



INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**ENERGIASALVESTITE KASUTAMINE
MADALPINGEVÕRKUDES ELEKTRIKVALITEEDI
TAGAMISEKS**

**IMPROVING POWER QUALITY IN LOW VOLTAGE
NETWORKS USING ENERGY STORAGE SYSTEMS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Railo Aimse

Üliõpilaskood: 204291AAAM

Juhendaja: Tarmo Korõtko, teadur

Tallinn 2022

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

“18” mai 2022

Autor: Railo Aimse

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“18” mai 2022.

Juhendaja: Tarmo Korõtko

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”20..... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Railo Aimse (*autori nimi*)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Energiasalvestite kasutamine madalpingevõrkudes elektrikvaliteedi tagamiseks,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on Tarmo Korõtko,

(juhendaja nimi)

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.

18.05.2022 (*kuupäev*)

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loominguulise 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: Railo Aimse

Lõputöö liik: Magistritöö

Töö pealkiri: Energiasalvestite kasutamine madalpingevõrkudes elektrikvaliteedi tagamiseks

Kuupäev:
18.05.2022

82 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): Tarmo Korõtko

Sisu kirjeldus:

Käesoleva töö eesmärk oli uurida Tartu linna tänavavalgustuse võrgu näitel, kuidas on võimalik kasutada energiasalvesteid võimalike pingeprobleeme vältimiseks kommunaalelektrivõrkude riskisutuse korral ning analüüsida, kas energiasalvesti kasutamine pingeprobleemide vältimiseks on majanduslikult otstarbekas.

Lõputöö on jaotatud neljaks osaks. Esimeses osas anti ülevaade erinevatest Eesti tänavavalgustuse madalpingevõrkudest ning kirjeldati, millised need võrgud oma olemuselt on. Tänavavalgustusvõrkude kirjeldus põhineb erinevate valgustusvõrkude elektriprojektide analüüsil. Töö teises osas toodi välja, milliste parameetritega iseloomustatakse pinget kvaliteeti ning millised on enamlevinud pingeprobleemid, mis tänavavalgustuse võrkudes võivad esineda. Lisaks kirjeldati iga pingeprobleemi olemust ning nende tekkepõhjuseid. Kolmandas peatükis koostati näidisobjekti analüüs, et uurida, kas energiasalvesti abil on võimalik eri liiki pingeprobleeme vältida või leevendada. Objekti analüüs põhineb näidisobjekti mudeli koostamisel Simulink tarkvaras ning nelja erineva kasutusjuhu simuleerimisel. Analüüsi tulemusena leiti, kuidas on võimalik pingeprobleeme simuleerida ning millistel juhtudel on energiasalvestiga võimalik pingeprobleeme vältida. Töö viimases peatükis uuriti, kas energiasalvesti kasutamine pingeprobleemide vältimiseks on majanduslikult mõistlik ning pakuti välja meetodika majandusliku otstarbekuse hindamiseks energiasalvesti kasutamisel elektrikvaliteedi parandamiseks.

Töö valmistamisel on põhiliselt tuginetud uuritava valdkonna teadusartiklitele ning õppematerjalidele.

Märksõnad: Pingekvaliteet, aku, Simulink, pingelohk, pingemuhk, väreelus, katkestus, energiasalvestussüsteem, tasuvusaeg, magistritöö

ABSTRACT

<i>Author:</i> Railo Aimse	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Improving Power Quality in Low Voltage Networks using Energy Storage Systems	
<i>Date:</i> 18.05.2022	82 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Tarmo Korõtko	
<i>Abstract:</i> <p>The aim of this thesis was to study, based on the example of Tartu street lighting network, how is it possible to use energy storage systems to avoid possible power quality problems in case of cross use of public lighting networks and to analyze whether it is economically feasible to use energy storage systems to avoid power quality problems.</p> <p>The thesis is divided into four parts. The first part of the thesis provides an overview of different street lighting networks in Estonia. The description of street lighting networks is based on the analysis of the electrical projects of different lighting networks. In the second part of the work, it is pointed out which parameters characterize the quality of voltage and what are the most common power quality problems that may occur in street lighting networks. In addition, each power quality issue and its cause were described. In the third chapter, an object analysis was performed to investigate whether different types of power quality issues can be avoided or mitigated by using energy storage systems. The object analysis is based on modelling a sample object in Simulink software and simulating four different use cases. As a result of the analysis, it was found how it is possible to avoid power quality problems by using energy storage systems. The last chapter of the work examined whether the use of an energy storage system to avoid power quality problems is economically reasonable and proposed a methodology for assessing the economic feasibility of using an energy storage system to improve the power quality.</p> <p>The work is mainly based on research articles and study materials in the field of study.</p>	
<i>Keywords:</i> Power quality, battery, Simulink, voltage sag, voltage swell, flicker, interruption, energy storage system, payback period, Master's thesis	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Energiasalvestite kasutamine madalpingevõrkudes elektrikvaliteedi tagamiseks**

Lõputöö teema inglise keeles: **Improving Power Quality in Low Voltage Networks using Energy Storage Systems**

Üliõpilane: **Railo Aimse, 204291AAM**

Eriala: **Energiamuundus- ja juhtimissüsteemid**

Lõputöö liik: **magistritöö**

Lõputöö juhendaja: **Tarmo Korõtko, PhD**

Lõputöö kaasjuhendaja:
(ettevõtte, amet ja kontakt)

Lõputöö ülesande
kehtivusaeg: **2021/2022 Kevad**

Lõputöö esitamise tähtaeg: **18.05.2022**

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Taastuvatest energiaallikatest toodetud elektri osakaal tarbitavas energias on kasvutrendis. Jätkusuutlikud tuleviku linnad peavad sisaldama suures mahus elektri hajatootmist, mis suurendab vajadust elektriliitumiste järele jaotusvõrgu tasandil. Üks viis elektriliitumiste tagamiseks on teha seda läbi kommunaalelektrivõrkude nagu näiteks tänavavalgustuse elektrijaotusvõrk. Lisaks on võimalik kommunaalvõrkude kaudu pakkuda püsitoite võimalust avalikele teenustele nagu näiteks elektersõidukite laadimispunktid. Kommunaalelektrivõrkude riskasutamise abil on võimalik suurendada olemasoleva taristu kasutamist ning vähendada investeeringuid mis on vajalikud uute võrgu liitumispunktide ning püsitoite väljavõtte punktide loomiseks.

Energiasalvestite kasutamine taastuvate energiaallikate kõikuva toodangu kompenseerimiseks on muutumas aktuaalsemaks ning olulisemaks. Energiasalvestite kasutamisele seab piire nende suhteliselt kõrge maksumus ning pikk tasuvusaeg. Üks viis energiasalvestite väärtuse tõstmiseks ning nende laiema leviku toetamiseks on nende kasutamine nõuetekohase elektrikvaliteedi tagamiseks elektrivõrgus.

Lõputöö käigus uuritakse Tartu linna tänavavalgustuse võrgu näitel, kuidas on võimalik kasutada energiasalvesteid võimalike pingeprobleeme vältimiseks kommunaalelektrivõrkude riskkasutuse korral.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärk on hinnata akuenergiasalvestite kasutamist võimalike pingeprobleemide vältimiseks tänavavalgustusvõrkudes nende riskkasutuse korral ning selle majanduslikku mõju tänavavalgustusvõrgu omanikule.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

1. Eesti kohalike omavalitsuste tänavavalgustusvõrkude klassifitseerimine ning nende olulisemad karakteristikud.
2. Millised pingeprobleemid esinevad madalpingevõrkudes ning mis on nende esinemise põhjused?
3. Milliste tänavavalgustuse madalpingevõrkude kasutusjuhtude puhul on üle- ja alapingeprobleemide või pingekatkestuste tekkimine kõige tõenäolisem?
4. Millisel määral on võimalik vältida või leevendada madalpingevõrkudes esinevaid pingeprobleeme kasutades akuenergiasalvesteid?
5. Milline on akuenergiasalvestite abil pingeprobleemide lahendamise majanduslik mõju tänavavalgustusvõrgu omanikule?

