



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**PÄIKESEELEKTRIJAAMA MÕJU TOITEPINGE  
KVALITEEDILE MADALPINGEVÕRGU  
LIITUMISPUNKTIS**

**THE IMPACT OF SOLAR POWER PLANT ON SUPPLY  
POWER QUALITY AT LOW VOLTAGE NETWORK  
CONNECTION POINT**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Sten Vainu

Üliõpilaskood: 186099EAAB

Juhendaja: MSc Vahur Maask, doktorant-nooremteadur

Tallinn 2022

# AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

"....." ..... 20.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö esitatud nõuetele

"....." ..... 20.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." .....20.....

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina, Sten Vainu

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Päikeseelektrijaama mõju toitepinge kvaliteedile madalpingevõrgu liitumispunktis,

mille juhendaja on Vahur Maask,

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

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

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

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

\_\_\_\_\_ (kuupäev)

---

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

## LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Sten Vainu

*Lõputöö liik:* Bakalaureusetöö

*Töö pealkiri:* Päikeseelektrijaama mõju toitepinge kvaliteedile madalpingevõrgu liitumispunktis

*Kuupäev:*  
18.05.2022

51 lk

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja:* doktorant-nooremteadur Vahur Maask

*Sisu kirjeldus:*

Antud töö eesmärk oli võtta vaatluse alla reaalne madalpinge võrgus olev liitmispunkt ning simuleerida läbi olukorrad, kui paigaldada antud võrku PV ning uurida kuidas PV mõjutaks antud võrgu toitepinge kvaliteeti. Selleks koguti ühe nädala jagu tootmisvõimsusi ning tarbimisvõimsusi. Lisaks läks tarvis madalpingevõrgu parameetreid. Simulatsioonid teostati platvormil MATLAB Simulink, kus teostati kokku neli erinevat stsenaariumi. Kõigi stsenaariumite alusel võis väita, et kolmefaasiline PV algsete parameetritega oli antud liitumispunktis kõige sobivam ning toitepingekvaliteet oli kõrgtaseme piirides. Kõige vähem efektiivsem oli stsenaarium, kus PV võimsus oli suurendatud trafo võimsuseni, kuna toitepinge kvaliteet oli väga suurel määral rikutud. Lisaks annab autor oma hinnangu, millise võimsusega PV-d oleks kõige mõttekam katsetatud võrku paigaldada ning et tulevikus paigaldajad peaksid kindlasti arvestama trafo võimsustega, mille alusel teha valik PV võimsuse osas. Töö edasisel käigul katsetatakse kõik erinevad stsenaariumid läbi ning antakse lõpus lõplik ülevaade, kuidas igas olukorras mõjutasid päikeseelektrijaama madalpinge võrgu liitumispunkti toitepinge kvaliteeti.

*Märksõnad:* päikeseelektrijaam, toitepinge kvaliteet, liitumispunkt, bakalaureusetöö

## ABSTRACT

*Author:* Sten Vainu

*Type of the work:* Bachelor Thesis

*Title:* The impact of solar power plant on supply power quality at low voltage network connection point

*Date:* 18.05.2022

*51 pages*

*University:* Tallinn University of Technology

*School:* School of Engineering

*Department:* Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

*Supervisor(s) of the thesis:* early stage researcher Vahur Maask

*Abstract:*

The aim of this work was to analyze the real connection point in a low-voltage grid and to simulate situations when installing PV in a given network and to study how PV would affect the quality of the supply power in a given network. For this purpose production power and consumption power were collected for one week. In addition low voltage grid parameters were needed. The simulations were performed on the MATLAB Simulink platform where a total of four different scenarios were performed. In all scenarios, it could be stated that the three-phase PV with the original parameters was the most suitable at a given connection point and the supply power quality was within a high level. The least efficient scenario was where the PV power was increased to the transformer power because the quality of the supply power was greatly impacted. In addition, the author gives recommendations of which power of PV would make the most sense to install in the tested grid and that future installers should definitely consider the transformer power capacities on the basis of which to make a choice in terms of PV power. In the course of the work, all the different scenarios will be tested and a final overview will be given at the end how the supply power quality of the connection point in the low-voltage grid was affected by the solar power plant in each situation.

*Keywords:* solar power plant, supply power quality, connection point, bachelor's thesis

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Päikeseelektrijaama mõju toitepinge kvaliteedile madalpingevõrgu liitumispunktis**

Lõputöö teema inglise keeles: **Impact of solar power plant on supply power quality at low voltage network connection point**

Üliõpilane: **Sten Vainu, 186099EAAB**

Eriala: **Elektroenergeetika ja mehhatroonika**

Lõputöö liik: **bakalaureusetöö**

Lõputöö juhendaja: **MSc. Vahur Maask**

Lõputöö kaasjuhendaja:  
(ettevõtte, amet ja kontakt)

Lõputöö ülesande  
kehtivusaeg: 2022/2023 2022/2023 Sügis

Lõputöö esitamise tähtaeg: **18.05.2022**

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

---

Kaasjuhendaja (allkiri)

## 1. Teema põhjendus

Päikeseelektrijaamade suurenenud kasutus maailmas on tõstatanud küsimusi nende mõjust elektrisüsteemile. Antud uurimistööst keskendubki ühe elektrisüsteemi osa ehk 0,4 kV madalpinge liitumispunkti toitepinge kvaliteedile ning millist mõju omab sellele lokaalne päikeseelektrijaam. Antud teema puudutab eelkõige inimesi, kellel on plaanis madalpingevõrgus ise hakata energiat tootma. Samuti antud teema oluline ka jaotusvõrgu operaatoritele, kelle ülesanne on pakkuda tarbijatele kvaliteetset elektrit. Eesti Energia allikate kohaselt tarbib Eesti keskmine majapidamine 3000 kWh elektrienergiat aastas. Kasutades 3 kW fotoelektrilist energiatootmisüksust, on võimalik toota kuni 2800 kWh elektrit aastas, arvestades 10% kasuteguriga. Põhiprobleemiks osutubki, kuivõrd suurt mõju liitumispunkti toitepinge kvaliteedile omab PEJ muutlik toodang, mida põhjustab pilvisusest ning muudest sarnastest faktoritest tingitud

dünaamiline kiirgusintensiivsus. Nelson A. Kelly poolt teostatud uuringus leiti, et pilves ilmaga võib paneelide tootlikkus olla isegi üle 50% väiksem, kui selge ja päikesepaistelise ilmaga. Seetõttu antud uurimistöö keskendubki just madalpinge võrgule, kuna tulenevalt madalpingevõrgu suuremale voolutugevusele võrreldes kõrgepingevõrguga on 0,4 kV liitumispunktis toitepinge probleemid tõsisemad. Uurimistöö annab vajaliku informatsiooni ja mõtlemisainet igale inimesele, kes seda loeb, kuivõrd päikeseelektrijaamast toodetud energia mõjutab liitumispunkti toitepinget, millest lähtuvalt saaksid PEJ paigaldavad tarbijad projekteerimise juures arvestada.

## **2. Töö eesmärk**

Eesmärk on välja selgitada päikeseelektrijaama mõju suurus madalpinge liitumispunkti toitepinge kvaliteedile ning anda juhiseid päikesepargi dimensioneerimiseks.

## **3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:**

- 1) Millised toitepinge kvaliteeti iseloomustavad parameetrid on olulised päikeseelektrijaama mõju hindamiseks 0,4 kV madalpingevõrgu liitumispunktis?
- 2) Milliseid lähteandmeid ja mudeleid on tarvis, et modelleerida päikeseelektrijaama ning madalpingevõrku tarkvaras *MATLAB*?
- 3) Millised katsestsenaariumid tuleks modelleerimistarkvaras läbi teha, et oleks võimalik hinnata päikeseelektrijaama mõju toitepinge kvaliteedile?
- 4) Kui suurt mõju avaldab päikeseelektrijaam madalpingevõrgu liitumispunkti toitepinge kvaliteedile?

## **4. Lähteandmed**

Tarvis läheb simuleerimise käigus pingeid, koormusi, paneeli- ja tarbimisvõimsusi. Lähteandmeid jagab minuga juhendaja.

## **5. Uurimismeetodid**

Selleks, et lõpliku vastuseni jõuda, tuleb modelleerida ning simulatsioone teostada *MATLAB*-i abil. Andmete analüüsiks on plaanis kasutada ka tabelarvutustarkvara *Excel*.

## **6. Graafiline osa**

Peamised joonised on *MATLAB*-i simulatsioonidest saadavad graafikud. Graafiline osa on peamiselt töö põhiosas, kuna see sisaldab väga olulist informatsiooni antud uurimistöös.

## **7. Töö struktuur**

1. Sissejuhatus
2. Toitepinge kvaliteet
  - 2.1. Toitepinge tase ja aeglased pingemuutused
  - 2.2. Toitepinge asümmeetria
  - 2.3. Kiired pingemuutused
  - 2.4. PV mõju toitepinge kvaliteedile ning selle mõju elektriseadmetele ja tarbimisele
3. Päikeseelektrijaama modelleerimine madalpingevõrgus
  - 3.1. Lähteandmed modelleerimiseks
  - 3.2. Mudelite väljatöötamine ja valik
  - 3.3. Simulatsiooni stsenaariumite kirjeldus
4. Toitepinge kvaliteedi analüüs
  - 4.1. Toitepinge tase ning aeglased pingemuutused
  - 4.2. Toitepinge asümmeetria
  - 4.3. Kiired pingemuutused
  - 4.4. Juhised päikeseelektrijaama projekteerimiseks
5. Kokkuvõte

## **8. Kasutatud kirjanduse allikad**

Uurimistöös kavatsen kasutada teadusartikleid, raamatuid, aruandeid.

## **9. Lõputöö konsultandid**

Kuna ma töotan ettevõttes Enefit Connect elektrivõrgu nooremisenerina, siis mul on võimalus oma tiimijuhi Kahro Kaldma käest küsida lisainformatsiooni antud teema kohta.

## **10. Töö etapid ja ajakava**

Kirjanduse läbitöötamine – 01.12.21

Lähteandmete kogumine – 14.12.21

Teoreetilise osa kirjutamine – 15.01.22



Arvutuste/mõõtmiste/simuleerimise teostamine – 30.02.22  
Uuringu tulemuste kirjeldamine 15.03.22  
Järelduste kirjutamine – 31.03.22  
Kokkuvõtte koostamine – 08.04.22  
Töö esimene versioon valmis - 15.04.22  
Juhendajale läbilugemiseks saatmine – 17.04.22  
Paranduste sisseviimine – 25.04.22  
Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine – 11.05.22  
Töö lõplik versioon valmis - 18.05.22

# SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE .....	4
ABSTRACT .....	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	6
EESSÕNA .....	12
Lühendite ja tähiste loetelu .....	13
SISSEJUHATUS .....	14
1. TOITEPINGE KVALITEET .....	15
1.1 Toitepinge tase ja aeglased pingemuutused .....	16
1.2 Toitepinge asümmeetria .....	17
1.3 Kiired pingemuutused.....	19
1.4 PV inverteri mõju.....	20
1.5 PV mõju toitepinge kvaliteedile.....	21
2. PÄIKESEELEKTRIIAAMA MODELLEERIMINE MADALPINGEVÕRGUS .....	22
2.1 Lähteandmed modelleerimiseks .....	23
2.1.1 Trafo .....	23
2.1.2 Õhuliin .....	23
2.1.3 PV toodang.....	24
2.1.4 LP tarbimine .....	24
2.2 Mudelite väljatöötamine ja valik .....	25
2.2.1 Võrgu aseseem .....	25
2.2.2 Algne mudel .....	25
2.2.3 Täiendatud ühefaasiline mudel .....	26
2.2.4 Täiendatud kolmefaasiline mudel.....	27
2.2.5 Täiendatud kolmefaasiline mudel, milles PV on ühefaasiline .....	27
2.3 Simulatsiooni stsenaariumite kirjeldus.....	28
3. TOITEPINGE KVALITEEDI ANALÜÜS .....	29
3.1 Ühefaasilise võrgu analüüs.....	30
3.1.1 Toitepinge väärtused 7 päeva jooksul .....	30
3.1.2 Pingetase ja aeglased pingemuutused.....	30
3.1.3 Kiired pingemuutused .....	32
3.2 Kolmefaasilise võrgu analüüs .....	32
3.2.1 Toitepinge väärtused 7 päeva kohta .....	32
3.2.2 Pingetase ja aeglased pingemuutused.....	34
3.2.3 Pingete asümmeetria .....	35

3.2.4 Kiired pingemuutused .....	36
3.3 Kolmefaasiline madalpingevõrk, kus PV on ühefaasiline .....	37
3.3.1 Toitepinge väärtused 7 päeva kohta .....	37
3.3.2 Pingetase ja aeglased pingemuutused .....	38
3.3.3 Pingete asümmeetria .....	39
3.3.4 Kiired pingemuutused .....	40
3.4 Kolmefaasiline võrk, koos suurema võimsuse PV-ga .....	41
3.4.1 Toitepinge väärtused 7 päeva kohta .....	41
3.4.2 Pingetase ja aeglased pingemuutused .....	42
3.4.3 Pingete asümmeetria .....	44
3.4.4 Kiired pingemuutused .....	45
3.4.5 Pingemuhud .....	46
3.5 Järeldused katsetulemustest .....	47
KOKKUVÕTE .....	49
KASUTATUD KIRJANDUS .....	50

## **EESSÕNA**

Täna Enefit Connect'i töökolleeži, kes oli lahkelt nõus aitama võrgu parameetrite andmete kogumisega. Eriõised tänusõnad juhendajale Vahur Maask'ile, tänu kellele sai käesolev bakalaureusetöö võimalikuks.

Lõputööga seotud võtmesõnad on päikeseelektrijaam, toitepinge kvaliteet, liitumispunkt ning bakalaureusetöö.

## Lühendite ja tähiste loetelu

LP – liitumispunkt,

PEJ – päikeseelektrijaam,

PV – fotoelektriline tootmisüksus (päikesepaneel),

$U$  – faasi pinge (V),

$U_0$  – normaalne toitepinge tase,

$U_{MAX}$  – faasi pinge maksimum väärtus,

$U_{MIN}$  – faasi pinge minimaalne väärtus,

$k_a$  – pinge asümmeetriategur.

## SISSEJUHATUS

Iga aastaselt kasvab maailmas nõudlus madalpingevõrkude liitumispunktides päikeseenergia (PV) kasutamise suunas. Kuna osades Eesti maapiirkondades võib esineda nõrk madalpingevõrk, siis päikeseelektrijaama rajamine ja nende toodang võib suuresti mõjutada elektrikvaliteeti. Suuremate probleemide korral võib olla suuresti rikutud toitepinge kvaliteet, mis võib hakata suurel määral mõjutama pikas perspektiivis liitumispunktis tarbija elektriseadmeid ja üleüldist elektrivarustuse kindlust. Seetõttu on selle töö eesmärk vaadelda, millist mõju võivad PEJ tekitada madalpingevõrgu liitumispunktis tarbija toitepinge kvaliteedi osas.

Eesmärk on selle tööga anda detailset ja informatiivset infot lugejale, kes sooviks kunagi oma koju liitumispunkti paigaldada PV-d ja anda ülevaade, mida tuleb silmas pidada enne PV paigaldamist, et mis mõju avaldavad PV-d toitepinge kvaliteedile ning kuidas uuritakse nende mõju vastavalt euroopa standarditele. Kindlasti tuleb tähele panna asjaolu, et antud lõputöös käsitletakse PV-d ja päikeseelektrijaama sama tähenduse all.

Töö eesmärkide saavutamiseks teostatakse reaalistest andmetest ja parameetritest simulatsioon, mille alusel oleks võimalik saavutada ligilähedaselt realistlikud tulemused. Simulatsiooni teostatakse programmis MATLAB Simulink. Päikeseelektrijaama tootmisvõimsused saadi Tallinna Tehnikaülikooli poolt ning liitumispunkti tarbimisvõimsused saadi juhendaja talukompleksi näitel. Kõik andmed on kogutud seitsme päeva kohta. Lisaks madalpinge võrgu parameetrid sai autor töökaaslase käest, et kasutada reaalse trafo parameetreid ja kaabli takistusi.

Töö põhiosa keskendus nelja erineva stsenaariumi põhjal, milleks olid: ühefaasilise võrgu vaatlus; kolmeefaasilise võrgu vaatlus; kolmeefaasilise võrgu vaatlus, kus PV ise on ühefaasiline ning kolmeefaasiline võrgu vaatlus, kus PV tootmisvõimsust on suurendatud trafo võimsuseni. Igas stsenaariumis võrreldi toitepinge kvaliteeti kirjeldavaid parameetreid ilma PV-ta ja koos PV-ga rakenduses. Kõikide katsete puhul järgiti elektrikvaliteeti käsitlevaid standardeid, eelkõige EN 50160.

