few times, it is possible to say that the voltage total harmonic distortion is not problematic.

Measurements in Laastu talu OÜ PV station were successful, because during the three week period there were sunny days, a little cloudy and also totally overcast weather. Due to this, it was possible to get data how PV station works during different weather conditions. Since measurements were made in September when sun is not so intensive, it would be beneficial to do extra measurements in the middle of summer, when days are the longest and sun is the most intense. Also, it would be useful to do same measurements during winter time, when PV station is at stand-by mode most of the time and not generating energy. With these additional measurements, the impact of PV station to power grid can be evaluated more accurately.

Additionaly, there could be done more experiments of how PV station operates, when substation transformer is being shut down. The transformer and PV station inverters are at same power level. It is unknown if PV station will shut down as well or regulates it's output power with load from consumers. And if so, what is the quality of output voltage and current? These experiments would also require to cooperate with consumers, beacause there is a high chance of black-out for them. Also, there is no information on how PV station will operate when there is a short circuit in low voltage grid or in high voltage grid.

Some additional measurements, that were made within this thesis, should be done in other mid-sized PV stations, where grid has more consumers and different transformator. Comparing data from different measurements can give better idea of how mid-sized PV stations can influence power grid.

Measurements and data analysing that was done within this master thesis was interesting for the author, because data formed clear patterns of how PV stations output power influences voltage in grid. Voltage rise is noticeable but it does not exceed values set by standard. Also voltage will not decrease too low during night time. Harmonic distortion caused by inverters also was confirmed but since the level is low enough, it is not problematic. PV station has positive effect to voltage unbalace with rise of output power but connecting the inverters to the grid causes rise of neutral voltage. The consequence is voltage difference between phases L2 and L3 to rise from 4 V to 10 V and between phases L1 and L3 to rise from 2 V to 8 V. The reason may be caused by rise of voltage 3rd harmonic.

Most negative influence, that Laastu talu PV station has to the grid is quick change of voltage as the output power changes quickly whenever clouds block direct sun to the panels. One solution to this problem might be adding batteries to the PV station. Whenever clouds are blocking sun and output power is dropping, batteries would help to keep voltage up or at least the drop would not be so fast. How powerful the batteries would have to be and how much it would improve the voltage quality, needs additional research and may also need additional measurements.

KASUTATUD KIRJANDUS

[1] Taastuvenergia aastaraamat 2017. Kättesaadav: http://www.taastuvenergeetika.ee/wp-content/uploa ds/2018/06/ Taastuvenergia -aastaraamat-2017.pdf.

[2] SolarEst OÜ koduleht. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: http://solarest.eu/kasulik-teada. [Kasutatud 07.03.2019].

[3] W. Omran, „Performance analysis of grid-connected photovoltaic systems“, 2010. Kättesaadav: https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/4943/Omran_Walid.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

[4] M. S. ElNozahy, M. M. A. Salama, „Technical impacts of grid-connected photovoltaic systems on electrical networks“, 2013. Kättesaadav: https://www.researchgate.net/publication/258071725_Technical_Impacts_of_Grid-Connected_Photovoltaic_Systems_on_Electrical_Networks-A_Review#pfb.

[5] S. Rönnberg, M. Bollen, A. Larsson, „Grid impact from PV-installations in northern Scandinavia“, 2013. Kättesaadav: http://ltu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1014275/FULLTEXT0 1.pdf.

[6] EVS-EN 50160:2010 - Avalike elektrivõrkude pinge tunnussuurused .

[7] M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt, J. Kilter „Jaotusvõrgud” Tallinn 2007.

[8] Elering AS, „Eesti Vabariigi juubeliaasta tõi juurde 100 megavatti päikeseelektrijaamu“, 2019. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: https://elering.ee/eesti-vabariigi-juubeliaasta-toi-juurde-100-megavatti-paikeseelektrijaamu [Kasutatud 28.04.2019].

[9] PROINSO UK koduleht. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: https://www.proinso.net/huawei-inverters/ [Kasutatud 05.05.2019].