4. Lähteandmed

Lähteandmetena kasutatakse järgnevaid andmeid:

- Tänavavalgustusvõrkude elektriprojektid valitud Eesti kohalike omavalitsuste kohta.
- Eelnevalt läbi viidud uuringute aruanded pingeprobleemide kohta madalpingevõrkudes.
- Näidisobjekti madalpingevõrgu elektriprojekt.

5. Uurimismeetodid

Uurimistöö põhineb elektriprojektide ning kirjanduse analüüsil, näidisobjekti elektriprojektide analüüsil, objekti mudeli koostamisel ja selle abil erinevate juhtumite

simuleerimisel ning simulatsiooni tulemuste analüüsil. Lisaks viiakse läbi majanduslik analüüs.

6. Graafiline osa

Graafiline osa on töö põhiosas ning ka lisades. Graafilise osana võib käsitleda erinevaid selgitavaid jooniseid, skeeme, asendiplaane või diagramme.

7. Töö struktuur

- Eessõna
- Sissejuhatus
- Tänavavalgustuse madalpingevõrgud Eestis
 - Tänavavalgustusvõrkude klassifikatsioon
- Pingeprobleemid madalpingevõrkudes
 - Pingeprobleemide tekkepõhjused
- Objekti analüüs
 - Olemasoleva kommunaalelektrivõrgu tutvustus
 - Kasutusjuhtude kirjeldus
 - Modelleerimistarkvara kirjeldus
 - Näidisobjekti mudeli koostamine RSCAD tarkvara abil
 - Kasutusjuhtude simulatsioon RSCAD tarkvaras pingeprobleemide tuvastamiseks
 - Simulatsiooni tulemuste analüüs
- Majandusliku mõju analüüs
 - Akuenergiasalvestite tüübid ning majanduslik teave
 - Pingeprobleemide majanduslik mõju võrgu erinevatele huvigruppidele
 - Majandusliku otstarbekuse hinnang akuenergiasalvesti kasutamise kohta pingeprobleemide vältimiseks madalpingevõrkudes
- Kokkuvõte
- Kasutatud kirjanduse loetelu
- Lisad

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Allikatena plaanitakse töös peamiselt kasutada

- Uuritava valdkonna teadusartikleid, lõputöid, raamatuid ning loengukonspekte.
- RSCAD tarkvara juhendid ning õppematerjalid.
- Tehnoloogiliste seadmete juhendid ning andmelehed.

9. Lõputöö konsultandid

10. Töö etapid ja ajakava

- Teoreetiliste andmete kogumine ja kirjanduse läbitöötamine (27.12.2021)
- Teoreetiline osa valmis (24.01.2022)
- Süsteemi mudeli koostamine (13.02.2022)
- Stsenaariumite simuleerimise lõpetamine (01.03.2022)
- Finantsarvutuste teostamine (20.03.2022)
- Töö mustand valmimine (11.04.2022)
- Juhendajalt esimese tagasiside põhjal paranduste sisseviimine (22.04.2022)
- Juhendaja viimase tagasiside põhjal paranduste sisseviimine (06.05.2022)
- Lõpliku töö esitamine (18.05.2022)

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel.

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	11
SISSEJUHATUS	12
1. TÄNAVAVALGUSTUSE MADALPINGEVÕRGUD EESTIS.....	14
1.1 Tänavavalgustusvõrkude klassifikatsioon	14
2. PINGEPROBLEEMID MADALPINGEVÕRKUDES	18
2.1 Pingelohud	19
2.2 Pingemuhud	21
2.3 Värelus.....	23
2.4 Toitepinge katkestus	24
3. OBJEKTI ANALÜÜS.....	26
3.1 Olemasoleva kommunaalelektrivõrgu tutvustus	26
3.2 Näidisobjekti modelleerimine.....	28
3.2.1 Mudeli komponendid	29
3.3 Kasutusjuhtude kirjeldus	32
3.3.1 Pingemuhk	32
3.3.2 Värelus	35
3.3.3 Pingelohk	38
3.3.4 Toitepinge katkestus.....	41
3.4 Simulatsioonid pingeprobleemide lahendamiseks	43
3.4.1 Pingemuhk	46
3.4.2 Väreluse simulatsioon	48
3.4.3 Pingelohu simulatsioon.....	51
3.4.4 Toitekatkestuse simulatsioon	53
3.5 Järeldused simulatsioonide tulemustest	55
4. MAJANDUSLIKU MÕJU ANALÜÜS.....	57
4.1 Energiasalvestussüsteemid ning majanduslik teave	57
4.2 Pingeprobleemide majanduslik mõju	60
4.3 Majandusliku otstarbekuse hinnang.....	65
KOKKUVÕTE	70
SUMMARY.....	72
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	74
LISAD	80

EESSÕNA

Käesoleva uurimistöö tulemusi rakendatakse Tallinna Tehnikaülikooli Targa Linna Tippkeskuse poolt ellu viidavas pilootprojektis „Energiavajaduse vähendamine mikrovõrkude ning energiasalvestite abil“ mida rahastavad Euroopa Regionaalarengu Fond ja Eesti Haridus- ja Teadusministeerium. Lõputöö eesmärk on uurida võimalusi, kuidas energiasalvestite abil vältida kommunaalvõrkude ristkasutuse korral tekkivaid pingekvaliteedi probleeme. Teema aitasid valida Tallinna Tehnikaülikooli professor Argo Rosin ning pilootprojekti juht Tarmo Korõtko.

Uurimistöö põhines tänavavalgustusvõrkude elektriprojektide ning kirjanduse analüüsil, objekti mudeli koostamisel Simulink tarkvaraga, erinevate stsenaariumite simuleerimisel ja simulatsioonide tulemuste analüüsil. Töö jaoks kasutati uuritava valdkonna teadusartikleid, lõputöid ning erinevate seadmete andmelehti.

Autor tänab töö juhendajat, Tarmo Korõtkot, heade nõuannete ja koostöö eest ning Indrek Roastot nõustamise eest muundurite teemal.

SISSEJUHATUS

Taastuvatest energiaallikatest toodetud elektri osakaal tarbitavas energias on kasvutrendis. Jätkusuutlikud tuleviku linnad peavad sisaldama suures mahus elektri hajatootmist, mis suurendab vajadust elektriliitumiste järele jaotusvõrgu tasandil. Üks viis elektriliitumiste tagamiseks on teha seda läbi kommunaalelektrivõrkude nagu näiteks tänavavalgustuse elektrijaotusvõrk. Lisaks on võimalik kommunaalvõrkude kaudu pakkuda püsitoite võimalust erinevatele avalikele teenustele nagu näiteks elektrisõidukite laadimispunktid. Kommunaalelektrivõrkude riskasutamise abil on võimalik suurendada olemasoleva taristu kasutamist ning vähendada investeeringuid, mis on vajalikud uute võrgu liitumispunktide ning püsitoite väljavõtte punktide loomiseks. [1]

Energiasalvestite kasutamine taastuvate energiaallikate kõikuva toodangu kompenseerimiseks on muutumas aktuaalsemaks ning olulisemaks. Energiasalvestite abil on võimalik minimeerida elektrikulusid, näiteks vähendades tarbimise tipukoormust, et vältida kõrge elektrihinnaga tunde. Energiasalvestite kasutamisele seab piire nende suhteliselt kõrge maksumus ning pikk tasuvusaeg. Üks viis energiasalvestite väärtuse tõstmiseks ning nende laiema leviku toetamiseks on nende kasutamine nõuetekohase elektrikvaliteedi tagamiseks elektrivõrgus. [1]

Kommunaalvõrgu riskasutuse korral võib võrgus sagenema hakata erinevate pingekvaliteedi probleemide esinemine. Kui toitepinge kvaliteet ei vasta nõuetele, võivad võrgus tekkida erinevad talitlushäired. Need põhjustavad näiteks võrguga ühendatud seadmete väljalülitumist või kahjustumist, täiendavaid kadusid võrgus, valgustite valgusvoo värelemist või toitepinge täielikku katkemist. Energiasalvesti võib võrgule ettenägematute olukordade ajal tuge pakkuda ning leevendada katkestuste mõju. [2]

Käesoleva töö eesmärk on uurida Tartu linna tänavavalgustuse võrgu näitel, kuidas on võimalik kasutada energiasalvesteid võimalike pingeprobleeme vältimiseks kommunaalelektrivõrkude riskasutuse korral ning analüüsida, kas energiasalvesti kasutamine pingeprobleemide vältimiseks on majanduslikult otstarbekas.