Lõputöö neljandas peatükis tehakse ülevaade iga katsestsenaariumi tulemustest ning antakse hinnang töö eesmärkide saavutamisele. Teisisõnu kuidas toitepinge kvaliteet oli mõjutatud iga stsenaariumi korral. Kuna stsenaariumi katseid oli palju, näidati lühidalt kõik tulemused tabeli kujul, et lugejal oleks lihtsam järgida plusse ja miinuseid. Lisaks andis autor oma hinnangu, millist varianti oleks kõige mõttekam kasutada antud liitumispunkti näitel ning tõi välja vastavad põhjendused.

# 1. TOITEPINGE KVALITEET

Toitepinge kvaliteet uurib mitmesuguseid elektrilisi probleeme, mis võivad mõjutada hoone või mikrovõrgu toiteallikat, seadmete tervist ja ülekandekadu. Praegu on vahelduvvoolusüsteemide võimsuse kvaliteedi mõõtmiseks olemas mitu põhistandardit, millest paljud võivad olla alalisvooluhoonete suhtes asjakohaselt kohaldatavad. IEEE Std 1159 üksikasju soovitatavad tavad võimsuse kvaliteedi mõõtmiseks. See standard kirjeldab kõiki peamisi võimsuskvaliteedi probleemide kategooriaid: möödudajad, lühiajalised sündmused (nt lohud, muhud, väikesed katkestused), pikaajalised sündmused (üle /alla pinged, suured katkestused), pinge asümmeetria, lainekuju moonutamine (harmooniline, väreelus) ja sagedushälve. Iga kategooria puhul määratleb EN 50160 [14] võrgupinge normaalsete töötingimuste piirid madal- ja keskpinge süsteemides. Pingete puhul muhud, lohud ja harmoonikad võivad kahjustada elektroonikaseadmeid. [1]

Ideaalset toitepinget iseloomustavad omadused:

- toitepinge nimisagedus, Eesti võrkudes 50 Hz,
- toitepinge nimipinge, Eesti madalpinge võrkudes 230/400 V,
- toitepingel puuduvad võrgusageduslikud hälved,
- toitepingel puuduvad ettearvamatud katkestused,
- toitepinge pingekõver on ideaalne sinusoid,
- toitepinge kolmefaasilised pinged on täielikult sümmeetrilised.

Reaalsuses ideaalset toitepinget ei saa esineda. Erandiks võiks lugeda ideaalset toitepinget elektriijaama generaatori klemmidel, aga mida kaugemale elektriijaamast liikuda ja tarbijale hoopis lähemale minna, seda enam hakkab toitepinge kvaliteet ideaalsusest muutuma. Peamine põhjus selleks on tarbija ise, kes põhjustab toitepinge kvaliteedi hälbeid. Lisaks põhjustavad pingekvaliteedi kõikumisi klassikalised loodusnähtused (torm, puude langemine liini peale) ja nendest tingitud ümberlülitused ning avariilukorrad ülekande- ja jaotusvõrgus. [2]

Toitepinge kvaliteedi sõltuvus tarbija madalpinge liitumispunktis olevatest teguritest:

- tarbija koormused (peamiselt liinivoolud ja nendest tingitud voolukõikumised ja voolutõuked),
- elektrivõrgu parameetrid (peamiselt lühisvõimsus, erinevad takistused nagu aktiiv -ja reaktiivtakistus),
- juhuslikud sündmused, mida põhjustaksid loodusnähtused või võrgu avariid,
- samas jaotusvõrgus olevate tarbijate koormused ja avariid.

Toitepinge kvaliteedi uurimise üheks peamiseks eesmärgiks on määrata, kuivõrd pinge vastab standardi nõuetele ja kas toitepinge kvaliteedi võrgusagedushälbed võivad põhjustada häireid elektriseadmete töös. Peale selle lisaks teise uuringu eesmärgiks on välja selgitada, kas valitud parameetritega toitepinge on sobilik energiatarbimiseks ja kuidas antud toitepinge parameetrid tagavad tõhusa ja säästliku energiakasutuse ning kas ja kuidas saaks toitepinge parameetreid mõjutada/muuta sellisel viisil, et elektrisüsteemis väheneksid märgatavalt võimsuskaod ja võimalikud häiringud. Lõpus oleks vaja siis välja selgitada, millised võimalused on tarbijal elektrisüsteemi täiendamiseks ning kuidas saaks muuta ja hinnata, milliseid tulemusi need täiendused anda võiksid? [2]

Seetõttu toitepinge kvaliteedi uurimine annab lugejale infot antud teema puhul, millised on parimad võimalused vähendada energiakadusid ning tõrkeid elektriseadmete töös, ning sellest sõltuvalt omakorda elektrikulusid. Reaalne pingekvaliteet madalpingevõrkudes on kompromiss tehnilise ning majandusliku teostatavuse vahel, kuna ideaalse elektrikvaliteedi tagamine läheks tarbetult kulukaks. Eesmärgiks peaks olema piisavalt hea pinge kvaliteet tarbija liitumispunktides. [2]

## 1.1 Toitepinge tase ja aeglased pingemuutused

Toitepinge tasemeks loetakse pinge keskmist efektiivväärtust. Toitepinge tase on igas madalpingevõrgus erinev ja peab jääma vahemikku  $\pm 10\%$  (Standard EN 50160) [14] nimitalitluspingest. Kuna toitepinge ei ole kunagi samal tasemel ja kõigub pidevalt, on see kliendile ebasoodne, kuna pingetaseme kõikumine põhjustab täiendavat voolutarbimist, täiendavaid võimsuskadusid ja sellest tulenevalt kliendile lisakulusid. [3]

Toitepinge taset mõjutavad tavaliselt järgnevad tegurid:

- klientide koormuskarakteristikud (aktiiv- ja reaktiivtakistus, koormuse kõikumised),
- klientide elektrisüsteemide omadused,
- toitevõrgu karakteristikud (lühisvõimsus). [3]

Kuna võrgutakistus on suurem osa ajast konstantne, põhjustab pinge kõikumist koormusvoolude kõikumine. Pinge taseme kõikumist iseloomustavad pingehälbed, mida tavaliselt väljendatakse protsendiliselt valemi kujul (1.1): [4]

$$\Delta U = U - U_0 \text{ või } \Delta U = \frac{U - U_0}{U_0} \times 100\% \quad (1.1)$$

kus:  $U_0$  – normaalne toitepinge tase,



U – toitepinge tegelik väärtus. [15]

Aeglast pingemuutust iseloomustatakse üldiselt pinge suuruse indeksi efektiivväärtuse RMS abil. Efektiivväärtuse pinge kõikumised võivad olla aeglased variatsioonid, mis koosnevad kõrvalekalletest kuni  $\pm 20\%$  selle nimiväärtusest. Et hinnata aeglaseid pingemuutusi, mida tavaliselt nimetatakse pinge ebaregulaarsuseks, kasutatakse indikaatoreid, mis väljendavad pinge hälvet selle nimiväärtusest  $U_n$ . [4]

EN 50160 kohaselt peab mõõteperioodi pikkus olema igal stsenaariumi katsel vähemalt üks nädal. Stsenaariumis kasutusel olevad PV ja LP võimsused on mõõdetud täpselt 1 nädala piirini. Sellega on antud tingimus täidetud. [14]

Peale igat stsenaariumi mõõtmist, tuleb mõõdetud pinged eksportida Exceli tabelisse, mis järel tuleb arvutada välja iga 10 minuti tagune keskmine pinge efektiivväärtused. Antud tulemid on vajalik kanda graafikule, mille alusel saab vaadelda, kas kõik alljärgnevad tingimused on täidetud:

- **kõrgtase**, kui efektiivväärtuste 10-minutiline keskvärtus jääb vahemikku 220-240 V,
- **normaaltase**, kui efektiivväärtuste 10-minutiline keskvärtus jääb vahemikku 207-244 V,
- **standardtase**, kui 95% efektiivväärtuste 10-minutiline keskvärtus jääb vahemikku 207-253 V. [15]

## 1.2 Toitepinge asümmeetria

Tehnoloogia arenedes tekivad erinevat tüüpi toitepinge kvaliteediga seotud probleemid. Selline häireallikas võib olla nii tarnija kui ka kliendi poolt. Kui selline häireallikas on allika poolel, siis loomulikult avaldab see negatiivset mõju klientidele kasutatavatele seadmetele ja halvendab seadme jõudlust. Vastupidi, kui häireallikas asub kliendi otsas, tekitab see võrgus negatiivset mõju. Asümmeetriline toitepinge põhjustab lisakadusid elektrivõrkudes. [5]

Asümmeetriliste režiimide peamiseks põhjusteks elektrivõrgu faasides on mitu.

- režiimid tulenevad jõuallikate asümmeetriast,
- elektrivõrgu elementide tasakaalustamata töö tõttu (pikisuunaline asümmeetria),

- faaside märkimisväärsete tasakaalustamata koormuste tõttu (risti asümmeetria). [6]

Tööstuse poolel on sagedaseim probleem elektrikvaliteediga juhul, kui pingete tasakaalustamatuse koefitsient ei vasta normaliseeritud väärtuste negatiivsele jadale. See on tingitud asjaolust, et elektripaigaldised on ühendatud toiteallika külge kahe faasiga, mis koormab faase ebaühtlaselt. [6]

Pingete asümmeetria kolmefaasilises elektrivõrgus normaliseeritakse kahe indikaatoriga: pingete asümmeetria koefitsient vastupidises järjestuses ja pingete asümmeetria koefitsient nulljärjestuses. Selleks on vastavad valemid (1.2) ja (1.3): [15]

$$k_a = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \quad (1.2)$$

Asümmeetriateguri võib arvutada ka faasidevaheliste pingete kaudu (valem 1.3):

$$k_a = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}, \text{ kus } \beta = \frac{U_{12}^4 + U_{23}^4 + U_{31}^4}{(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)^2} \quad (1.3)$$

Pingete asümmeetria vaatlemiseks on tarvis vaja leida asümmeetritegur. Antud tulemid on vajalik kanda graafikule, mille alusel saab vaadelda, kas kõik alljärgnevad tingimused on täidetud:

- **kõrgtase**, kui kõik asümmeetriategurid on  $k_a \leq 1\%$ ,
- **normaaltase**, kui kõik asümmeetriategurid on  $k_a \leq 1,5\%$ ,
- **standardtase**, kui kõik asümmeetriategurid on  $k_a \leq 2\%$ . [15]

Pingete asümmeetria koefitsiendi väärtused nulljärjestuses ei tohiks ületada 3% mõõtmisintervalli puhul. Isegi kui eeldada, et teistel nädalapäevadel ei ületa selle koefitsiendi väärtus normaalväärtust, siis sellegi poolest on vaadeldavatel juhtudel elektrienergia kvaliteet rikutud pingete tasakaalustamatuse ehk asümmeetria tõttu. See näitab elektrienergia kvaliteedi säilitamise probleemi aktuaalsust toitesüsteemides, kuna suuremal või vähemal määral pingetasümmeetria olemasolu on enam-vähem iseloomulik erineva pingeklassiga elektrivõrkudele. [6]

### 1.3 Kiired pingemuutused

Kiire pingemuutus (RVC – *Rapid Voltage Change*) on defineeritud kui kiire üleminek pinge efektiivväärtuses (RMS), mis tekib kahe püsiseisundi vahel ja mille kestel pinge RMS väärtus ei ületa languse/tõusu lävesid. Kiireid pingemuutusi, isegi tavatalitluse pingetolerantside piires, peetakse häirivaks nähtuseks, mida tuleks piirata elektrivõrkudes. Kuid isegi siis, kui sellised pinged oma seisukohast on talutavad, tuleks neid piirata, et hoida pinge suurust kitsastes piirides ja tagada elektrisüsteemi võrkude õige ja stabiilne toimimine. [7]

Kiireid pingemuutusi võivad põhjustada lülitustoimingud, nagu mootorite käivitamine, kondensaatoripankade sisse-/väljalülitamine, koormuse ümberlülitamine või trafo astmelüliti toimingud. Lisaks võivad kiireid pinge muutusi esile kutsuda ka koormuse äkilised kõikumised või hajutatud energiaressursside, näiteks päikese- või tuuleenergia-süsteemide väljundvõimsuse kõikumised. [7]

PV väljundi järsud pinge muutused, mis on tingitud pilvede läbilaskvuse tõttu, mõjutavad elektrijaamade tööd. Nagu varasemalt sai mainitud, siis võib päikeseenergia väljundi kõikumine põhjustada ka olulisi kiireid ja järske pingekõikumisi. Pinge kiire kõikumine võib tekitada lubamatuid häireid toiteallikates. Kiired pingemuutused on väga kriitiline probleem elektrijaotussüsteemis, eriti madalpinge toiteallikates, mis on tavaliselt nõrgad ning asuvad peamisest alajaamast kaugel ja millel on kõrge R/X suhe. IEC standard 61000-2-2 viitab sellele, et pinge kiire kõikumine üle 3% nimiväärtusest ei ole madalpinge jaotuse jaoks vastuvõetav. [8]

Kiireid pingemuutusi saab arvutada järgneva valemiga (1.4):

$$\delta U = U_{MAX} - U_{MIN} \text{ või } \delta U = \frac{(U_{MAX} - U_{MIN})}{U_n} \times 100\% \quad (1.4)$$

Nõrgas jaotusvõrgus, kus on palju PV-süsteeme, on võimalus seda piiri rikkuda. Kiired pingemuutused jaotusvõrkudes võivad põhjustada lubamatuid virvendusi, releede ja tundlike elektroonikaseadmete lakkamist ning asünkroonmootorite seiskumist. Seetõttu on vajalik lahendus PV väljundvõimsusi tasandada, et vähendada kiireid pingemuutusi. Selleks on tänapäeval mitmeid võimalusi kuidas piirata kiireid pingemuutusi: kasutades erinevaid tehnoloogiaid, sealhulgas elektrilist kahekihilist kondensaatorit, aku energiasalvestit või mõlema kombinatsiooni. [8]

## 1.4 PV inverteri mõju

PV põhises võrgus on tarvis päikesest tulev fotogalvaaniline vool muundada vahelduvvooluks, kasutades selleks invertereid. [9]

PV-süsteemid on suuresti hajutatud madalpingevõrkudes, ühendatud väikese nimivõimsusega PV-inverteriga (alates mõnest kW kuni kümnete kW) ja üldiselt paigaldatud katustele. Igal hoonel on oma PV-inverterid (PV olemasolul). Juhul kui päikeseelektrijaama tootmisvõimsus on suur, võib võrgupinge tõusta kuni vastuvõetamatu tasemeni, kui aktiivenergia tootmine on suurem kui koormuse nõudlus. [10]

Kui võrgus kasutada PV inverterit tasakaalustamata pinge tingimustes, siis võib see põhjustada harmoonikute sisalduse suurenemist ja kahekordse sagedusega pulsatsiooni PV inverteri alalisvoolulülis. Järelikult on süsteemis jõudluse halvenemist, sealhulgas pinge efektiivsuse vähenemist ja kliendi seadmete kahjustamist. Inverteri väljalülitamine pinge tasakaalustamatuse tõttu võib esineda ka äärmuslikel juhtudel, kui süsteemi komponentide tõttu on tekkinud negatiivne faasijärjestus. [11]

Elektrilevi standardikohaselt on näidatud vastavad piirid millise pinge jooksul inverter aktiveerub ning millise aja jooksul taastub. (Tabel 1.1). [16]

Tabel 1.1 Inverteri aktiveerumise ja taastumise väärtused [16]

	<i>Alapinge</i>		<i>Ülepinge I aste</i>		<i>Ülepinge II aste</i>	
<i>Parameeter</i>	<i>Pinge</i>	<i>Aeg</i>	<i>Pinge</i>	<i>Aeg</i>	<i>Pinge</i>	<i>Aeg</i>
<i>Soovituslik väärtus</i>	<i>0,85 Un</i>	<i>1,5 s</i>	<i>1,11 Un</i>	<i>3 s</i>	<i>1,15 Un</i>	<i>0,1 s</i>
<i>Automaatne taaslülitus pärast häiringut võrgupinge taastumisel</i>						
<i>Parameeter</i>	<i>Aeg</i>	<i>Pingevahemik</i>				
<i>Soovituslik väärtus</i>	<i>60 s</i>	<i>0,9 Un – 1,1 Un</i>				

Tabel 1.1 kohaselt saab järeldada, et kui pinged tõusevad või langevad PV tõttu, hakkavad tekkima katkendlikud pinged, kuna inverter hakkab end edasi-tagasi sissevälja lülitama, mis tähendab aga omakorda halba mõju toitepingele, kuna pinge pole konstantne.