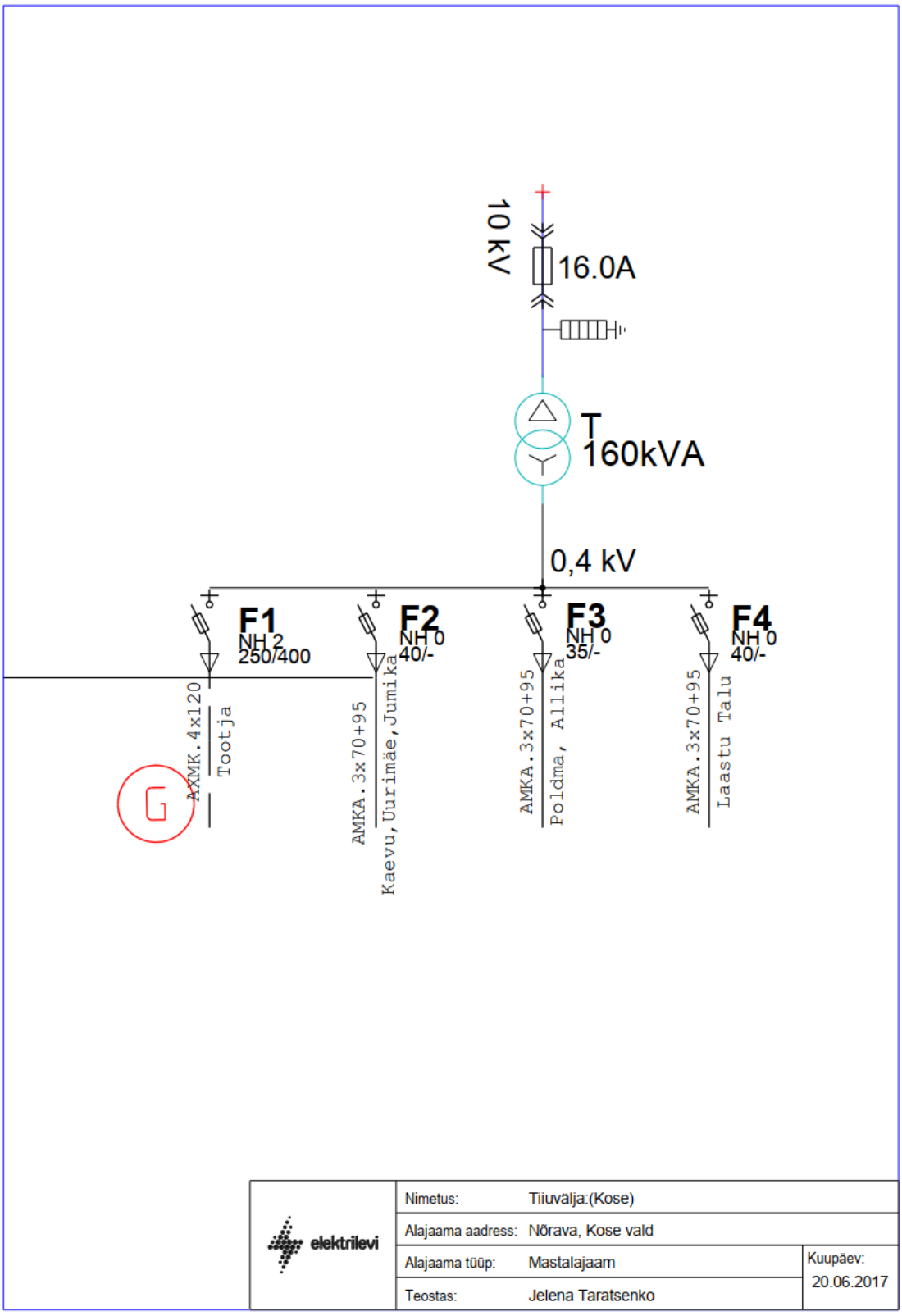
[10] J. E. Rocha, W. D. C. Sanchez, “The Energy Processing by Power Electronics and its Impact on Power Quality“ 2012. Kättesaadav: https://ejournal.undip.ac.id/index.php/ijred/article/view/4099/3746.

[11] Riigi Ilmateenistuse vaatlusandmed, võrgumaterjal. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: https://www.ilmateenistus.ee/ilm/ilmavaatlused/vaatlusandmed/. [Kasutatud: 05.05.2019].