Lõputöö on jaotatud neljaks peatükiks. Esimeses peatükis antakse ülevaade Eesti tänavavalgustuse madalpingevõrkudest. Teises peatükis tutvustatakse enamlevinuid pingeprobleeme ja nende tekkepõhjuseid. Kolmandas peatükis koostatakse Tartu linna tänavavalgustuse võrgu baasil mudel ja uuritakse, kuidas on võimalik energiasalvesteid

kasutades võrgus esinevaid pingeprobleeme leevendada või vältida. Neljandas peatükis tutvustatakse energiasalvesti majanduslikku mõju ning luuakse metoodika majandusliku otstarbekuse hindamiseks energiasalvesti kasutamisel pingeprobleemide vältimisel.

Lisades on toodud näidisobjekti modelleerimisel kasutatud maakaablite ja õhuliinide andmelehed.

1. TÄNAVALGUSTUSE MADALPINGEVÕRGUD EESTIS

Tänavavalgustuse madalpingevõrgud sarnanevad jaotusvõrgu madalpingevõrkudele. Reeglina on mõlemal üks toitepunkt: jaotusvõrgu puhul on selleks alajaam, tänavavalgustuse korral on selleks liitumispunkt jaotusvõrgu madalpingevõrguga. Enamikel juhtudel on mõlema võrgu konfiguratsiooniks radiaalvõrk. Tänavavalgustuse võrgus võib liini suvalistes punktides asuvaid valgusteid võrrelda madalpinge jaotusvõrgus olevate tarbijatega.

Kehtivas seadusandluses tänavavalgustuse madalpingevõrkusid eraldi ei käsitleta. Neid võib määratleda teise või kolmandasse liiki kuuluvateks elektripaigaldisteks. Määruse „Auditi kohustusega elektripaigaldised ning nõuded elektripaigaldise auditile ja auditi tulemuste esitamisele“ järgi kuuluvad teise liiki muuhulgas madalpingepaigaldised, mille peakaitsme nimivool ületab 35 amprit ja mis ei ole esimese liigi elektripaigaldis ning kolmandasse liiki elektripaigaldised, mille peakaitsme nimivool on 35 amprit või vähem ja mis ei ole esimese ega teise liigi elektripaigaldis [3].

Uue tänavavalgustuse võrgu ehitamise valmimise või vana ümberehitamise korral tuleb teha kasutuselevõtule eelnev audit. Kasutuselevõtule eelnevat auditit ei pea tegema kasutuses olevas nõuetekohases madalpingepaigaldises, mille toiteliini ees oleva kaitseaparatuuri nimivool on kuni 35 amprit. Auditi teostamise käigus hinnatakse, kas elektripaigaldis vastab nõuetele ja on kasutamiseks ohutu. Enne auditi teostamist ei tohi elektripaigaldist kasutusele võtta. [4]

1.1 Tänavavalgustusvõrkude klassifikatsioon

Erinevalt kesk- ja madalpingevõrkudest, ei ole tänavavalgustusvõrkusid varasemalt liigitatud. Et selgitada välja, millised on karakteristikud, mille alusel tänavavalgustusvõrke iseloomustada, töötati läbi erinevad tänavavalgustuse projektid ning leiti nende võrkude ühised võtme parameetrid. Võrreldi üheteistkümne erineva asustusüksuse üheksateistkümmet tänavavalgustusvõrku, mida on iseloomustatud tabelis 1.1. Tabelis on kirjeldatud lisaks tänavavalgustusvõrgule ka selle asukohta nii haldusüksuse kui ka elanike arvu järgi. Erinevaid tänavavalgustusvõrkusid võrreldi võrgu liitumispunkti peakaitsme suuruse, lülitusjuhtimisseadmete (LJS) arvu, toiteliinide liigi, tüübi ja mahu järgi, lülitusjuhtimisseadme fiidrite ja reservfiidrite järgi

ning valgustite ja kilbi installeeritud võimsuse järgi. Tabelis 1.1 iseloomustatakse ühes veerus tervet tänavavalgustuse võrgupiirkonda, mida toidetakse ühest toitepunktist. Kui ühes asustusüksuses oli mitme toitepunktiga võrgupiirkondi, jaotati need piirkonnad tabelis osadeks.

Tabel 1.1 Erinevate tänavavalgustusvõrkude iseloomustus

Asukoht	Haldusüksus	Elanike arv	Osa nr	LPK suurus	LJS arv	Toiteliinide liik	Fiidrite arv	Reservfiidrite arv	Liini tüüp	Installeeritud Võimsus, kW
Narva-Jõesuu	Alevik	2600	1	3xC32	1	KL	2	0	4G25	0,23
			2	3xC32	1	KL	2	0	4G25; 4G35	0,48
			3	Teadmata	1	SV	1	0	4G35; 3x35+35	1,25
Karjaküla	Alevik	300	1	Teadmata	1	ÕL	1	0	Teadmata	1,41
Alavere	Küla	360	1	3xC20	1	ÕL	1	0	3x25+35	2,70
Sillamäe	Linn	13200	1	3xC40	1	ÕL	1	2	3x16+25	0,07
			2	3xC40	1	KL	3	2	4G25	1,52
			3	3xC50	1	KL	5	2	4G25	3,08
			4	3xC100	1	KL	3	2	4G25	2,75
			5	Teadmata	1	SV	1	6	4G25; 3x25+35	0,99
Kasemetsa	Küla	400	1	Teadmata	1	ÕL	2	0	3x25+35	0,71
Lõpe	Küla	130	1	3xC100	1	SV	1	0	4G16; 3x16+25	1,54
Irtta	Küla	40	1	3xC32	1	SV	1	0	4G16; 3x16+25	1,03
Orissaare	Alevik	800	1	3xC40	1	KL	2	0	4G35; 4G16	3,55
			2	3xC16	1	KL	1	1	ARLC4G25	0,29
			3	3xC20	1	KL	2	1	ARLC4G35; Cu4x10	1,29
Anija	Küla	100	1	3xC20	1	SV	2	0	4G25; 3x25+35	1,99
Voose	Küla	60	1	3xC100	1	SV	1	0	4G25; 3x25+35	1,23
Lilli	Küla	90	1	3xC20	1	SV	1	0	4G25; 3x25+35	0,8

KL – kaabelliin; ÕL – õhuliin; SV – segavõrk

Kõikide tänavavalgustusvõrkude puhul on kasutatud radiaalvõrgu konfiguratsiooni. Radiaalvõrgud on avatud võrgud, kus puuduvad suletud kontuurid. Selliste võrkude korral on üks võrgu sõlm ühendatud ühe toitepunktiga ning toitepunktist tarbijateni on vaid üks tee energia ülekandmiseks, seega tagab radiaalvõrk vaid ühepoolse toite.