Kui inverter lülitab end välja, on vajalik inverteril end uuesti taas sisse lülitada. Selleks on Elektrilevi standardikohaselt ettemääratud automaatne aeg ning võrgusagedus, mis on näidatud Tabel 1.1. [16]

## 1.5 PV mõju toitepinge kvaliteedile

Võrreldes muude taastuvenergia tehnoloogiatega seisavad PV-süsteemid endiselt suurte probleemidega ja võivad põhjustada süsteemile soovimatuid mõjusid, nagu toiteallikate ülekoormamine, harmooniline saaste, kõrged investeerimiskulud, madal efektiivsus ja madal töökindlus. Lisaks võivad päikesekiirguse kõikumised põhjustada võimsuse hälbeid ja pingevärelust, mille tulemuseks on soovimatu mõju kõrge läbilaskvusega PV-süsteemidele jaotusvõrgus. [12]

PV-süsteemide väljund võib pilvede liikumise ja sellest tulenevate varjude tõttu märkimisväärselt erineda, näiteks 80% selle nimivõimsusest. Need olulised kõikumised võivad põhjustada kahjulikke mõjusid, nagu üle-/alapinge probleemid, vastupidine võimsusvool ja toitepinge probleemid. [13]

Kiireloomulised häired on seotud toodetud elektri kvaliteediga. Kaks seisukohta toitekvaliteedi määratluste kohta. Kasulikkuse seisukohalt on voolu kvaliteet defineeritud kui toiteallika töökindlus ja omadused, mis võimaldavad seadmetel õigesti töötada. Teisest küljest tarbijad määravad elektrikvaliteeti ning pinge- ja voolusageduse hälbeid, mis võivad põhjustada kliendi seadmetes rikkeid või lausa töökaotust. Toitekvaliteedi häirete näideteks on pingelangus, paisumine, liigpinge, värelus, katkestus ja harmoonikud. [12]

Halb elektrikvaliteet tuleneb peamiselt harmooniliste ja reaktiivvõimsuse mõjust. Harmoonikute peamised mõjud süsteemile:

- seadmete ülekuumenemine, mis põhjustab seadme rikke või kahjustuse,
- süsteemi rike või seadmete talitlushäire,
- kaitseseadmete talitlushäire ja rike,
- protsessi häire. [12]

PV-süsteemide tungimine jaotusvõrku on üks peamisi allikaid moonutamaks harmoonilisi voolu- ja pingelaine kujusid. Seetõttu on see muutumas suureks probleemiks, eriti jaotussüsteemide jaoks. [12]

## **2. PÄIKESEELEKTRIJAAMA MODELLEERIMINE MADALPINGEVÕRGUS**

Päikeseelektrijaama modelleerimiseks kasutatakse ühte peamist programmi – MATLAB Simulink. Simulink on vajalik madalpinge liitumispunkti ja sellega seotud võrgu osade modelleerimiseks, et simulatsioonidega hinnata energiatootmisüksuse mõju liitumispunkti toitepinge kvaliteedile. Kõik komponendid on valitud Simulink Electrical kategooria alt. Antud kategoorias on lai valik erinevaid elektrikomponente, mis lihtsustasid skeemi kokku panna.

Kuna uurimistöö suurim osakaal on uurida PV mõju toitepingele madalpinge võrgu liitumispunktis, siis läheb tarvis reaalseid ühe nädala PV tootmisvõimsusi. Selleks kasutatakse põllumaale paigaldatud päikeseelektrijaama, mille koordinaatideks on ligikaudu (587460; 257697).

Võimsuse tulemused on näidatud eriti täpselt, viie sekundi intervalliga seitsme päeva kohta. Lisaks on välja toodud imporditud ja eksporditud võimsused 5 sekundi intervallidega. Kõik vajalikud tulemused, mida läheb tarvis modelleerimisel, transformeeritakse üle MATLABI Simulinki funktsiooni.

Teiseks oluliseks parameetrik on liitumispunkti tarbija tarbitud võimsused. Selleks kasutatakse juhendaja suvilat, kuhu on paigaldatud arvesti, mis loeb ära 10 sekundi intervallide tagant tarbitud võimsusi. Antud tulemused tuleb esiteks kanda Excel´isse, et seejärel kasutada Simulink´i modelleerimise korral.

Viimasteks olulisteks parameetriteks on madalpinge võrgu parameetrid. Nendeks on siis alajaamas asuva trafo parameetrid ning lisaks elektriliinide parameetrid. Kõik parameetrid on uuritud ettevõtte Enefit Connect´i töötaja käest, kes jagas erinevaid materjale, mille põhjal sai teada, mis parameetreid tuleb kasutada simulatsioonis, et tegu oleks reaalse olukorraga.

Kuna toitepinge kvaliteet on väga mõjutav väikse võimsuse trafode poolt, siis valiti selleks juhendaja talukompleksi juures olev vana mastalajaam. Antud alajaam asub Võrus ning alajaama nimetus on „Maaski“. Alajaamast väljuva fiidri õhuliini paljasjuhtme tüüp on ALUS. 4x50. Tegu on kolmefaasilise alumiinium õhuliini kaabliga. Kõik täpsemad parameetri väärtused selgitatakse järgnevas peatükis.

## 2.1 Lähteandmed modelleerimiseks

Antud uuringu läbiviimiseks kasutati reaalseid elektrivõrgu parameetreid, mis on ametlikult kirja pandud ja läbi mõõdetud. Et simulatsiooni modelleerimist läbi viia, läks autoril tarvis järgnevaid parameetreid ja mõõtmisi: trafo ja kaablite parameetrid, PV tootmine (kW) ja liitumispunkti tarbimine (W). Kõik parameetrid on esitatud tabeli kujul, mida läks Simulinkis tarvis mõõtmisteks.

### 2.1.1 Trafo

Kõik parameetrid on saadud tööalaselt Enefit Connect'i rakenduslikust Exceli dokumendist. (Tabel 2.1). Tegu on reaalseste parameetritega.

Trafo asub mastalajaamas nimega Maaski:(Võru). Kuna uuritakse ühe liitumispunktiga võrku, siis sobib antud trafo ideaalselt, sest tegu on päriselus samuti ühe fiidri alajaamaga.

Tabel 2.1 Trafo parameetrid ja nende väärtused

Parameeter	Väärtus
Trafo lülitusgrupp	Y/Yn
Trafo nimivõimsus, $S_n$	25 kVA
Trafo primaar nimipinge, $U_{n1}$	10000 V
Trafo sekundaar nimipinge, $U_{n2}$	400 V
Trafo primaar nimivool, $I_{n1}$	1,4 A
Trafo sekundaar nimivool, $I_{n2}$	42,2 A
Trafo primaar takistus, $R_1$	154 $\Omega$
Trafo primaar takistus, $X_1$	0,777 $\Omega$
Trafo sekundaar takistus, $R_2$	0,187 $\Omega$
Trafo sekundaar takistus, $X_2$	0,0007 $\Omega$

### 2.1.2 Õhuliin

Nagu trafo parameetrite puhul, siis õhuliini parameetrid sai samuti Enefit Connect'i rakenduslikust Exceli dokumendist. Nagu trafo puhul siin õhuliini puhul kasutatakse samuti reaalseid parameetreid.

Tegu on Eestis laialt kasutatud õhuliini tüübiga – ALUS. Uuringus kasutati selleks õhuliini mudelit ALUS. 4x50. Õhuliini pikkus alajaamast liitumispunktini on 315 meetrit. Tegu on kolme faasilise õhuliini kaabliga. Kõikide takistuste väärtused on toodud välja allolevas tabelis (Tabel 2.2).

Tabel 2.2 Õhuliini takistuse parameetrid ja nende väärtused

Parameeter	Väärtus
Faasijuhtme takistus 40 °C juures, R	0,6199 $\Omega$ /km
Faasijuhtme reaktiivtakistus, X	0,059 $\Omega$ /km
Nulljärgnevus-faasitakistus 40 °C, R <sub>0</sub>	0,6199 $\Omega$ /km
Nulljärgnevus-faasireaktiivtakistus, X <sub>0</sub>	0,25 $\Omega$ /km

### 2.1.3 PV toodang

PV toodangu ja LP tarbimis võimsused olid mõlemal juhul näidatud kuupäevaliselt ja kellajaliselt, mille intervall oli 10 sekundit. MATLAB ei lase kasutada Simulinkis kellaegaseid, seetõttu tuli muuta algusajaks 0 sekundit ja iga järgnev lahter on +10 sekundit.

Koordinaatide alusel asuvas maakohas olevate PEJ toodetud võimsused olid näidatud kilovattides iga kümne sekundi tagant. Antud PEJ koguvõimsus ulatub umbes 20 kW-ni. Aga kuna simulatsioonis kasutatakse 7 kW võimsusega päikeseelektrijaama, tuleb toodetud võimsused skaleerida 7 kW päikeseelektrijaama toodanguga vastavusse. Selleks võimsus jagati arvuga 20 läbi ja korrutati arvuga 7.

### 2.1.4 LP tarbimine

Liitumispunkti tarbitud võimsused, mida kasutatakse Simulinki modelleerimisel on esitatud vattides ja ei olnud vajadust skaleerida ümber.

Siiski tasub pöörata tähelepanu iga faasi tarbimistele, kuna igas faasis on erinevad koormused. Kõik nimetatud koormusi tekitavad seadmed on toodud välja tabelikujul (Tabel 2.3), et anda kõige ülevaatlikum arusaam.

Tabel 2.3 Mõõteperioodil kasutatud põhilised elektriseadmed uuritavas liitumispunktis

Faasi nimetus	Seadmed	Võimsus
Faas L1	Elektriauto	2,3 kW
Faas L2	Boiler	1,9 kW
Faas L3	Telekas, külmkapp	100 W
Faasid L1, L2, L3	Lüpsimasin	0,55 kW
Faasid L1, L2, L3	Sõnnikukraap	2,2 kW
Faasid L1, L2, L3	Jahuveski	4,5 kW

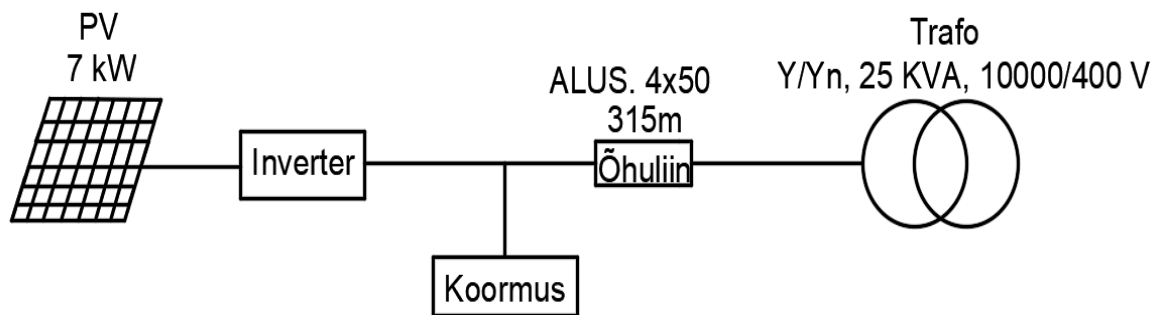


## 2.2 Mudelite väljatöötamine ja valik

Simulinki modelleerimisel oli võetud aluseks MATLABi lisandmoodul *Simscape Electrical*. Antud lisamooduli abil saab Simulinkis modelleerida elektrilisi komponente ja muuta plokkide parameetreid.

### 2.2.1 Võrgu aseskeem

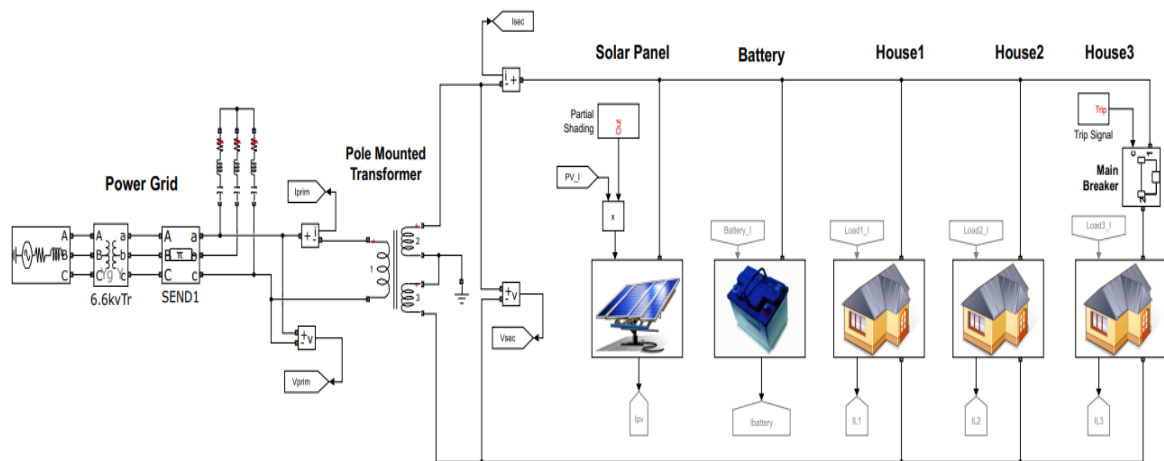
Enne kui minnakse simuleerimise juurde, näidatakse lihtsa aseskeemi näol, kuidas näeb välja antud võrk. (Joonis 2.1). Madalpingevõrgu kujul olev skeem koosneb viiest erinevast komponendist. Alustatakse trafost, mis tagab madalpingevõrgus elektrivarustust. Trafost väljub komponent õhuliin ning jõuab kuni koormuseni ehk liitumispunkti. Liitumispunktiga lisaks on ühendatud inverter, kuna lõppu on lisatud päikeseelektrijaam.



Joonis 2.1 Võrgu aseskeem koos õhuliiniga

### 2.2.2 Algne mudel

Mudeli aluseks valiti MATLAB´is näidisenäna toodud *power\_microgrid*, mida oli tarvis muuta, et viia saadud mudel vastavusse reaalse liitumispunktiga ning lisada võimekus toitepinge kvaliteedi monitoorimiseks (Joonis 2.2). Algsel kujul ei olnud mudel sobilik, sest tegemist oli Ameerika Ühendriikide pärase võrguga, mis kasutaks justkui kahefaasilist võrku, nagu on näha Joonis 2.2. Eesti võrkudes kasutatakse üldjuhul kolmefaasilist ja ühefaasilist madalpingevõrku. Lisaks on joonisel mitu liitumispunkti, mis ei ole kooskõlas reaalse olukorraga.

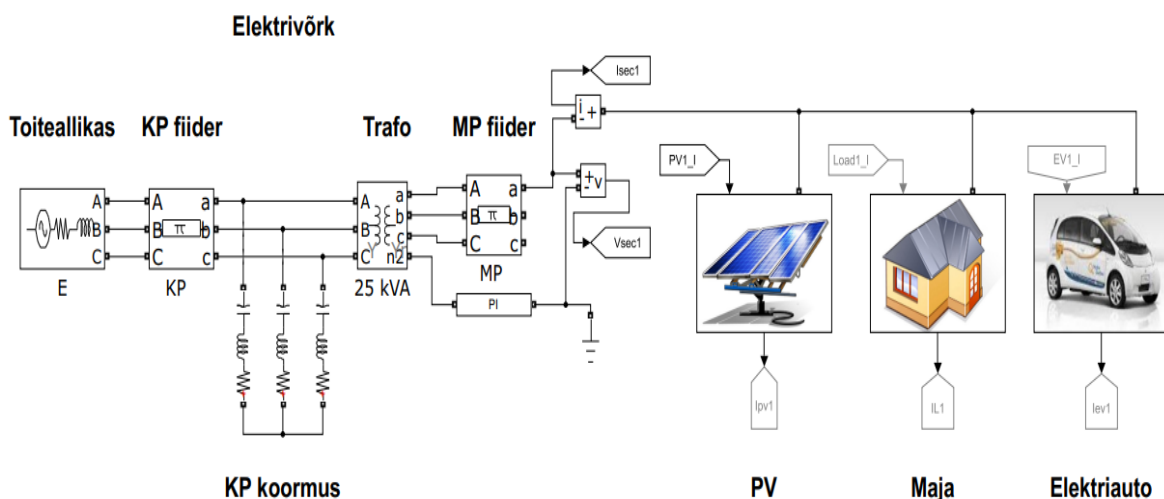


Joonis 2.2 Algne mudel „power microgrid“

Antud mudelit (Joonis 2.2) pidi autor muutma, et saavutada lõplik ja valmis mudel simuleerimiseks.

### 2.2.3 Täiendatud ühefaasiline mudel

Esialgne mudel on ühefaasiline, mistõttu tuli mõningad muudatused viia läbi saavutamaks vajalik ja efektiivne mudel. Algses mudelis (Joonis 2.2) on lisatud kaks trafot, aku ja 3 majapidamist. Selleks, et viia vastavusse stsenaariumi mudeliga, tuli eemaldada üks trafo, aku ja 2 majapidamist. Ülejäänud tegevus põhines parameetrite muutmisel erinevates plokkides. Selleks sai kasutada varasemalt nimetatud parameetreid (Joonis 2.1 ja Joonis 2.2). Valmiskujul ühefaasiline skeem on näidatud alljärgnevas joonises (Joonis 2.3).