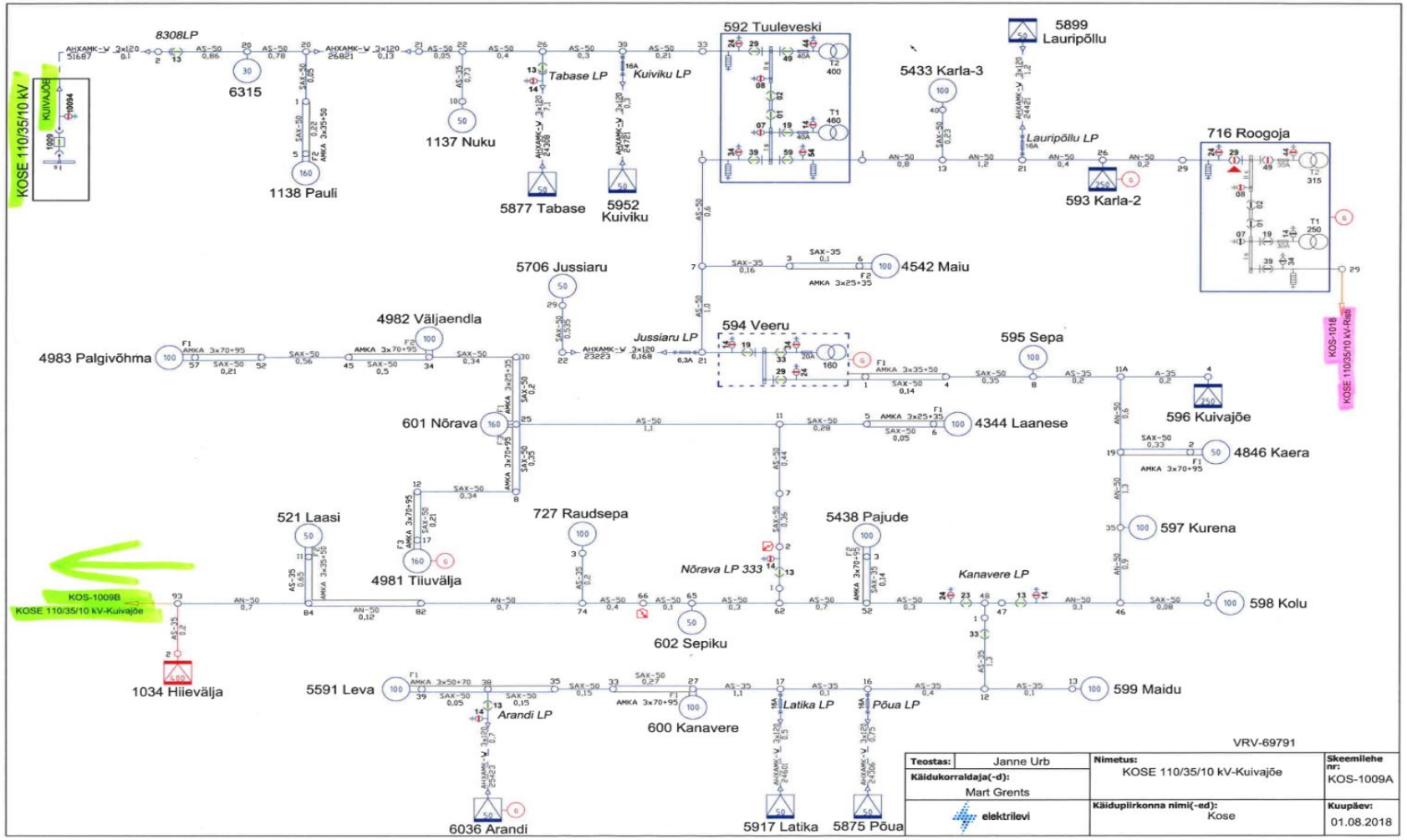
[12] V. Russak, A. Kallis „Eesti kiirguskliima teatmik“ Tallinn 2003. Kättesaadav: https://www.ilmateenistus.ee/wp-content/uploads/2013/01/eesti_kiirguskliima_teatmik.pdf.

LISAD

Lisa 1 Tiiuvälja alajaama skeem



Lisa 2 Kose-Kuivajõe 10 kV võrguskeem Harjumaa piirkonna jaotusvõrgu dispetšeritelt



Lisa 3 Laastu talu OÜ päikeseelektrijaama PJK koos Tiiuvälja 10/0,4 kV mastalajaamaga

Lisa 4 Laastu talu päikeseelektrijaamas asuv infoplakat

Lisa 5 Päikesepaneelide rida Laastu talu päikeseelektrijaamas