Sellised võrgud on madala töökindlusega, sest toite katkemise korral puudub võrgu reservtoite võimalus. [5]

Lisaks avatud radiaalvõrgule kasutatakse madalpingevõrkudes ka suletud radiaalvõrgu konfiguratsiooni. Sellist ühendusskeemi kasutatakse põhiliselt töökindluse tõstmiseks, need on rajatud kahepoolse toitega, kuid neid käsitletakse radiaalfiidritena, sest tüviliinid on omavahel lahuspunktides eraldatud. Selliselt ehitatud skeem võimaldab igat tarbijat toita kahte erinevat teed pidi. [5]

Olulisena on veel võimalik välja tuua, et pea igas analüüsitud tänavavalgustusvõrgus kasutati selliseid toiteliine, mille faasijuhi ristlõikepindala on 25mm². Tabelis 1.1 on ühte veergu kantud ka igas tänavavalgustusvõrgus kasutatud liini tüüp. Juhul kui ei ole märgitud teisiti, on 4Gxx märgistusega liini puhul tegemist AXPK kaabelliiniga ning kui veerus on kirjeldatud kolme faasisoonega liini, näiteks 3x25+35, on tegu AMKA rippkeerdkaabliga.

Tabelis 1.2 on välja toodud erinevate asukohtade tänavavalgustusvõrkude fiidrikaitsme tüüp, toiteliinide maht ja valgustite arv iga fiidri kaupa. Selle info põhjal on võimalik hinnata kui suurt koormust ning millisesse asukohta, saab fiidrile lisada, ilma et tekiksid probleemid kaitserakenduse tagamise või pingega.

Tabel 1.2 Tänavavalgustusvõrkude maht ja valgustite arv fiidrite kaupa

Asukoht	Osa nr	Fiider	Fiidrikaitsme tüüp	Toiteliinide maht fiidril, m	Valgustite arv fiidril, tk
Narva-Jõesuu	1	1	3(1xB16)	396	10
		2		504	14
	2	1	3(1xB16)	640	17
		2	3(1xB10)	1280	32
3	1	3(1xB10)	1334	43	
Karjaküla	1	1	Teadmata	Teadmata	52
Alavere	1	1	3(1xB16)	1263	36
Sillamäe	1	1	3(1xB16)	500	21
	2	1	3(1xB16)	171	5
		2	3(1xB16)	301	7
		3	3(1xB16)	701	20
	3	1	3(1xB16)	360	14
		2	3(1xB16)	875	13
		3	3(1xB16)	290	7
		4	3(1xB16)	545	21
		5	3(1xB16)	1200	24
	4	1	3(1xB16)	908	23

Tabeli 1.2 järg

Asukoht	Osa nr	Fiider	Fiidrikaitsme tüüp	Toiteliinide maht fiidril, m	Valgustite arv fiidril, tk
Sillamäe	4	2	3(1xB16)	747	8
		3	3(1xB16)	927	30
	5	1	3(1xB16)	441	19
Kasemetsa	1	1	3(1xC6)	707	14
		2	3(1xC6)	1067	20
Lõpe	1	1	3(1xB10)	1903	48
Irta	1	1	3(1xB10)	1076	23
Orissaare	1	1	3(1xB25)	1482	41
		2	3(1xB25)	1199	39
	2	1	3(1xB25)	438	10
		3	1	3(1xB25)	309
Anija	1	1	3(1xB16)	930	24
		2	3(1xB10)	597	7
Voose	1	1	3(1xB10)	1251	27
Lilli	1	1	3(1xB10)	439	13

Peaaegu kõikides analüüsitud tänavavalgustusvõrkudes on fiidrikaitsmena kasutusel B-tunnusjoonega kaitselüliti. Ainult Kasemetsa külas asuvas tänavavalgustusvõrgus on fiidrikaitsmega kasutatud C-tunnusjoonega kaitselüliti. Nende kaitselülite erinevus seisneb elektromagnetvabasti rakendusvoolu suuruses. B-tunnusjoonega kaitselüliti peab rakenduma 3...5-kordse nimivoolu juures, C-tunnusjoonega kaitselüliti peab rakenduma 5...10 kordse nimivoolu juures [6].

Kokkuvõtvalt on võimalik tuvastada, et tänavavalgustusvõrgud on olemuselt nagu madalpinge jaotusvõrgud. Kõik analüüsitud tänavavalgustusvõrgud on olenemata haldusüksusest ning selle elanike arvust radiaalvõrgu konfiguratsiooniga, seega ei ole nende töökindluse tagamine prioriteetne. Läbi töötatud tänavavalgustusvõrkude põhjal võib järeldada, et selliseid võrke saab klassifitseerida konfiguratsiooni, toiteliinide liigi ja mahu ning valgustite arvu järgi.

2. PINGEPROBLEEMID MADALPINGEVÕRKUDES

Kuna tänavavalgustusvõrgud sarnanevad oma olemuselt madalpinge jaotusvõrkudele, võivad seal tekkida sarnased pingekvaliteedi probleemid. Pingeprobleeme on mitmeid erinevaid liike. Üldisemalt võib pingeprobleeme kirjeldada olukorrana, mil tarbija on rahulolematu pinge kvaliteediga ning märkab selle häirivaid mõjusid näiteks seadmete talitlusele. Kehtivas seadusandluses ei ole kirjeldatud minimaalseid parameetreid, millele toitepinge peab vastama. Madalpingevõrkude puhul lähtutakse pingekvaliteedi tagamisel standardis EVS-EN:50160 toodud toitepinge tunnussuurustest.

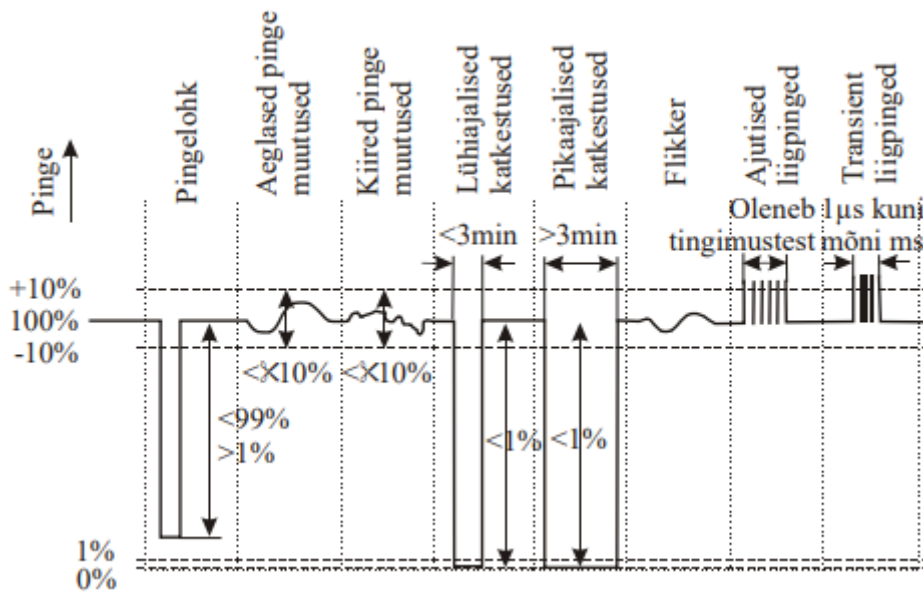
Standardi EVS-EN:50160 järgi on avalike madalpingevõrkude standardnimipinge faasi ja neutraali vahel 230 V ning toitepinge nimisagedus peab olema 50 Hz. Normaaltalitlusel ei tohi standardi järgi toitepinge aeglasel muutusel ületada $\pm 10\%$ nimipingest ning igas nädalases ajavahemikus peab toitepinge 10-minutilistest keskmistest efektiivväärtustest 95 % olema vahemikus $\pm 10\%$ nimipingest. [7]

Lisaks standardis mainitud parameetritele, peavad ideaalse toitepinge korral puuduma pinge lühiajalised võrgusageduslikud hälbed ja etteteatamata katkestused, pingekõver peab olema siinuse kujuline ning pinge harmoonilised moonutused olema tühised. [8]

Pinge kvaliteeti iseloomustatakse järgnevate parameetritega: [8]

- toitepinge sagedus
- toitepinge suurus
- toitepinge võrgusageduslikud hälbed nimipingest (pingelohud ja -muhud)
- toitepinge katkestused
- toitepinge värelus
- siirdeliigpinged
- toitepinge harmoonilised moonutused

Joonisel 2.1 on lihtsustatud selgitus olulisematest pingekvaliteedi parameetritest.