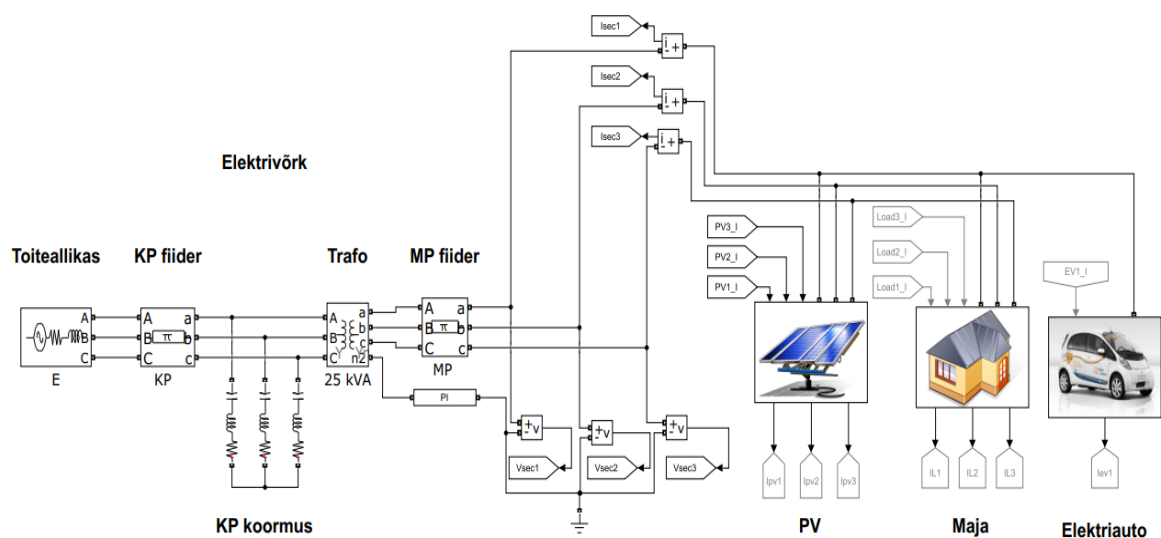


Joonis 2.3 Ühefaasiline madalpingevõrk koos PV ja liitumispunktiga mudel

Joonis 2.3 mudelis on näha, et esialgses mudelist on skeem rohkem kokkutõmbunud. Eemaldati kaks väljuvat faasi ja lisati maandus ning parameetrite muudatus. Lisaks on mudeli sisendisse lisatud ka inverter, mis puudus esialgses mudelis (Joonis 2.2).

#### 2.2.4 Täiendatud kolmefaasiline mudel

Teises stsenaariumis simuleeritakse läbi kolme faasilise ühenduse korral võrku. Kuna esialgne mudel (Joonis 2.2) on PV ja LP ühenduse korral ühefaasiline, tuleb esialgses mudelist koostada suuremaid muudatusi. Selleks muudetakse PV ja LP kolme faasiliseks ning trafost samuti väljub kolm faasi. Kõik parameetrid jäid samaks. Valmiskujul skeem on näidatud allolevas mudelis (Joonis 2.4).

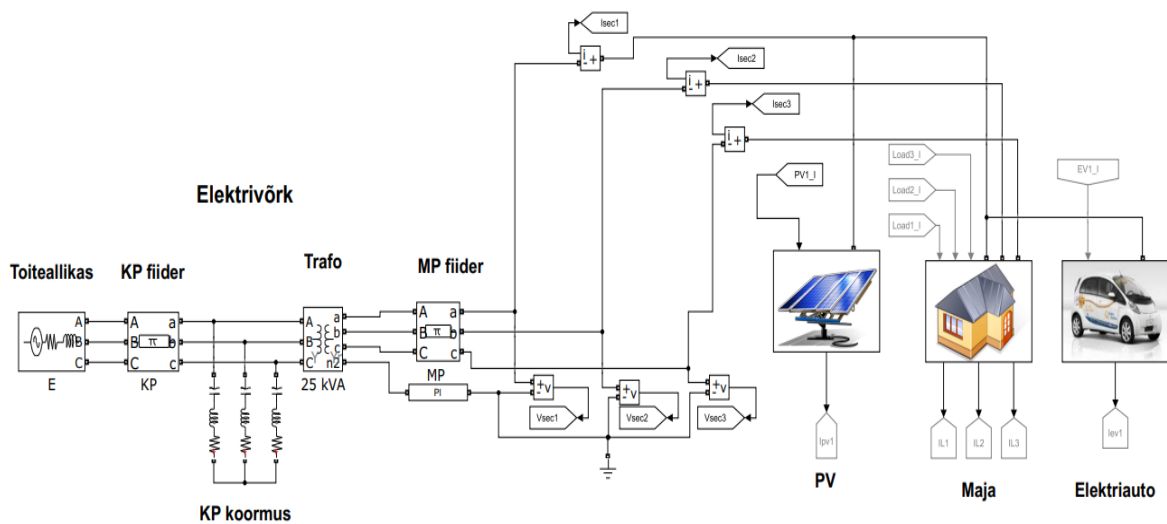


Joonis 2.4 Kolmefaasiline madalpingevõrk koos PV ja liitumispunktiga mudel

Joonis 2.4 mudelis on näha, et suurim erinevus ühefaasilise mudeli (Joonis 2.3) ees on kahe lisafaasi olemus trafost väljudes ning PV ja LP sisendis ja väljundis. Kõik muu võrreldes ühefaasilise mudeliga, on oma olemuselt samaväärne, kuna kõik plokkides olevad parameetrid säilitasid oma väärtusi.

#### 2.2.5 Täiendatud kolmefaasiline mudel, milles PV on ühefaasiline

Võrreldes eelmise mudeliga (Joonis 2.4), toimus PV osas ainukene muudatus. Võrk säilitab edasi kolme faasilist ühendust, aga PV ühendus muudetakse ühefaasiliseks. Et saada tootmisandmed ühefaasi kohta, on lisatud *MATLAB*'i *Simulink*'i plokk, mis jagab toomise kolmeks, ehk siis igal faasil oleks võrdne tootmine. Antud skeem on näidatud alljärgnevas joonises (Joonis 2.5).



Joonis 2.5 Kolmefaasiline madalpingevõrk, kus PV on ühefaasiline

## 2.3 Simulatsiooni stsenaariumite kirjeldus

Simulink simulatsiooni stsenaariumite fookusteks saavad olema kõik eelnevalt lahti seletatud mudelid (Joonis 2.3, Joonis 2.4 ja Joonis 2.5). Et analüüsida toitepinge kvaliteeti, on tarvis vaatluse alla võtta järgnevad stsenaariumi kirjeldused, mis on toodud välja Tabel 2.4 kujul

Tabel 2.4 Modelleerimise stsenaariumi kirjeldused

Stsenaarium	Liitumise tüüp	Märkused
1.	Ühefaasiline võrk	PV võimsus 7/3 kW
2.	Kolmefaasiline võrk	PV võimsus 7 kW
3.	Kolmefaasiline võrk	PV võimsus 7/3 kW, PV on ühefaasiline
4.	Kolmefaasiline võrk	PV võimsus 25 kW

Kõigi stsenaariumite puhul on kasutatud algseid väljatooduid parameetreid (Tabel 2.1 ja Tabel 2.2). Ainukene erinevus tuleneb viimasel stsenaariumil, kus PV tootang suurendatakse 25 kW juurde.

### 3. TOITEPINGE KVALITEEDI ANALÜÜS

Kõigi simuleerimiste stsenaariumite vaatlemiseks kasutatakse ühte peamist moodust, mida saab Simulinkis peale skeemi käivitamist avada – „Data Inspector“. Antud nimetusega programmi funktsiooniga on võimalik arvutada välja kõigi 7 päeva pinged 60 sekundi kaupa või 1 sekundi kaupa. 60 sekundi intervallidega andmed lähevad tarvis aeglaste pingemuutuste jaoks ning 1 sekundi andmed lähevad tarvis kiirete pingemuutuste analüüsiks.

Toitepinge kvaliteedi analüüsis peatakse standardi EN 50160 nõuetest kinni, mille alusel hakatakse teostama mitmekülgseid analüüse, et mõista kuidas PV võib mõjutada toitepinge kvaliteeti. Järgnevalt on näidatud esialgu ühefaasi kohta ning pärast seda kolmeefaasiline analüüs. Analüüsi puhul võrreldakse toitepinget, kui PV pole ühendatud ning kui PV on ühendatud.

Analüüsiks vajalikud näitajad:

- pinge tase ja aeglased pingemuutused,
- kiired pingemuutused,
- kolmeefaasi puhul pingete asümmeetria,
- pinge lohud ja muhud. [14]

Enne kui analüüsitakse ülaltooduid näitajad, on näidatud esialgu graafiliselt pingete väärtusi igal teatud ajahetkel, et anda lugejale reaalne ettekujutus, millised pinged olid liitumispunktis ilma PV toodanguta ja koos PV toodanguga.

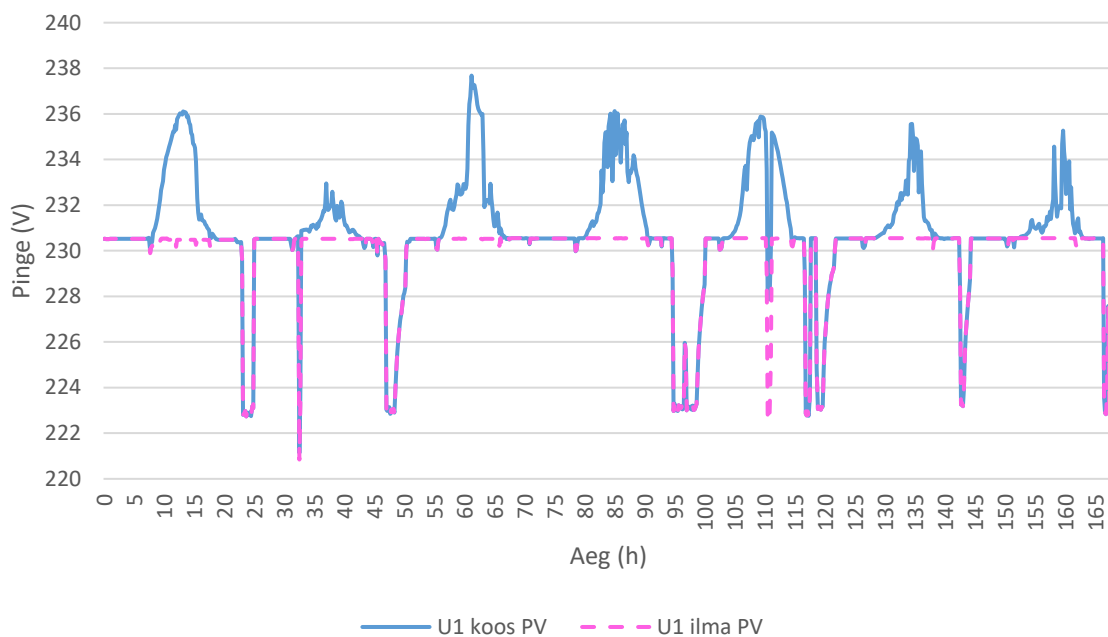
Kõikide analüüside teostamiseks on tehtud „Data inspectorist“ väljavõtte ning mis omakorda on konverteeritud Exceli tabelisse. Sellisel moel on võimalik analüüsiks teha vastavad arvutused, et hiljem vormistada graafik. Lisaks graafikule on osades peatükkides toodud lisa tabelid, et anda parem ja detailsem ülevaade teostatud katsetulemustest.

Osade katsetulemuste jõudmiseks oli vaja MATLABis kirjutada vastav „script“, mis lihtsustas autori jaoks tööd, et saada puhtal kujul katsetulemusi. See oli vajalik, kuna andmeid oli meeletult palju, mida ükshaaval töödelda läbi iseseisvalt.

## 3.1 Ühefaasilise võrgu analüüs

### 3.1.1 Toitepinge väärtused 7 päeva jooksul

Ühefaasilise võrgu analüüsi puhul võeti vaatluse alla faas U1, kuna antud faasil oli tarbimise koha pealt suurim koormus võrreldes teiste faasidega. Joonis 3.1 on näidatud kuidas PV mõjutab faasi U1 pingeid 7 päeva kohta. Pinged on keskmestatud 10 minutiliste intervallide kaupa.

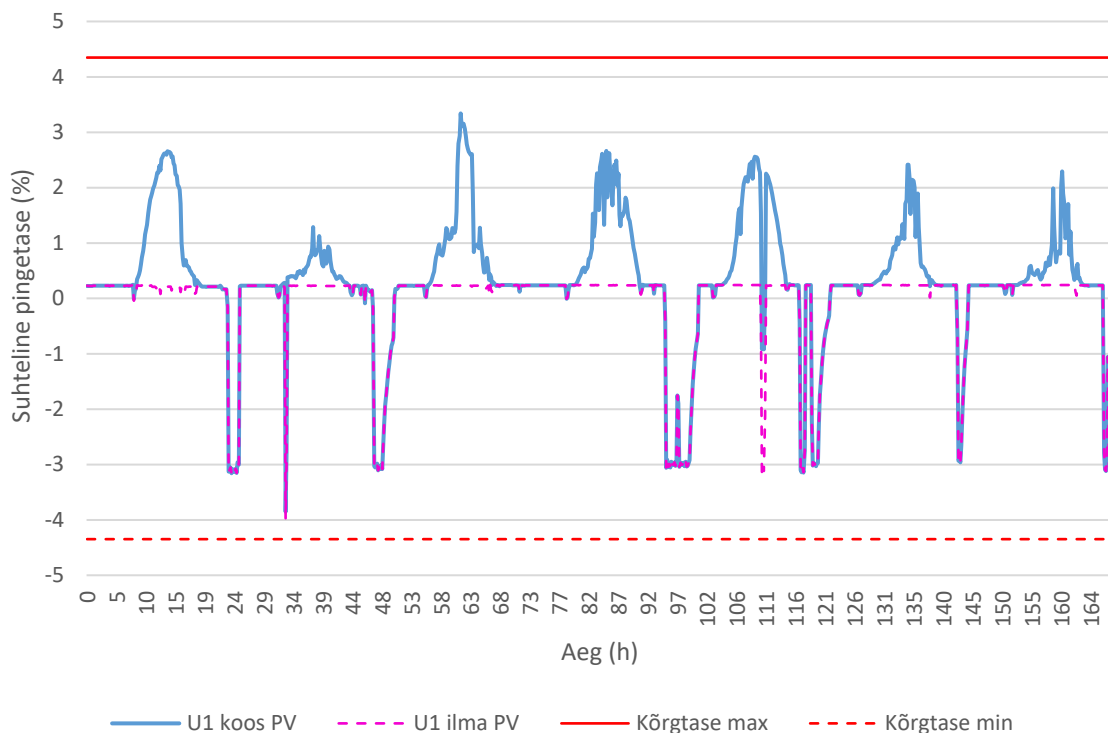


Joonis 3.1 Ühefaasilised pinged 7 päeva kohta koos ja ilma PV toodanguta

Joonis 3.1 järgi saab järeldada, et faasi U1 pinged on normaal suurustes – 230 V piires. Öösiti kui pandi elektriauto laadima, kukkus pinge ligikaudu 8 V võrra allapoole nimipingest. Kuna PV ei tooda öösiti energiat, ei suuda PV mõjutada elektriauto laadimise ajal olevaid pingeid. Lisaks on näha, et päevasel ajal, kui PV tootis energiat, tekkisid pingetõusud, mis tõstsid pingeid võrreldes nimipingega 6 V võrra.

### 3.1.2 Pingetase ja aeglased pingemuutused

Pingetaseme ja aeglaste pingemuutuste korral teisendatakse pinged efektiivväärtusteks 10-minutilise keskmise järgi. Lisaks graafikule kantakse tasemed, mille vahemikku peaksid pinge efektiivväärtused jääma. Tasemete valikud sai valitud paragrahvi 1.1 järgi. Antud tasemed on teisendatud efektiivväärtuste kujul valemi (1.1) abil. Antud olukorda kirjeldab all järgnev Joonis 3.2.



Joonis 3.2 Ühefaasilise pingete efektiivväärtused 7 päeva kohta koos ja ilma PV toodanguta

Vaadates kõrgtaseme piire, saab järeldada, et antud võrk jääb kõrgtaseme piiridesse, kuna mitte ühelgi korral ei läinud pinged üle lubatud piiride. Saab järeldada, et antud võrk võtaks hästi vastu ühefaasilise inverteriga PV-d, kuna ei teki probleeme liitumispunktis tänu kõrgtasemele.