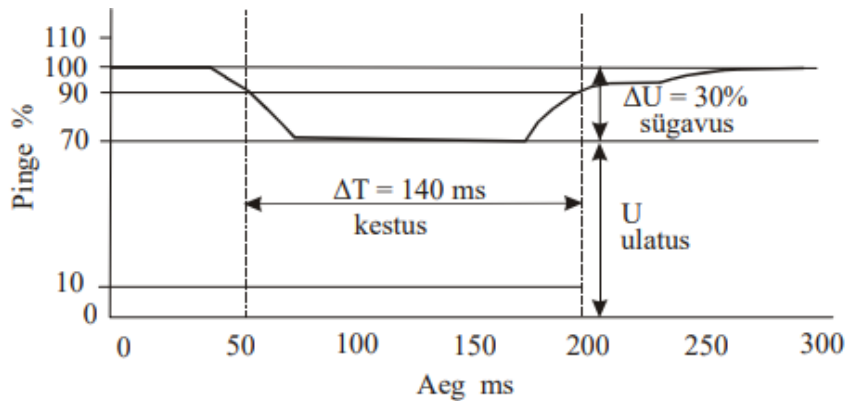
Joonis 2.1 Pinge kvaliteedi parameetrite lihtsustatud ülevaade [8]

Tarbija jaoks kõige häirivamad pingeprobleemid on pingelohud, pingemuhud, lühiajalised katkestused ja värelus. Tarbija jaoks väljenduvad pingeprobleemid toitekatkestuste või pingelohkude poolt põhjustatud seadmete seiskumises, valgustite heleduse kõikumises, elektroonikaseadmete riketes või nende talitluse hälvetena. [8]

2.1 Pingelohud

Pingelohu korral toimub pinge efektiivväärtuse ajutine vähenemine allapoole elektrivarustussüsteemi punktis määratletud alguse lävepiiri. Pingelohk on kahemõõtmeline elektromagnetiline häiring, mille tase on määratletud nii pinge kui ka ajaga. Mitmefaasiliste sündmuste korral algab lohk, kui üks pingetest langeb alla lohu alguse lävepiiri, ja lõpeb, kui kõik pinged on lohu lõpu lävepiiriga võrdsed või sellest ülalpool. [8]

Standardi EVS-EN:50160 järgi on pingelohu lävepiirid võrdsed 90 protsendiga etalonpingest. Pingelohu kestus on alates 10 millisekundist kuni 1 minutini. [7]



Joonis 2.2 Pinge efektiivväärtused pingelohu korral [9]

ΔT – pingelohu kestus, ΔU – pingelohu sügavus, U – pinge väärtus pingelohu maksimaalse sügavuse hetkel

Joonisel 2.2 on näidatud pinge efektiivväärtuse muutumine pingelohu korral. Vertikaalteljel on kujutatud pinge efektiivväärtuse kõrvalekalle nimipingest ning horisontaalteljel sündmuse kestus millisekundites.

Pingelohku iseloomustavad omadused on:

- ulatus – säilinud pinge efektiivväärtus mingis punktis;
- sügavus – pinge efektiivväärtuse erinevus nimieffektiivväärtusest;
- kestus – aeg, mille kestel on pinge efektiivväärtus alla 90 % pinge nimieffektiivväärtusest. [9]

Üks pingelohkude tekkepõhjus on asünkroonmasinate käivitamine. Sellest tingitud pingelohud esinevad sageli tööstusettevõtetes. Seda kutsuvad esile näiteks saed, hõõvliid ja hakkurid puidutööstuses, suruõhu- ja külmutuskompressorid toiduainetööstuses, veskite ja konveierite ajamid jne. Asünkroonmootorite käivitamine põhjustab pingelohke, sest nende käivitusvool on tavaliselt 5...7 korda suurem nimivoolust. [8]

Kuna asünkroonmootorid on sümmeetrilised 3-faasilised tarbijad, on nende käivitamisest tingitud pingelohud sümmeetrilised. Igas faasis on ligikaudu sama käivitusvool. Pingelohu sügavus sõltub:

- asünkroonmasina omadustest;
- elektrivõrgu iseloomust ja tugevusest masina ühenduskohas. [10]

Pingelohud võivad olla tingitud ka madalpingevõrgus või keskpingevõrgus esinevatest lühistest. Mida lähemal on lühis tarbija liitumispunktile, seda sügavam on pingelohk. Samuti, mida suurem on toiteahela näivtakistus lühisekoha ja võrgu vahel, seda

sügavam on pingelohk. Keskpingevõrgu lühiste puhul sõltub niisuguste pingelohkude kestus keskpingevõrgu kaitseaparaatide tundlikkusest ja rakendumiskiirusest. [8]

Pingelohke tekitab ka trafode sisselülitamine. Selle põhjuseks on sisselülitamisel esinev magnetahela ajutine küllastumine, mis põhjustab suuri magneetimisvoolusid. Pingelohu sügavus sõltub pinge hetkväärtusest trafo sisselülitamise ajahetkel, toiteahela takistusest ja trafo jääkmagneetumusest. Seda tüüpi pingelohud esinevad trafode pingestamisel ja korduvalülitamisel pärast lühise kõrvaldamist, nende kestus on tavaliselt 0,06...0,2 sekundit. [11]

Pingelohkusi on võimalik kestuse ja sügavuse järgi liigitada. Võimalik liigitus koos põhjustega on järgnev:

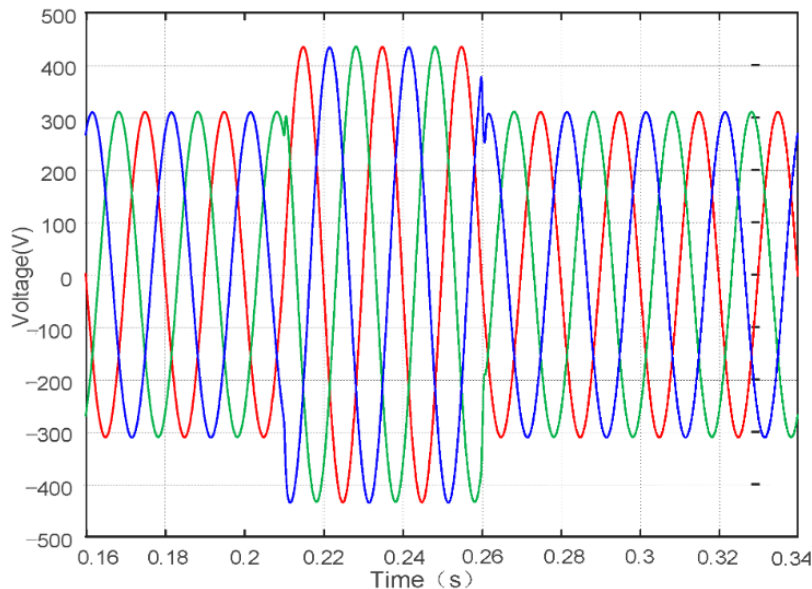
- lühistest põhjustatud lühiajalised (50...100 ms) lohud jaotusvõrgus;
- kaugelasuvate jaotusvõrkude pingelohud, sügavusega 80...90 % nimipingest ja kestusega ühest perioodist kuni mitme sekundini;
- kohalike jaotusvõrkude pingelohud, sügavusega 40...70 % nimipingest;
- mootorite käivitamisel tekkivad pingelohud, sügavusega 85...90 % nimipingest ja kestusega 0,2...20 s;
- sularite rakendumisel tingitud väga lühiajalised pingelohud, kestusega 10...100 ms. [8]