Järgnevalt on antud ülevaade pingete maksimum, miinimum ja keskmine väärtus iga katse puhul. Kõik tulemused on kantud selleks vastavalt tabeli kujule, mida esitleb allolev Tabel 3.1.

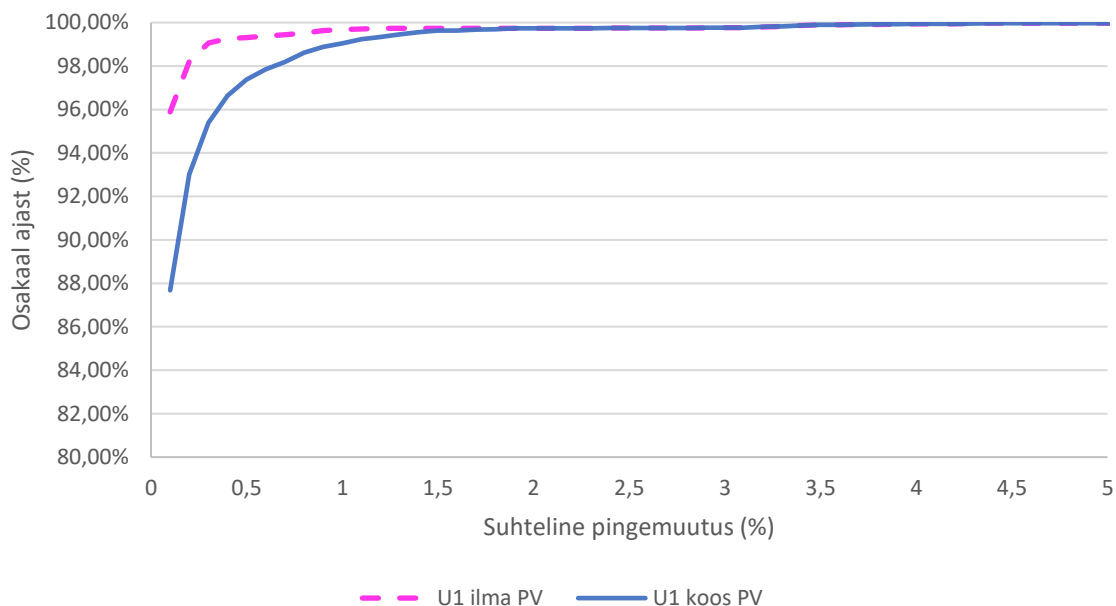
Tabel 3.1 Suhtelise pingetaseme maksimum, miinimum ja keskmine väärtus

	<b>MAX (%)</b>	<b>MIN (%)</b>	<b>KESKMINE (%)</b>
Ilma PV	0,242	-3,978	-0,072
Koos PV	3,339	-3,854	0,318

Tabel 3.1 järgi saab järeldada, et PV korral keskmine pingetase tõusis 0,39% võrra ning miinimum pingetase 0,12% võrreldes sellega kui PV pole võrku ühendatud. Suurim erinevus on maksimum pingetase korral, kui pingetase tõusis PV korral üle 3%.

### 3.1.3 Kiired pingemuutused

Kiirete pingemuutuste korral vaadeldakse, kui kiirelt ja millise osakaaluga pinged ajas muutuvad. Mida suurema osakaaluga ajast lühikese ajajooksul kiired pingemuutused toimuvad, seda kvaliteetsem on võrk. Vastavad pingemuutused on toodud välja joonise (Joonis 3.3) abil.



Joonis 3.3 Ühefaasilised kiired pingemuutused koos ja ilma PV tootmise korral

Selgub, et kui PV pole ühendatud võrku, on tegu üpris kiirete pingemuutustega. Nimelt ilma PV tootmiseta on suurim ülekaal kiireid pingemuutusi 96%. Kui aga võrku ühendatakse PV, muutub pilt palju halvemaks. Nimelt pea 8% vähem kiireid pingemuutusi on PV tootmise ajal.

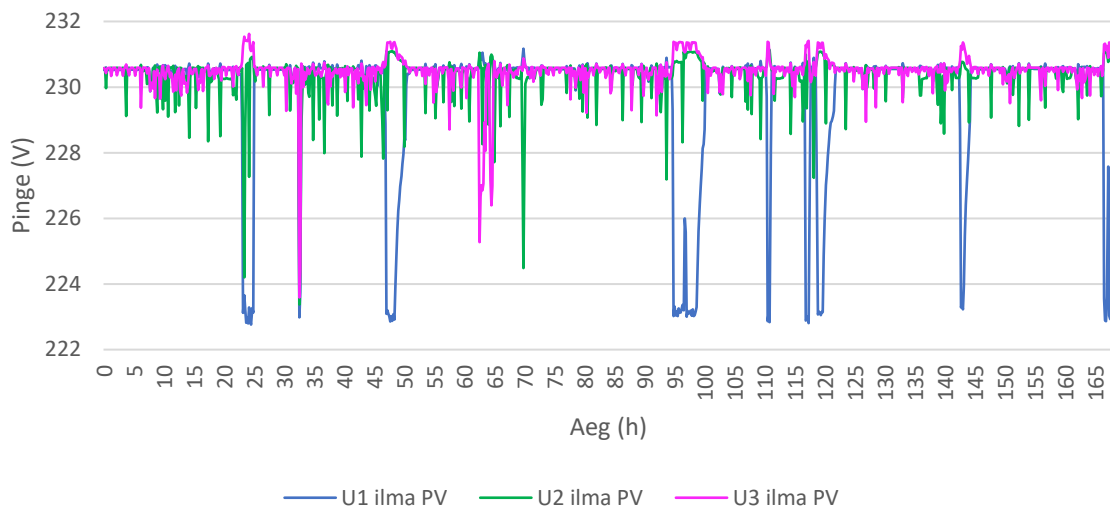
Mõlema näite puhul saavutavad kiired pinged täis osakaalu ligikaudu 1,5% juures. Standard näeb ette, et kiirete pingete pingemuutus ei tohi ületada 5%. Seetõttu võib järeldada, et mõlema näite puhul on võrk korras ja ole tekkinud suuremaid probleeme.

## 3.2 Kolmefaasilise võrgu analüüs

### 3.2.1 Toitepinge väärtused 7 päeva kohta

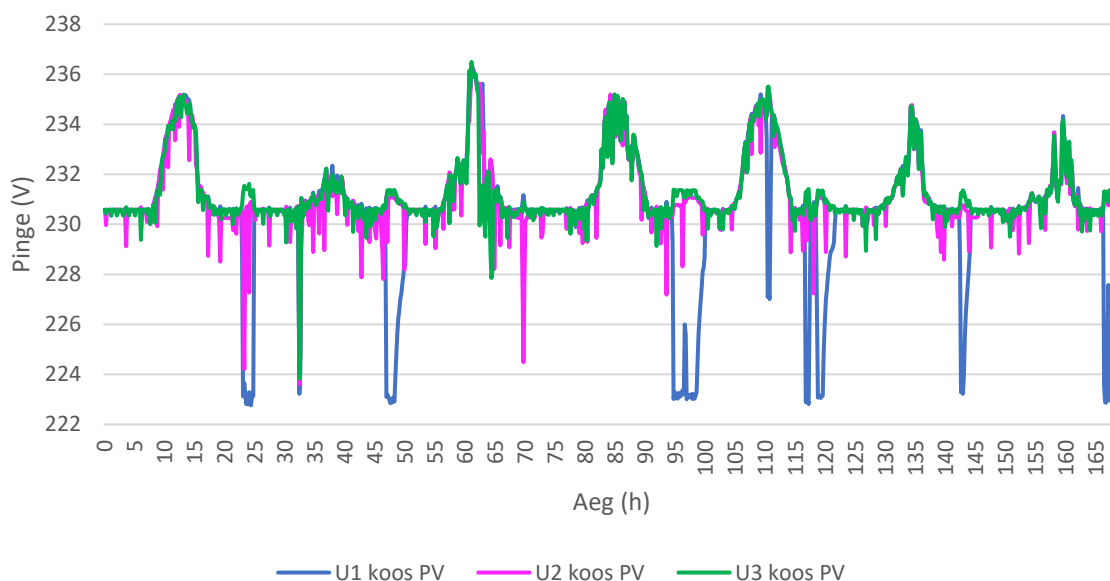
Järgnevalt vaadeldakse kõiki kolme faasi ning võrreldakse kuidas pinged mõjutavad üksteist nii toomise kui ilma tootmise ajal. Kuna mõlema stsenaariumi korral vaadelda kõiki kuute faasi (3 faasi PV korral ja 3 faasi ilma PV korral) on liiga mahukas ja keeruline ühe joonise kaudu, on vormistatud 2 eraldi joonist. Järgnevaid stsenaariume kirjeldavad edasised joonised: Joonis 3.4 ja Joonis 3.5.





Joonis 3.4 Kolmefaasilised pinged 7 päeva kohta ilma PV toodanguta

Selgub, et kõik kolm faasi on normaaltingimustel nimipinge lähedikus, kui puudub suurem koormus liitumispunktis. Kui aga öösi pannakse elektriauto laadima, langes faasi U1 pinge märkimisväärselt põhjustades teistes pingetes madalaid pingetõuse. See on põhjustatud Y/Yn trafo ühendusgrupi tõttu, kuna faasid on omavahel suuresti sõltuvuses.

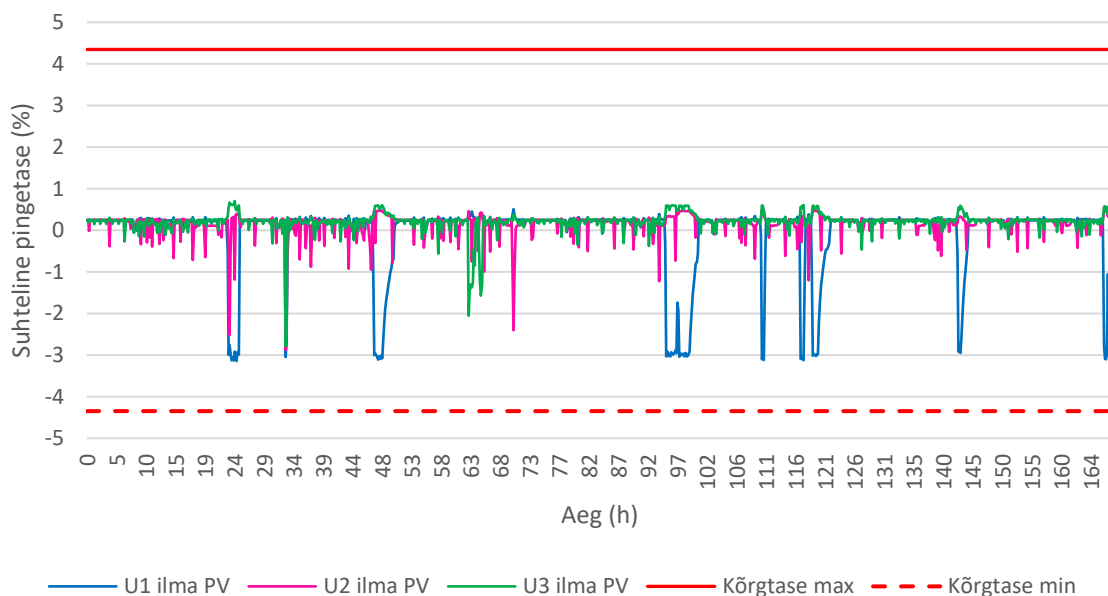


Joonis 3.5 Kolmefaasilised pinged 7 päeva kohta koos PV toodanguga

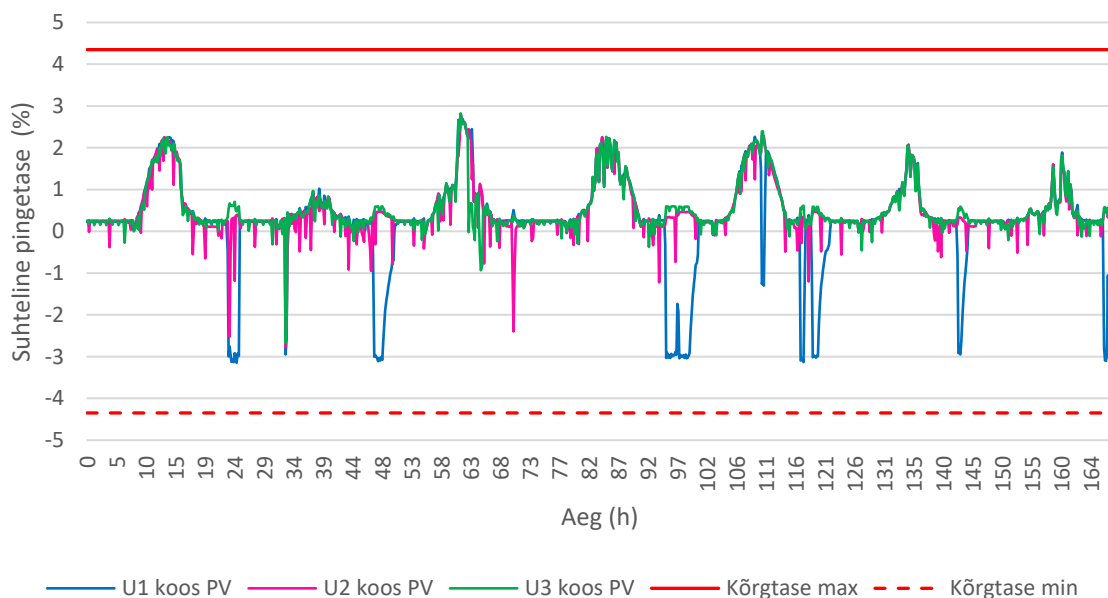
Nagu eelmisel joonisel oli näha, siis tarbimise koha pealt on samasugused pingelangused, kuna PV nendel ajal ei saa öisel ajal toota ja parandada pingelangusid. Pingetõusud olid praktiliselt samasugused kõigil faasidel, vaid väga väikeste erinevustega. See viitab sellele, et faasid tootsid võrdselt, kuna tootmine oli jaotatud võrdselt iga faasi kohta.

### 3.2.2 Pingetase ja aeglased pingemuutused

Võrreldakse kahe erineva joonise abil kahte stsenaariumit, kus võrk on ühendatud PV-ga ning kui võrk pole ühendatud PV-ga. Neid kirjeldavad Joonis 3.6 ja Joonis 3.7.



Joonis 3.6 Kolmefaasilise pinge efektiivväärtused 7 päeva kohta ilma PV toodanguta



Joonis 3.7 Kolmefaasilise pinge efektiivväärtused 7 päeva kohta koos PV toodanguga

Mõlema joonise järgi (Joonis 3.6 ja Joonis 3.7) saab järeldada, et tegu on jällegi kõrgtaseme võrguga, kuna kõik efektiivväärtused jäävad lubatud piiridesse. Ühefaasilise

stsenaariumiga võrreldes on antud olukord parem, kuna PV toodab rohkem energiat, sest PV-ga on ühendatud kaks lisa faasi.

Järgnevalt on antud ülevaade kõikide faaside peale kokku pingete maksimum, miinimum ja keskmine väärtus iga katse puhul. Kõik tulemused on kantud selleks vastavalt tabeli kujule, mida esitleb allolev Tabel 3.2.

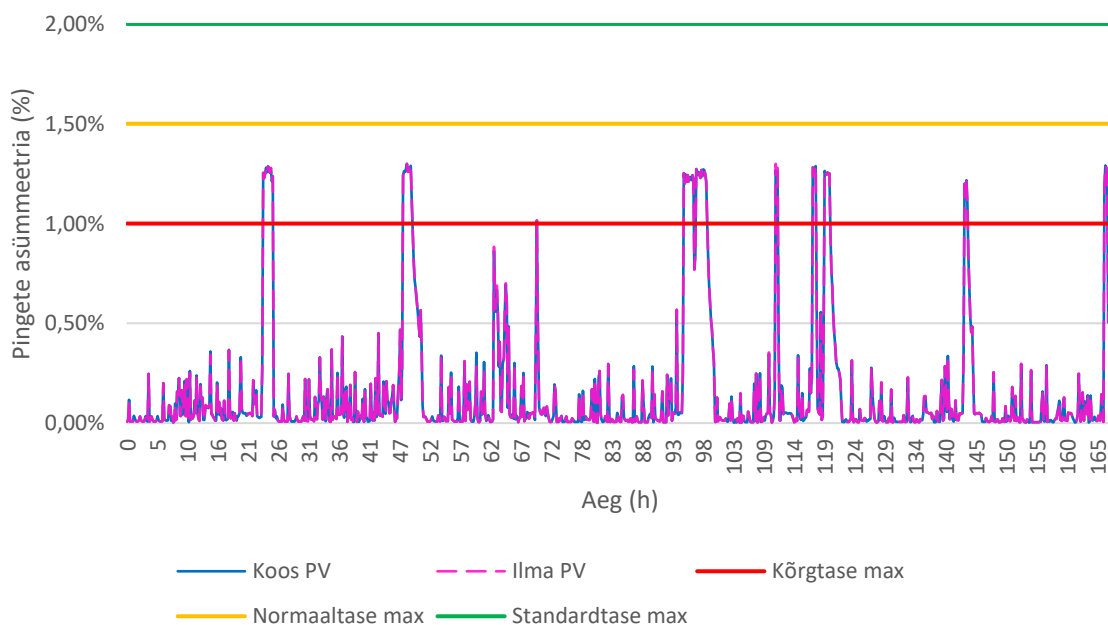
Tabel 3.2 Suhtelised pingetasemed kõikide faaside kohta ning nende maksimum, miinimum ja keskmine väärtus

	MAX (%)	MIN (%)	KESKMINE (%)
Ilma PV	0,705	-3,1467	0,105
Koos PV	2,822	-3,1468	0,428

Tabel 3.2 järgi saab järeldada, et PV korral keskmine pingetase tõusis 0,3% võrra ning miinimum pingetase ei muutunud üldse, kuna olid samas suurusjärgus. Suurim erinevus on maksimum pingetase korral, kui pingetase tõusis PV korral üle 2,1%.