Pingelohk on elektrikvaliteedi probleem, mille korral vähemalt ühe faasi pinge langeb alla lohu alguse lävepiiri ja lõpeb, kui kõik pinged on lohu lõpu lävepiiriga võrdsed või sellest ülalpool. Pingelohkusi võivad tekitada asünkroonmasinate käivitamine, lühised võrgus või näiteks trafode sisselülitamine ning need esinevad kõige sagedamini tööstusettevõtetes.

2.2 Pingemuhud

Pingemuhk ehk võrgusageduslik ajutine liigpinge on pinge efektiivväärtuse suurenemine ülespoole elektrivarustussüsteemi punktis määratletud alguse lävepiiri. Pingemuhk võib esineda pingestatunud juhtide vahel või pingestatunud juhi ja maa vahel. Sõltuvalt neutraali talitlusest võivad maaühendused põhjustada liigpingeid tervete faaside ja neutraali vahel. [8]

Standardi EVS-EN:50160 tähenduses on pingemuhu lävepiirid võrdsed 110 protsendiga etalonpingest. Nagu ka pingelohu korral, on pingemuhu kestuseks standardi järgi määratud 10 millisekundit kuni 1 sekund. [7]



Joonis 2.3 Faasipingete lainekuju pingemuhu korral [12]

Joonisel 2.3 on kuvatud faasipingete lainekuju pingemuhu korral. „Voltage“ teljele on kantud pingete väärtused voltides ning „Time“ teljele aeg sekundites.

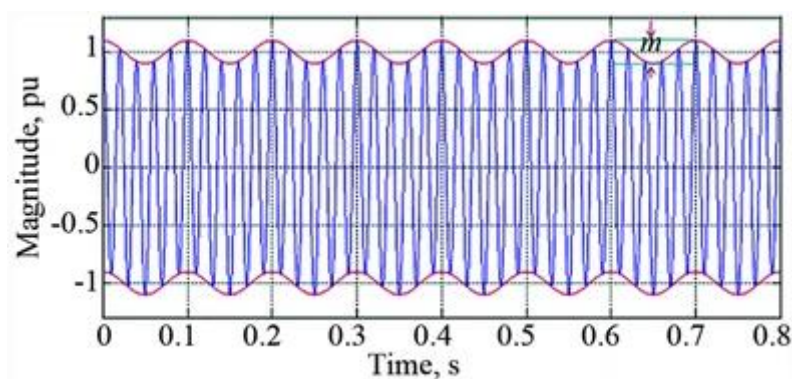
Pingemuhud tekivad tavaliselt lülituste või rikete tõttu, näiteks koormuskaol, ühefaasilisel lühisel, maalühisel, trafo pingestamisel, neutraaljuhi suure takistuse korral või liiga suure mahtvusliku koormuse tõttu. Sageli on võrgusageduslike liigpingete tekkepõhjuseks ajutised toitekatkestused, millele järgnevad asümmeetrilised siirdeprotsessid trafo sisselülitamisel. Teise osa ajutistest liigpingetest moodustavad neutraalnihkest põhjustatud liigpinged. [11]

Kõige levinum pingemuhu põhjus on ühefaasiline lühis. Kui suur pingemuhk rikkeolukorras tekib, sõltub rikke asukohast, süsteemi takistusest ja maandamisviisist. Pinged rikketa faasides tõusevad rikke ajal nulljärgnevuskomponendi tõttu. [13]

Pingemuhk on ajutine liigpinge ehk pinge efektiivväärtuse suurenemine üle pingemuhu alguse lävepiiri. Kõige tihedamini tekib pingemuhk lühise tagajärjel, lisaks võivad seda põhjustada ka suure koormuse väljalülitamine või trafode sisselülitamine.

2.3 Väreelus

Väreelus on energiavoo häiring, mida põhjustab valgustite toitepinge pidev muutumine, kus pingemuutused on võrgusagedusest väiksemad, tavaliselt alla 30 Hz. Inimesele on kõige häirivam valguse väreelus, mille sagedus on vahemikus 8...9 Hz. Sellest suuremal sagedusel valguse väreelus väheneb. Väreelus on nähtus, mida inimene tajub valgusallikate valgusvoo või selle spektri muutusena. Väreelus esineb tavaliselt ainult madalpingevõrgus. Väreeluse intensiivsust arvutatakse kui pingekõikumise suhet keskmise pinge efektiivväärtusesse. Standardi EVS-EN:50160 kohaselt ei tohi väreeluse intensiivsus ületada väärtust $P_{It} = 1,0$ tõenäosusega 95 % nädalasest mõõteperioodist. [11]



Joonis 2.4 Väreelust põhjustava pinge lainekuju graafik [14]

Joonisel 2.4 on väreelust põhjustava pinge lainekuju graafik. Vertikaalteljel nimetusega „Magnitude“ on kujutatud pinge väärtused suhtühikutes ning horisontaalteljel „Time“ on kestus sekundites.

Valguse väreelus võib inimesele avaldada kahjulikku mõju. See võib näiteks põhjustada peavalu, väsimust, silmade väsimust ning mõnel juhul ka epilepsiahooge, mistõttu tuleks väreeluse tekkimist vältida. Elektroonikaseadmete väreelus reeglina ohtlik ei ole. [15]

Toitepinge väreeluse põhjuseks on suhteliselt aeglased pingemuutused elektrisüsteemist, selles suurust mõjutavad ka pingemuutuste suurus ja sagedus. Väreelust põhjustavad näiteks järgnevad elektriseadmed:

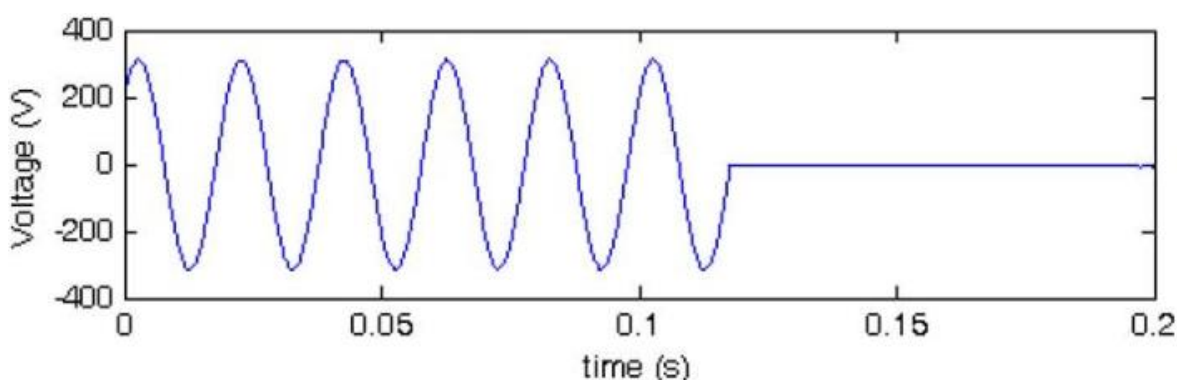
- tsüklilise koormusega asünkroonmootorid tootmisliinides;
- suure võimsusega elektriseadmed sisse-välja lülitamisel või sagedasel käivitamisel;
- keevitusseadmed, impulsskeevitusseadmed, eriti punktkeevitusseadmed;
- kaarleeksulatusahjud. [11]