### 3.2.3 Pingete asümmeetria

Esimese stsenaariumi korral, kus vaadeldi ühefaasilist võrku, ei saadud analüüsida pingete asümmeetriat. Selleks on vaja vaatluse alla võtta kõik 3 eraldi faasi, mille abil vaadelda pingete omavahelist sümmeetrilisust. Kuna pinged ei ole kunagi ideaalselt sümmeetrilised, leidub alati pingetes asümmeetrilisi hetki. Seda kirjeldab siis allolev Joonis 3.8. Selleks, et anda parem ülevaade ja analüüs pingete asümmeetrilisuse kohta, on kantud joonisele tasemed, mille piiresse peaks asümmeetriategur  $k_a$  jääma.



Joonis 3.8 Pingete asümmeetria ning nende lubatud piirid

Jooniselt selgub, et pinged on väga sümmeetrilised PV ja ilma PV ühenduse korral. Vaid osadel ajahetkedel on mõned tipud kõrgemad ilma PV tootmise korral. See võib tingitud sellest olla, et sel hetkel PV tootmine parandas sümmeetrilisust faaside vahel. Suures pildis on faasid omavahel praktiliselt võrdses suurusjärgus.

Joonisele on kantud kõik 3 taset: kõrgtase, normaaltase ja standardtase. Joonise järgi saab järeldada, et tegu on normaaltasemega, kuna pinge asümmeetriategur ei ületanud kunagi selle aja jooksul tegurit  $k_a = 1,5\%$ . Kuna ületati kõrgtaset  $k_a = 1\%$ , on näidatud allolevas tabelis (Tabel 3.3) nende ajahulka.

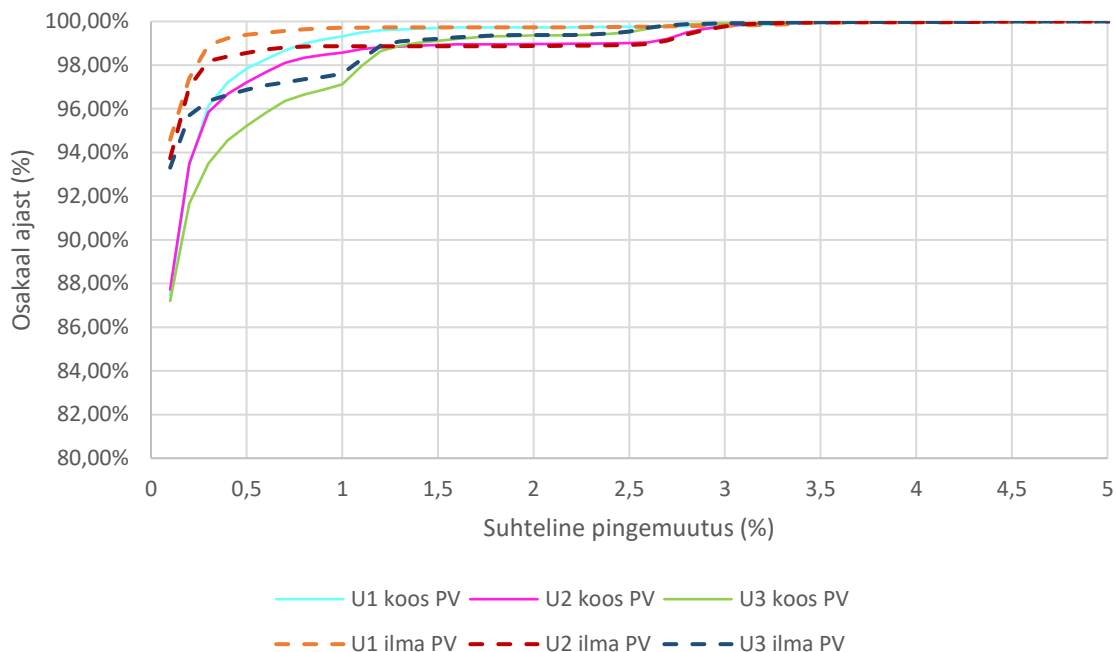
Tabel 3.3 Asümmeetriategur, mis on läinud üle lubatud piiride

Asümmeetriategur $k_a=1\%$	Ilma PV	Koos PV
Ületuskordi	71	71
Minutit üle piirväärtuse	710	710
% ajast üle piirväärtuse	7,04%	7,04%

Tabel 3.3 saab järeldada, et pinged ületasid kõrgtaset ( $k_a = 1\%$ ) 71 korral. See moodustab nädalajaast ligikaudu 7%, millal ületati kõrgtaset. 93% juhtudel püsis asümmeetriategur kõrgtaseme piirides. Kuna PV ühenduse ja ilma PV ühenduse korral olid asümmeetriategurid võrdsed, on tingitud see tõttu võrdne protsentuaalne osakaal ajast.

### 3.2.4 Kiired pingemuutused

Mõlema katse puhul (koos PV ja ilma PV) on paigutatud kõik andmed ühele samale graafikule, et anda parem ettekujutus, kuidas kõik faasid paiknevad ja sõltuvad üksteisest. Selge ettekujutise annab vastav allolev Joonis 3.9.



Joonis 3.9 Kõikide erinevate faaside kiired pingemuutused koos ja ilma PV toodanguta. Antud jooniselt saab järeldada, et võrreldes ühefaasilise ühenduse korral on mõlema katse puhul kolme faasi puhul väiksem hulk kiireid pingemuutusi kui ühefaasi ühenduse korral (Joonis 3.3). Täpsemalt öeldes on selle vaheks peaaegu ligikaudu 2%. PV ühenduse korral ja ilma PV ühenduseta on kiirete pingemuutuste vahe umbes 6%, mis on parem kui ühefaasi korral.

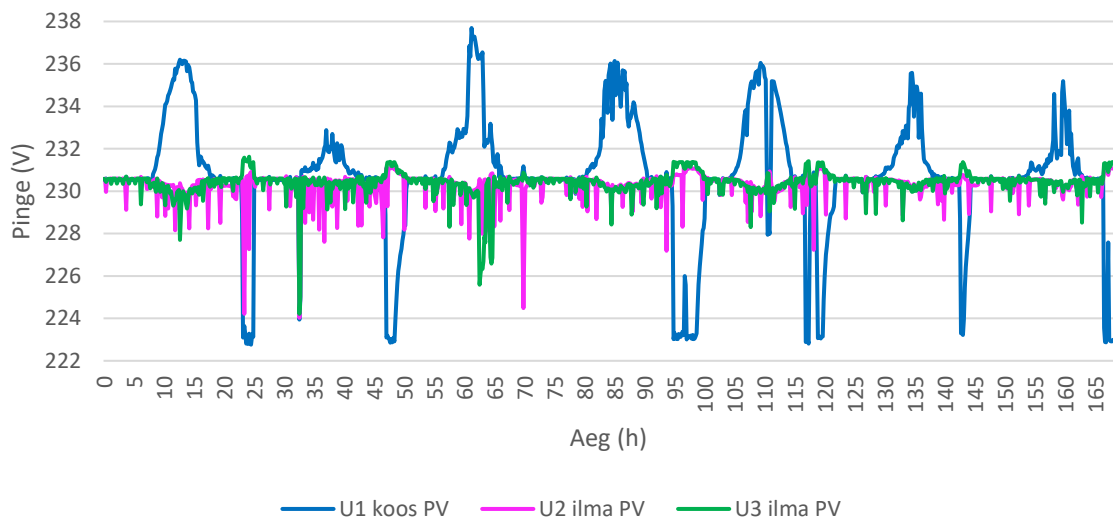
Lisaks on näha joonisel (Joonis 3.9), et mõlema stsenaariumi korral (PV toodab ning PV ei tooda) on kõigi kolme faasi kiirete pingemuutuste suurima ülekaalu ühispunkt praktiliselt samas suurusjärgus. See tähendab, et pingete faasid on mõlema näite puhul ühiselt väga sarnaselt.

Saab täheldada ka, et kiirete pingete täielik osakaal ajast on saavutatud vähem kui 5% jooksul. Nende ajahetk jäi ligikaudu 1,5% - 3% vahele, mis jääb ilusti standardi piiridesse.

### 3.3 Kolme faasiline madalpingevõrk, kus PV on ühefaasiline

#### 3.3.1 Toitepinge väärtused 7 päeva kohta

Järgnevas stsenaariumis vaadeldakse kuidas mõjutab PV toitepinge kvaliteeti, kui PV on ühendatud kõigest ühte faasi U1, aga võrk ise liitumispunktis on kolme faasiline. Seitsme päeva pingeid iseloomustab järgnev allolev Joonis 3.10.

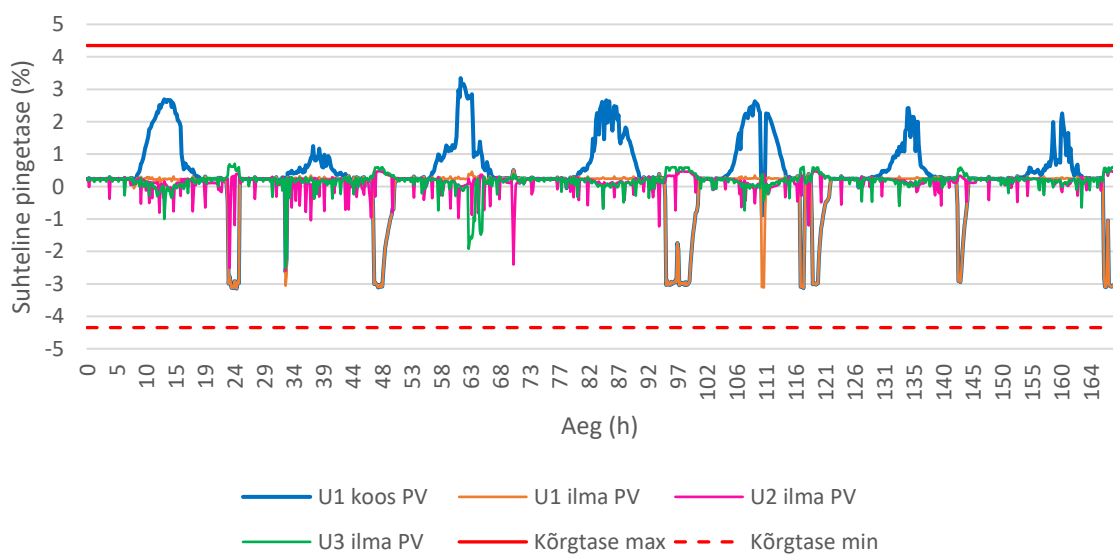


Joonis 3.10 Kolmefaasilised pinged 7 päeva kohta koos ja ilma PV toodanguta, kus PV on ühefaasiline

Saab järeldada, et pinged on sarnased varasemalt näidatud stsenaariumites (Joonis 3.1 ja Joonis 3.4). Kuna tootmis ja tarbimis võimsused on samad, siis ei saagi suuri erinevusi tekkida võrreldes varasemalt käsitletud stsenaariumitega.

### 3.3.2 Pingetase ja aeglased pingemuutused

Samamoodi nagu varasemad stsenaariumid näitasid, siis pingetasemed on samas suurusjärgus antud stsenaariumi puhul samuti. See on tingitud sama tootmis võimsuse ja tarbimis võimsuse tõttu. Vastav graafik on toodud Joonis 3.11.



Joonis 3.11 Kolmefaasilised pinged 7 päeva kohta koos PV toodanguga, kus PV on ühefaasiline

Antud näite puhul samuti sälisid kõrgtaseme piirid ning ei läinud tarvis juurde lisada normaaltasemeid ja standardtasemeid. See viitab jällegi sellele, et võrk on korras ja PV saab ilusti hakkama tootmisega, nii et ei keeraks võrku liitumispunktis paigast ära ülemäära.

Järgnevalt on antud ülevaade kõikide faaside peale kokku pingete maksimum, miinimum ja keskmine väärtus iga katse puhul. Kõik tulemused on kantud selleks vastavalt tabeli kujule, mida esitleb allolev Tabel 3.4.

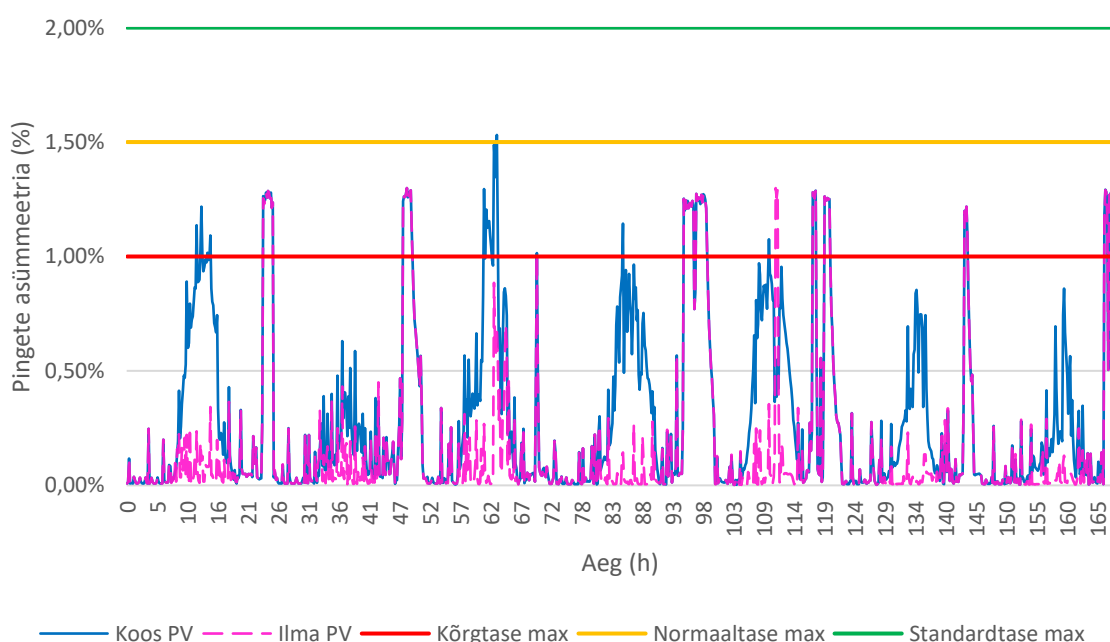
Tabel 3.4 Suhtelised pingetasemed ning nende maksimum, miinimum ja keskmine väärtus

	MAX (%)	MIN (%)	KESKMINE (%)
Ilma PV	0,705	-3,1467	0,105
Koos PV	3,344	-3,1468	0,3417

Tabel 3.4 järgi saab järeldada, et PV korral keskmine pingetase tõusis 0,23% võrra ning miinimum pingetase ei muutunud üldse, kuna olid samas suurusjärgus. Suurim erinevus on maksimum pingetase korral, kui pingetase tõusis PV korral üle 2,6%.

### 3.3.3 Pingete asümmeetria

Järgnevas peatükis vaadeldakse, milliseid erinevusi toob asümmeetriateguris PV toodang, mis on ühendatud ühte faasi ainult. Seda kirjeldab järgnev Joonis 3.12.



Joonis 3.12 Pingete asümmeetria ning nende lubatud piirid

Võib väita vastavalt Joonis 3.12 järgi, et kui PV toodab ühefaasi peal kolmeefaasilise võrgu korral, võib pinge asümmeetriategur paigast minna, kuna tootmis faas erineb väga palju võrreldes teiste kahe passiiv faasidega.

Nagu on joonisel näha, siis tootmise ajal mindi lausa ühe korra üle normaaltaseme. Selles järgi võib oletada, et sellise ühenduse korral võivad pinged veel rohkem käest minna, kui tõsta tootmisvõimsust. Allolevas Tabel 3.5 on näidatud mitu korda läksid pingete asümmeetriategurid üle lubatud piiride.

Tabel 3.5 Asümmeetriategur, mis on läinud üle lubatud piiride

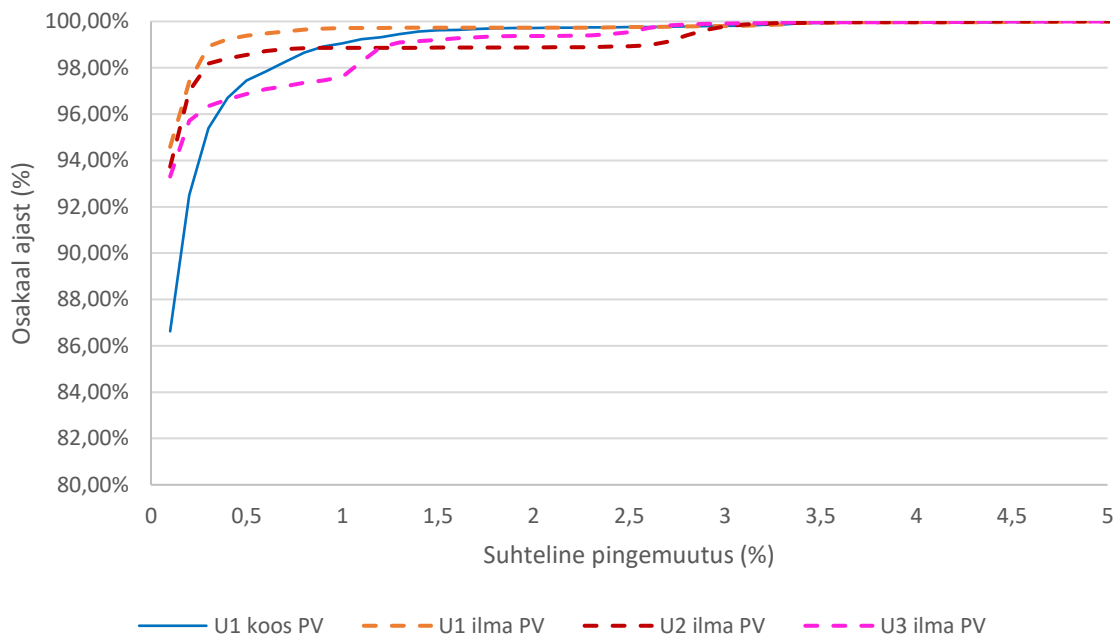
Asümmeetriateguri piirväärtus	Ilma PV		Koos PV	
	ka=1,0%	ka=1,5%	ka=1,0%	ka=1,5%
Ületuskordi	71	0	88	1
Minutit üle piirväärtuse	710	0	880	10
% ajast üle piirväärtuse	7,04%	0,00%	8,73%	0,10%

Tabeli kohaselt saab väita, et kui PV toodab, siis asümmeetriategurite osakaal, mis läheb üle kõrgtaseme piiri on suurem võrreldes ilma PV tootmise korral. Kuna ühe korra mindi üle normaaltaseme PV tootmise korral, ei ole see nii soodne lahendus võrreldes kolmeefaasi ühenduse korral, kus mitte kordagi ei mindud üle lubatud normaaltaseme.

### 3.3.4 Kiired pingemuutused

Kuna PV toodab ainult ühel faasil, siis võrreldakse praktiliselt tootmis faasi teiste kahe faasiga mis ei tooda ning on vaid passiivsed. Võrdlus kiirete pingemuutuste kohta kolme faasi järgi, on antud alljärgnevas Joonis 3.13.





Joonis 3.13 Kõikide erinevate faaside kiired pingemuutused, kus üks faas on PV-ga ühendatud

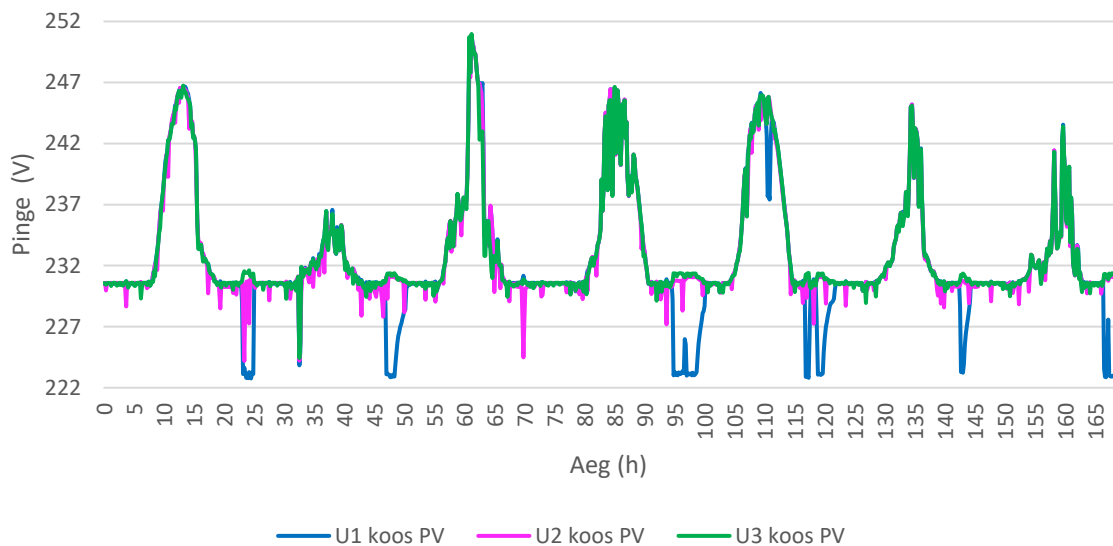
Nagu oli arvata, siis võrreldes passiivsete faaside korral oli PV tootmise ajal kiired pingemuutused 7% väiksema osakaaluga algushetkel. Kui suurim hulk kiireid pingeid oli ilma PV tootmiseta umbes 93%, siis PV tootmise ajal oli selleks 86%. Lisaks tuleb märkida, et passiivsete faaside ühispunkt, kus oli suurim osakaal kiireid pingemuutusi, oli ühine.

Joonis 3.13 saab järeldada, et 100% osakaaluga kiired pingemuutused saavutati ligikaudu 3% ulatuses, mis jääb ilusti standardi 5% piiride sisse.

## 3.4 Kolmefaasiline võrk, koos suurema võimsuse PV-ga

### 3.4.1 Toitepinge väärtused 7 päeva kohta

Viimase stsenaariumi puhul suurendatakse PV võimsust 25 kW peale, ehk samas suurusjärgus kui trafo ise. Eesmärk on vaadelda, millist mõju avaldab toitepingele palju võimsama võimsusega PV. All järgnevas joonises on näha (Joonis 3.14), kuivõrd pinged hakkavad hüppama PV tootmise ajal. Eraldi ilma PV tootmiseta stsenaariumi antud peatükis ei käsitleta, kuna olukord ei muutu ning seda kirjeldab ülal olev Joonis 3.4.

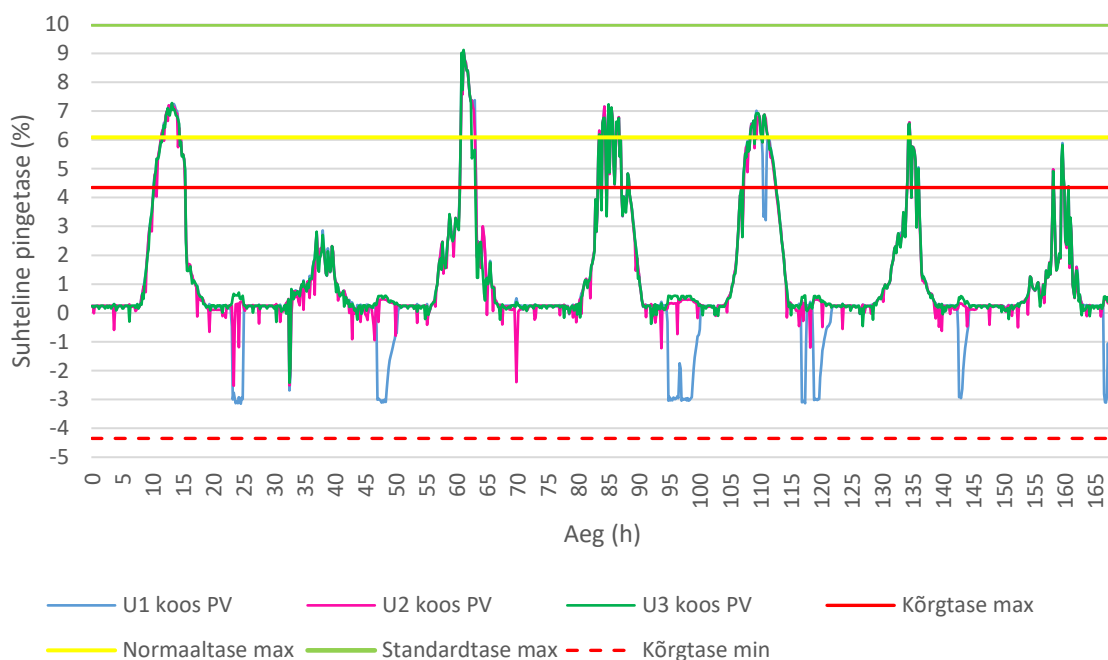


Joonis 3.14 Kolme faasilised pinged 7 päeva kohta koos ja ilma PV toodanguta, kus PV võimsus on suurendatud

Eelneva joonise järgi saab järeldada, et tarbimine öistel aegadel on pinged samas suurusjärgus kui eelnevatel stsenaariumitel. Pingetõusud olid samuti praktiliselt samasugused kõigil faasidel, vaid väga väikeste erinevustega. Mis aga on suurim erinevus on massiivsed pingetõusud, kus 10 minuti keskmine pinge ulatus lausa pea 252 V ühel ajahetkel.

### 3.4.2 Pingetase ja aeglased pingemuutused

Kuna eelnevas stsenaariumis paragrahvis 5.1 käsitleti olukorda kui pole võrku ühendatud PV, siis ei hakata eraldi välja tooma joonist, kus PV pole ühendatud MP võrku. See pole vajalik, kuna PV ilma tootmiseta, ei mõjuta kuidagi tarbimise võimsusi. Selleks on siis eraldi Joonis 3.4. Allolevas joonises (Joonis 3.15) on näidatud, kuidas pinge efektiivväärtused jäävad erinevate tasemete piiridesse.



Joonis 3.15 Kolmefaasilise pinge efektiivväärtused 7 päeva kohta koos suurendatud võimsusega PV

Esmakordselt saab väita, et antud PV võimsuse korral ei ole enam pinged kõrgtaseme piirides. Tarbimise efektiivväärtused püsivad küll kõrgtaseme miinimum piirides, aga teine lugu hakkab tootmise ajal. PV tootmise ajal on näha, et pinged vahepeal läksid isegi üle normaaltaseme maksimum piiri, mistõttu antud võrk jääks standarttaseme piiridesse. See otseselt ei ole probleem, aga hea võrrelda madalama võimsusega PV-ga, kuna 7 kW korral olid pinged kõrgtaseme piirides, ehk ideaalsetes piirides.

Lisaks on toodud tabel kujul (Tabel 3.6), mitu % ajast ning mitu korda mindi üle teatud tasemete piiride.

Tabel 3.6 Iga faasi pingete korrad, millal ületati erinevaid taseme piire

Pingetase	1. faas		2. faas		3. faas	
	Kõrg.	Norm.	Kõrg.	Norm.	Kõrg.	Norm.
Ületuskordi	115	60	114	59	116	58
Minutit vahemikust väljas	1150	600	1140	590	1160	580
% ajast vahemikust väljas	11,41%	5,95%	11,31%	5,85%	11,51%	5,75%

Saab järeldada, et kõrgtaset ületati iga faasi korral umbes 115 korda, mis moodustas ligikaudu 11% koguajast. Normaaltaset ületati umbes 59 korda ning see moodustas ligikaudu 6% ajast. Kuna antud tasemeid ei tohi kordagi ületada, siis tegu oleks antud PV võimsuse korral standarttaseme võrguga.

Järgnevalt on antud ülevaade kõikide faaside peale kokku pingete maksimum, miinimum ja keskmine väärtus iga katse puhul. Kõik tulemused on kantud selleks vastavalt tabeli kujule, mida esitleb allolev Tabel 3.7.

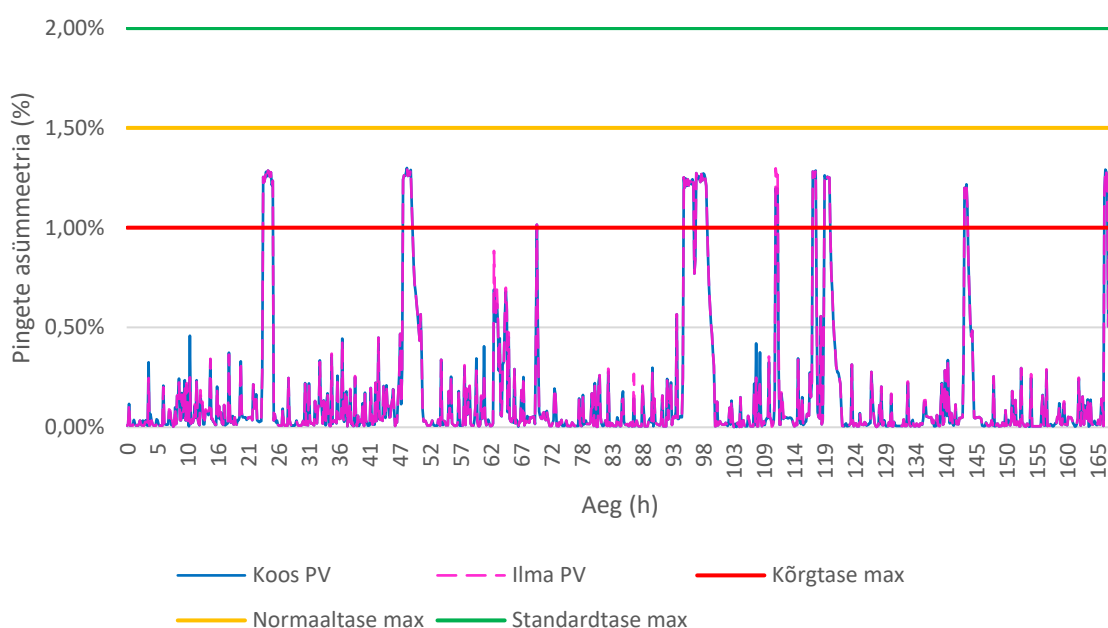
Tabel 3.7 Suhtelised pingetasemed kõikide faaside kohta ning nende maksimum, miinimum ja keskmine väärtus

	MAX (%)	MIN (%)	KESKMINE (%)
Ilma PV	0,705	-3,1467	0,105
Koos PV	9,116	-3,1477	1,24

Tabel 3.7 järgi saab järeldada, et PV korral keskmine pingetase tõusis 1,1% võrra ning miinimum pingetase ei muutunud üldse, kuna olid samas suurusjärgus. Suurim erinevus on maksimum pingetase korral, kui pingetase tõusis PV korral lausa üle 8,4%.

### 3.4.3 Pingete asümmeetria

Suurema võimsuse PV tootmise korral pingete asümmeetriad on toodud välja alljärgneval joonisel (Joonis 3.16).



Joonis 3.16 Pingete asümmeetria ning nende lubatud piirid

Saab järeldada, et olukord on täpselt sama nagu eelneval stsenaariumil (Joonis 3.8). See on tingitud sellest, et tootmine ei mõjuta kuidagi faasi pingete erinevusi üksteisest. All olevas tabelis on näidatud mitu korda pinged ületasid kõrgtaset.