Tänapäeval on kõige levinum viis terase vanametalli ümbertöötlemiseks kaarleekahju kasutamine. Kaarleekahjus liigutatakse elektroode ahju sisse ja sealt välja ning seeläbi tekib elektrikaar, mis sulatab maagi. Kaarleekahi tekitab elektrikvaliteedi probleeme, sest see on ebasümmeetriline, mittelineaarne ja ajas muutuv koormus. Kaarahju koormus võib lisaks väreleusele põhjustada ka pinge asümmeetriat ja harmoonilisi moonutusi. [16] [17]

Värelus on pingeprobleem, mida põhjustab toitepinge pidev muutumine. Inimene tajub värelist valgusallikate valgusnivoo muutusena. Inimesele võib värelus avaldada kahjulikku mõju, kuid elektroonikaseadmetele see tavaliselt ohtu ei kujuta. Värelist põhjustavad näiteks mittelineaarse ja ajas muutuva koormusega seadmed ning suure võimsusega elektriseadmed sagedasel käivitamisel.

2.4 Toitepinge katkestus

Kliendi seisukohast on olulise tähtsusega toite katkematus ehk elektrivarustuspidevus, mida hinnatakse normaalse toitekatkestusega talitluse kestuse järgi antud aja vältel. Toitekatkestusi võib liigitada pikkadeks katkestusteks kestusega üle 3 minuti ning lühikesteks katkestusteks. Lühikesed toitekatkestused sarnanevad pingelohkudega. Standardi EVS-EN:50160 kohaselt on toitekatkestus seisund, kus pinge on liitumispunktis väiksem kui 5% lepingulisest pingest. Toitekatkestus võib olla plaaniline või ootamatu. [9]



Joonis 2.5 Toitepinge katkestuse pingelaine kuju [18]

Joonisel 2.5 on näidatud pingelaine kuju katkestuse korral. Vertikaalteljel nimetusega „Voltage“ on pingelaine väärtused voltides ning horisontaalteljel nimetusega „Time“ on kuvatud kestus sekundites.

Katkestuste sagedust mõjutavad järgmised tegurid:

- jaotusvõrgu tüüp ja liinide pikkus;
- neutraali maandamisviis;
- liigpingekaitse tüüp;
- reelekaitse struktuur;
- maastiku tüüp;
- ilmastik;
- loomade rohkus. [9]

Toitekatkestuste põhjustajaks on üldjuhul rikked. Esineda võib ootamatuid katkestusi kui ka lühiajalisi katkestusi. Ootamatuid katkestusi võivad põhjustada jaotusvõrguvälised sündmused, näiteks äike või kaevetööd, või seadmete rikked. Lühiajalisi toitekatkestusi tekitab automaatne taaslülitamine. [9]

Pikkadel toitekatkestustel on elektri kvaliteedi seisukohalt määrav tähtsus, need on kas plaanilised või tingitud mõnest rikkest. Rikke korral lülitab reelekaitse fiidri välja ja üldjuhul jäävad toiteta kõik selle fiidriga seotud kliendid. Plaanilised katkestused puudutavad tavaliselt vähem tarbijaid kui katkestused rikete korral. Ka on võimalik plaanilisi töid teostada sellisel ajal, mil see tekitab tarbijatele kõige vähem ebameeldivusi. [9]

Toitekatkestuste kahjulikku mõju on raske kvantitatiivselt määrata. Hinnata on võimalik vaid andmata jäänud toodangut ning tootmisega seotud muid ebakohti. Kommunaaltarbijatele tekitatud kahjud ei ole üldjuhul rahas väljendatavad. Kahju sõltub katkestuste arvust ja nende kestusest. [9]

Toitepinge katkestust võib tarbija vaates pidada kõige ebameeldivamaks pingekvaliteedi probleemiks. Toitekatkestus on selline olukord, kus pinge on liitumispunktis väiksem kui 5% nimipingest. Kõige sagedamini põhjustavad katkestusi võrgus esinevad rikked, lisaks võivad katkestused olla ka plaanilised.

Kokkuvõtvalt saab järeldada, et eri liiki pingeprobleemid põhjustavad tarbijatele erinevaid ebamugavusi. Kuna kehtivas seadusandluses ei ole määratud minimaalseid parameetreid, millele toitepinge peab vastama, tuleb pingekvaliteedi tagamisel lähtuda avalike elektrivõrkude pinge tunnussuuruste standardist. Kõige ebameeldivamaks pingeprobleemiks võib pidada toitepinge katkestust. Et paremini aru saada pingeprobleemide tekkepõhjustest ja mõjude ulatusest ning leida võimalusi nende leevendamiseks, tuleb põhjalikumaks uurimiseks viia läbi objekti analüüs.

3. OBJEKTI ANALÜÜS

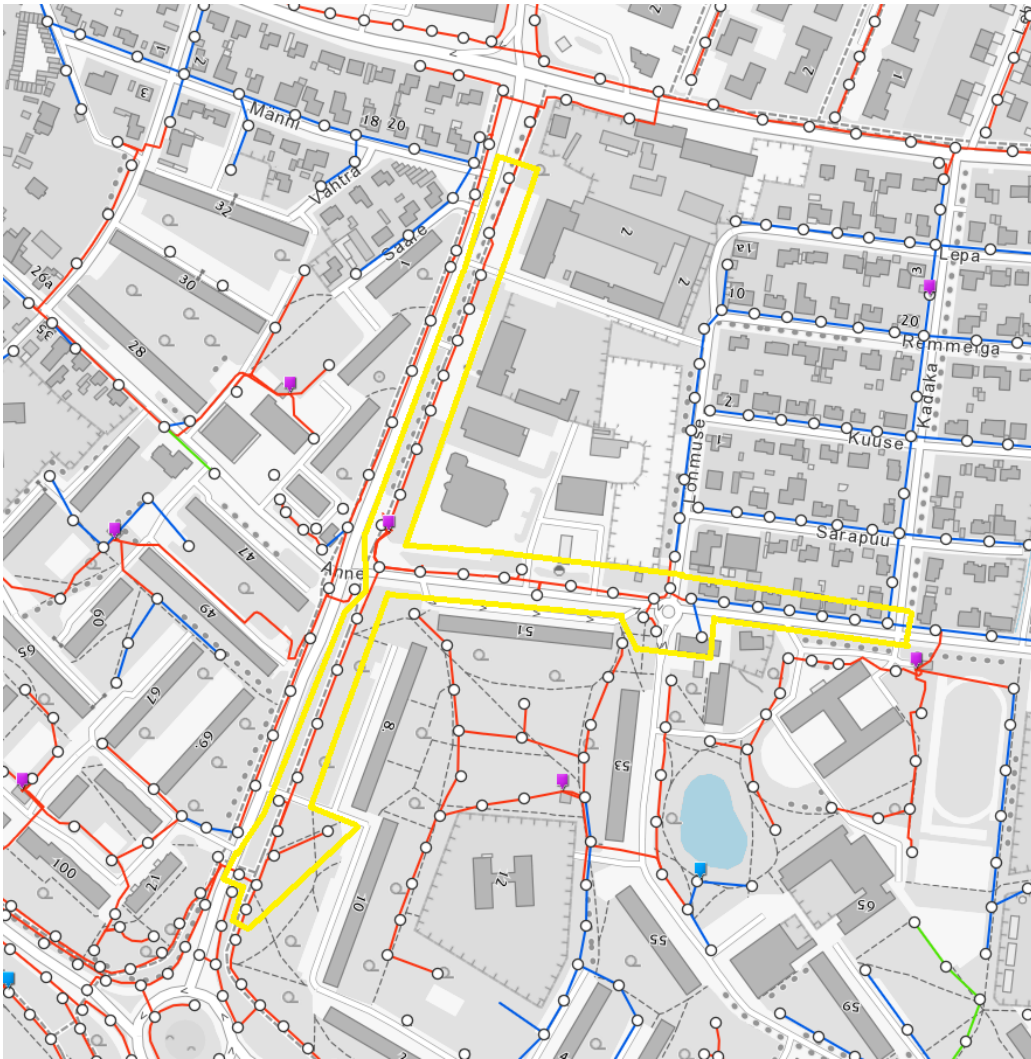
Et uurida, kas eri liiki pingeprobleeme on võimalik leevendada või vältida, on esmalt vaja need pingeprobleemid esile kutsuda. Nende tekitamiseks koostatakse erinevad kasutusjuhud ehk stsenaariumid, mis annavad sisendi mudeli loomiseks. Mudel koostatakse Simulink tarkvara abil ning selle aluseks on üks konkreetne Tartu tänavavalgustusvõrgu osa. Pärast probleemide tuvastamist uuritakse, kas akuenergiasalvesti abil on võimalik tekkinud probleeme vältida või leevendada.