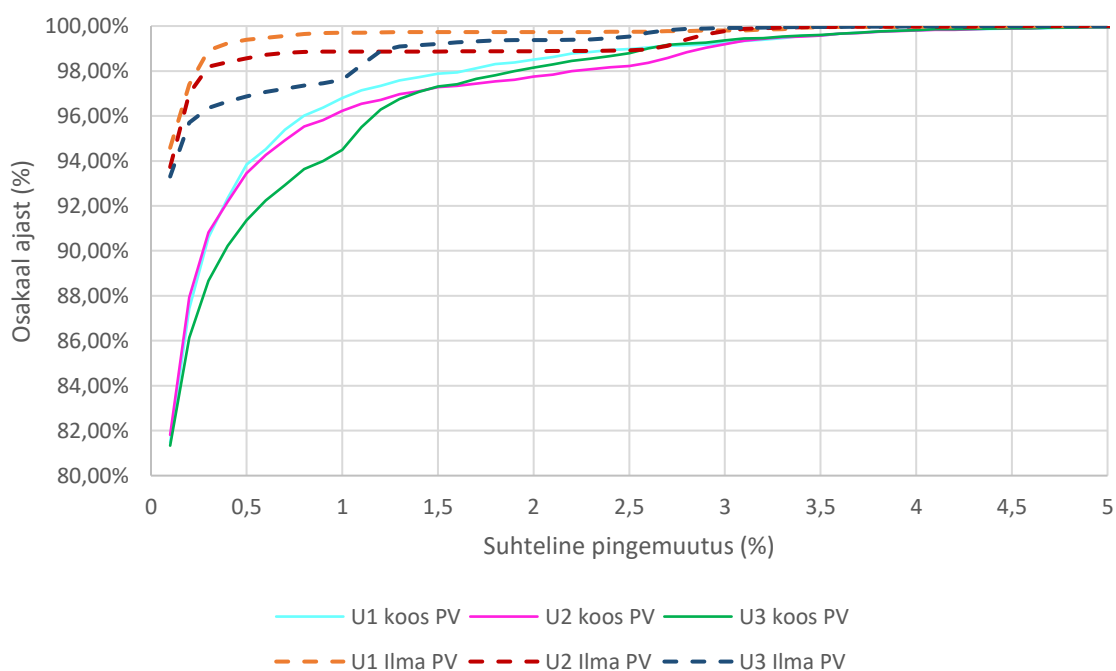
Tabel 3.8 Asümmeetriategur, mis on läinud üle lubatud piiride

Asümmeetriategur ka=1%	Ilma PV	Koos PV
Ületuskordi	71	71
Minutit üle piirväärtuse	710	710
% ajast üle piirväärtuse	7,04%	7,04%

Asümmeetriategur läks täpselt sama palju üle kõrgtaseme piiride nagu näitas seda Tabel 3.3. See kinnitab ka seda, et olukorrad on samad ning asümmeetria faaside vahel pole muutunud suurema PV võimsuse tõttu.

### 3.4.4 Kiired pingemuutused

Mõlema katse puhul (koos PV ja ilma PV) on paigutatud kõik andmed ühele samale graafikule, et anda parem ettekujutus, kuidas kõik faasid paiknevad ja sõltuvad üksteisest. Selge ettekujutise annab vastav allolev Joonis 3.17.



Joonis 3.17 Kõikide erinevate faaside kiired pingemuutused ilma PV toodanguta ja suurendatud PV võimsusega

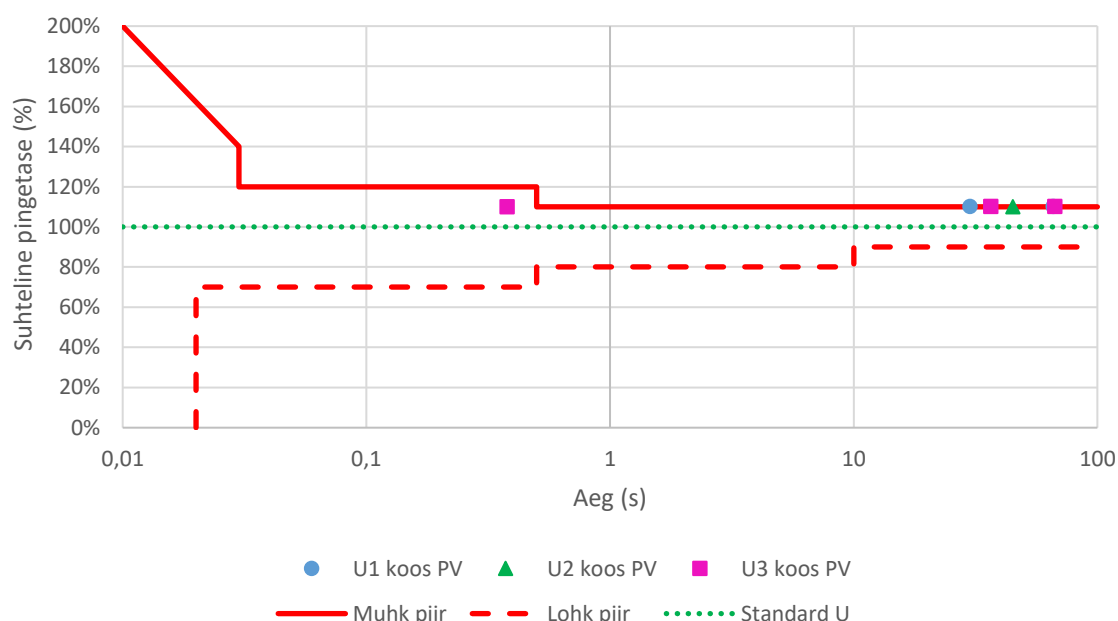
Saab järeldada, et sellise suure võimsusega PV mõjutab väga suuresti kiireid pingemuutusi. Kui ilma PV tootmiseta oli suurim osakaal kiireid pingemuutusi 93% ulatuses, siis 25 kW PV tootmise korral oli see 81% osakaalust. See on praktiliselt 12% vähem kiireid pingemuutusi.

Saab täheldada ka, et kiirete pingete täielik osakaal PV tootmise korral saavutatakse esmakordselt alles 3,5% juures. Siiski antud PV tootmise korral jäävad kiired pingemuutused ilusti standardi piiridesse.

### 3.4.5 Pingemuhud

Kuna antud PV oli niivõrd võimas, siis tekkisid kiirete pingete analüüsi ajal ka pingemuhud. Selleks jagati pingelohu väärtus nimipingega ja teisendati protsentideks. Selliselt näeb standard ette.

Pingemuhkusid oli vaid mõni üksik, tuleb siiski standardi kohaselt ikkagi üle vaadata, kas pingemuhud jäid ilusti piiridesse. Selleks on siis Joonis 3.18 mis kirjeldab seda.



Joonis 3.18 PV tootmise korral tekkinud pingemuhud ja selle piirid

Saab järeldada, et pingemuhkusid oli kolme faasi peale kokku 6 tükki. Igal muhul oli oma ajapikkus kaua see kestis. Kõigest 1 muhk oli 0,34s, teised olid 30-60s vahemikes. Antud muhud mis olid suurema ajakestvusega, jäid napilt piiridesse ning üks muhk lühikese ajakestvusega oli ilusti piiride sees. Sellest võib järeldada, et antud võimsusega PV võib tekitada ohtlike pingemuhkusid.

### 3.5 Järeldused katsetulemustest

Kõikide stsenaariumite puhul oli väga palju erinevusi, mille vahel võrrelda tulemusi. Seetõttu on koostatud lühidalt ja detailselt iga stsenaariumi kohta omad plussid ja miinused, mis on toodud välja tabeli kujul (Tabel 3.9). Autori hinnangul olid simulatsiooni tulemused reaalsed ning aktsepteeritavad.

Tabel 3.9 Erinevate stsenaariumite võrdlus, kus on välja toodud kõik plussid ja miinused

<b>Stsenaarium</b>	<b>Plussid</b>	<b>Miinused</b>
1. Ühefaasiline võrk	Toitepingetase on kõrgetaseme piirides, kiired pinge muutused on lubatud piirides, puuduvad pingemuhud	Madal PV tootlikus, puudub pingete asümmeetria vaatlus
2. Kolmefaasilise võrk	Toitepingetase on kõrgetaseme piirides, kiired pinge muutused on lubatud piirides, puuduvad pingemuhud, kõrge PV tootlikus	Pingete asümmeetria ei ole kõrgetaseme piirides
3. Kolmefaasiline võrk, kus PV on ühefaasiline	Toitepingetase on kõrgetaseme piirides, kiired pinge muutused on lubatud piirides, puuduvad pingemuhud	Madal PV tootlikus, pingete asümmeetria ei ole normaaltaseme piirides
4. Kolmefaasiline võrk, kus PV võimsus on suurendatud	Suurem PV tootlikus, pingete asümmeetria ei ole muutunud kolmefaasilise võrguga võrreldes	Toitepingetase ei ole normaaltaseme piirides, pingemuhkude tekkimine, kiirete pingemuutuste vähim osakaal võrreldes teiste stsenaariumitega

Lisaks antakse kõikide stsenaariumite puhul ülevaade kiirete ja aeglaste pingetasemete kohta, teisisõnu kuivõrd pingetasemed muutusid pärast seda kui võrgus hakkas päikeseelektrijaam tootma energiat. Kõik tulemused on kantud tabeli kujule, mida näitab allolev Tabel 3.10. Kõik väärtused on saadud sel viisil, et lahutatakse pinge maksimum ja miinimum taseme väärtused omavahel. Aeglaste pingemuutuste väärtused on saadud järgnevate tabelite abil: (Tabel 3.1, Tabel 3.2, Tabel 3.4 ja Tabel 3.7). Kiirete pingemuutuste väärtused on saadud alapeatükkide 3.1.3, 3.2.4, 3.3.4 ning 3.4.4 kaudu.

Tabel 3.10 Kõikide stsenaariumite kiirete ja aeglaste pingemuutuste võrdlus

	<b>Aeglased pingemuutused (%)</b>			<b>Kiired pingemuutused (%)</b>
	MAX	MIN	KESKMINE	MAX
Stsenaarium 1.	3,097%	0,124%	0,39%	-8,21%
Stsenaarium 2.	2,117%	0%	0,323%	-6,41%
Stsenaarium 3.	2,639%	0%	0,237%	-7,25%
Stsenaarium 4.	8,411%	0%	1,135%	-12,33%

Võib järeldada, et kõige problemaatilisem lahendus antud võrku oleks paigaldada väga võimsa võimsusega PV. Ainukene positiivne külg on, et saavutatakse suurem tootlikus, aga see eest rikutakse toitepingekvaliteeti suuresti, kuna tekitakse pingemuhkusi ja toitepingetase on palju kehvem võrreldes madalama tootlikkuse PV-ga.

Järgnevalt ei soovita autor paigaldada kolmefaasilisse võrku ühefaasilist PV-d, kuna sellise näite puhul on rikutud pingete asümmeetria, kuna tootmise ajal teised kaks faasi on passiivsed ning ei tooda samal hetkel. Sellest tekibki pingete asümmeetrisus.

Autori hinnangul kõige parem lahendus oleks kolmefaasiline võrk, kuna antud võimsuse puhul on toitepinge kvaliteet lubatud standardi piirides. Tabel 3.10 järgi on näha, et võrreldes kõikide teiste stsenaariumitega, on kolmefaasilises võrgus koos algsete parameetrite korral kõige paremad tulemused.

Soovitus tuleviku paigaldajatele, et PV panekul tuleks järgida mis võrguga tegu on. Silmas tuleks pidada, et kõige parema toitepinge kvaliteedi saavutamiseks, peaks liitumispunkt olema kolmefaasiline ning võrku peaks tagama tugeva alajaamaga trafo. Päikeseelektrijaama võimsust saab vaadelda vastavalt trafo võimsuse järgi. Autor siiski ei soovita paigaldada PV-d mis on sama võimsustasemega nagu trafo.



## KOKKUVÕTE

Antud töö eesmärgiks oli uurida, kuidas mõjutavad PV-d toitepingekvaliteeti madalpingevõrgu liitumispunktis. Töö sisuks on Simulink´is valmis koostada erinevad mudelid, mille abil oleks võimalik koostada erinevaid stsenaariumeid. Peale igat stsenaariumit koguti kõik andmed, mille alusel koostati erinevad graafikud ja joonised, et anda kõige ülevaatlikum vaatlus lugejale, millist mõju võivad PV-d reaalselt avaldada liitumispunkti toitepingele.

Töö esimeses osas antakse põgus ülevaade, mis täpsemalt on toitepingekvaliteet ning tuuakse välja erinevad standardi kohaselt olevad uuritavad teemad, mille alusel on võimalik uurida toitepinge kvaliteeti.

Enne kui hakati programmiga Simulink simuleerimisi läbi viima, anti detailne ülevaade kasutatavatest katseandmetest ning programmist kuidas üldse skeem kokku pandi. Kuna madalpingevõrgus läks vaja trafo ja madalpinge liinifiidri parameetreid, uuris autor oma töökohast Enefit Connect need parameetrid välja, mida hiljem kasutati simulatsioonis. Töö taheti teha võimalik realistlikuks, mis tõttu valiti juhendaja poolt pakutud talukompleks, kus oli registreeritud nädala pikkune tarbimisvõimsused. PEJ tootmisvõimsused nädala kohta saadi Tallinna Tehnikaülikooli poolt.

Töö põhiosa keskendus erinevate simulatsioonide läbi töötamisele. Kuna katsetati läbi neli erinevat stsenaariumit, siis tekkis väga palju väljundandmeid mida tuli eraldi ükshaaval töödelda, et saavutada vastavad graafikud. Iga graafiku kohta anti informatiivne ülevaade. Selleks lisati iga graafiku juurde ka standardi piirid, et lugejal oleks lihtsam järgida standardi EN 50160 nõudeid.

Töö viimases osas tehti tabeli kujul lühike ja detailne ülevaade kõikide läbi katsetatud stsenaariumite kohta. Toodi välja plussid ja miinused, kuidas iga kord päikeseelektrijaam mõjutas madalpinge võrgu toitepinge kvaliteeti. Autori jäi rahule stsenaariumiga, kus kasutusel on kolmefaasiline võrk koos kolmefaasilise PV tootlikkusega 7 kW.

Saavutati töö eesmärk ehk veenduti PEJ mõjust toitepinge kvaliteedi suhtes. Erinevate stsenaariumite puhul oli näha väga suuri erinevusi, mille alusel sai teha järeldusi iga katse mõjust toitepinge kvaliteedile.

# KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Daniel L. Gerber, Omkar A. Ghatpande, Moazzam Nazir, Willy G. Bernal Heredia, Wei Feng, Richard E. Brown, Energy and power quality measurement for electrical distribution in AC and DC microgrid buildings, *Applied Energy*, Volume 308, 2022.
- [2] T. Vinnal, „Toitepinge kvaliteet Eesti 0,4 kV madalpingevõrkudes ja tarbijapaigaldiste liitumispunktides“, 2013.
- [3] T. Vinnal, K. Janson, H. Kalda and T. Sakkos, "Supply voltage level optimization in industrial low voltage networks," 2012 Electric Power Quality and Supply Reliability, 2012, pp. 1-6.
- [4] T. Vinnal, L. Kutt and H. Kalda, "Analysis of power consumption and losses in relation to supply voltage levels," 2008 Power Quality and Supply Reliability Conference, 2008, pp. 23-28.
- [5] M. H. Shawon, S. Barcentewicz and J. Kowalski, "Identification of asymmetry in power system: Different case studies," 2016 Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ), 2016, pp. 37-40.
- [6] K. V. Khatsevskiy, A. I. Antonov, T. V. Gonenko and V. F. Khatsevskiy, "The voltage asymmetry in electrical networks with single-phase load," 2017 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), 2017, pp. 1-4.
- [7] M. de Apraiz, J. Barros, R. I. Diego, J. J. Gutiérrez, K. Redondo and I. Azcarate, "Detection and analysis of rapid voltage changes in power system networks," 2014 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems Proceedings (AMPS), 2014, pp. 1-6.
- [8] M. J. E. Alam, K. M. Muttaqi and D. Sutanto, "Battery Energy Storage to Mitigate Rapid Voltage/Power Fluctuations in Power Grids Due to Fast Variations of Solar/Wind Outputs," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 12191-12202, 2021.
- [9] K. Singh, P. Swathi and M. U. Reddy, "Performance analysis of PV inverter in microgrid connected with PV system employing ANN control," 2014 International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE), 2014, pp. 1-6.
- [10] B. K. Kimaiyo, C. Sirisamphanwong and S. Somkun, "Effect of Voltage Unbalance on the Power Quality of Three-Phase Grid-Connected PV Inverters," 2019 7th International Electrical Engineering Congress (iEECON), 2019, pp. 1-4.
- [11] E. Demirok, D. Sera, R. Teodorescu, P. Rodriguez and U. Borup, "Clustered PV inverters in LV networks: An overview of impacts and comparison of voltage control strategies," 2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC), 2009, pp. 1-6.

- [12] M. M. El -Sayed, A. A. Abou El-Ela and R. A. El-Sehiemy, "Effect of photovoltaic system on power quality in electrical distribution networks," 2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), 2016, pp. 1005-1012.
- [13] K. Rahimi, S. Mohajeryami and A. Majzoobi, "Effects of photovoltaic systems on power quality," 2016 North American Power Symposium (NAPS), 2016, pp. 1-6.
- [14] „Euroopa standard EN 50160, Avalike võrkude pingete tunnussuurused“, EVS, 2010. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-50160-2010>
- [15] Jako Kilter, Mati Meldorf, Heiki Tammoja ja Ülo Treufeldt; „Jaotusvõrgud“, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2007.
- [16] „Tootmismooduli seadistamise protokoll“, Elektrilevi, 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.elektrilevi.ee/vaiketootjale>