Näidisobjektina modelleeritav Tartu linna tänavavalgustusvõrgu osa on valitud mikrovõrkude pilootprojekti „Energiavajaduse vähendamine mikrovõrkude ning energiasalvestite abil“ raames, mida rahastavad Euroopa Regionaalarengu Fond ja Eesti Haridus- ja Teadusministeerium.

3.1 Olemasoleva kommunaalelektrivõrgu tutvustus

Näidisobjekti puhul on tegemist Tartu linnas, Annelinna linnaosas asuva tänavavalgustusvõrgu ühe osaga. Selle tänavavalgustusvõrgu juhtimiskilp, tunnusega 156_Anne II, asub Sõpruse pst ja Anne tänava ristis.

Valgustuse liinid kulgevad mööda Sõpruse puisteed ja Anne tänavat. Selle tänavavalgustusvõrgu asukohast parema ülevaate saamiseks on alloleval joonisel piiritletud juhtimiskilbi 156_Anne II toitepiirkond kollase joonega.



Joonis 3.1 Näidisobjekti kaardivaade [19]

Joonisel 3.1 nähtavad punased jooned tähistavad maakaabelliini, sinised jooned õhuliini ning valged ümmargused täpid valgusteid. Nii juhtimiskilp kui ka maakaablid on paigaldatud 2017. aastal, õhuliinide paigaldamise või asendamise kohta infot ei ole. On tõenäoline, et tegemist oli olemasoleva tänavavalgustusvõrgu rekonstrueerimisega.

Selle juhtimiskilbi liitumispunkti peakaitsme suurus on 3xC32 A. Juhtimiskilbis on kolm tänavavalgustuse fiidrit. Esimese fiidri valgustuse liinid kulgevad Sõpruse puiesteel lõuna suunas, ringtee poole. Teise fiidri valgustuse liinid kulgevad Sõpruse puiesteel põhja suunas ning kolmanda fiidri liinid kulgevad mööda Anne tänavat ida suunas. Tabelisse 3.1 on kantud tänavavalgustusvõrgu fiidrite parameetrid.

Tabel 3.1 Tänavavalgustusvõrgu fiidrite parameetrid

Parameeter	Fiider 1	Fiider 2	Fiider 3
Konfiguratsioon	Suletud radiaalvõrk	Suletud radiaalvõrk	Suletud radiaalvõrk
Fiidrikaitse	3(1xB20A)	3(1xB25A)	3(1xB20A)
Liinide tüüp	Maakaabel	Maakaabel	Maakaabel ja õhuliin
Liini mark	AXPK 4G25	AXPK 4G25	AXPK 4G25, EX 4x16
Toiteliinide maht	370 m	282 m	506 m
Valgustite arv	11 tk	14 tk	26 tk
Valgustite koguvõimsus	342 W	707 W	2703 W

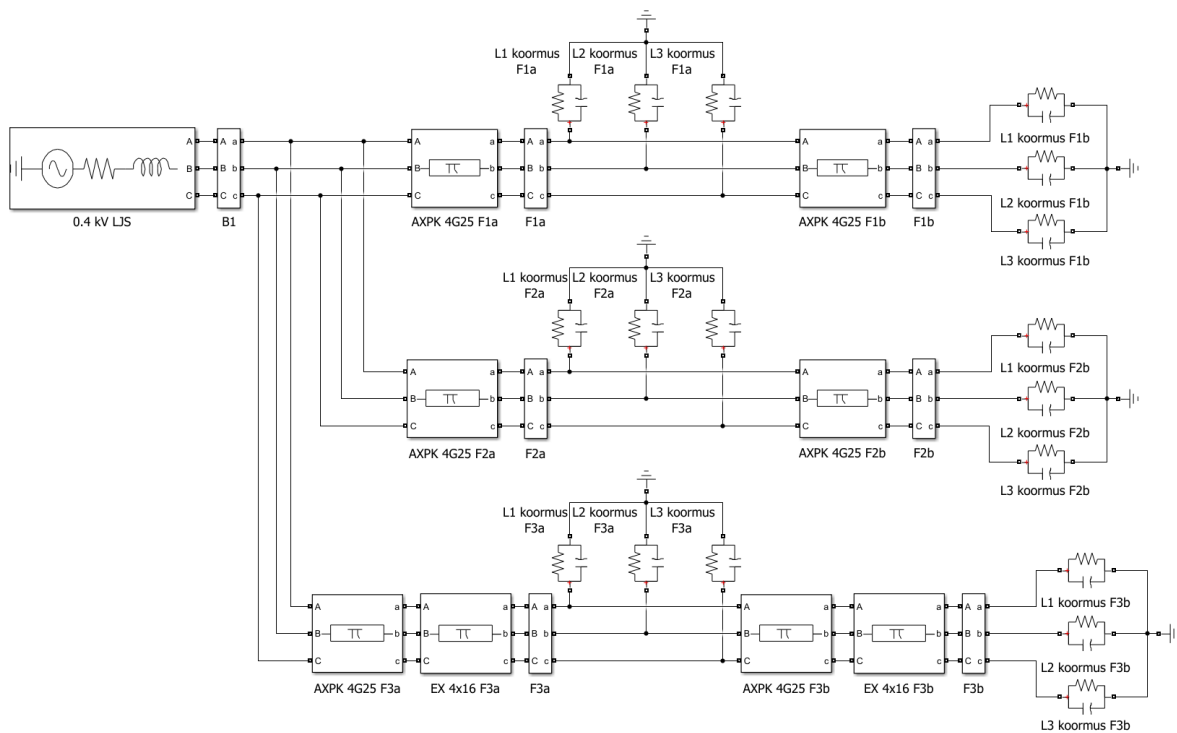
Näidisobjekti fiidrite parameetreid uurides selgub, et selles võrgus on toiteliinideks valdavalt maakaablid. Samuti on kõik fiidrid ehitatud suletud radiaalvõrgu konfiguratsiooniga, mis tähendab, et näiteks juhtimiskilbi 156_Anne II toitekatkestuse või rikke korral on võimalik kõigi kolme fiidri lahuspunktid sulgeda ning toita neid teise võrgu kaudu.

3.2 Näidisobjekti modelleerimine

Kasutusjuhtude modelleerimiseks koostati näidisobjekti põhjal mudel Simulink keskkonnas, kasutades Simscape Electrical plokkkeemi. Simulink on MATLAB-i pakett ja plokkkeemide keskkond, mida kasutatakse süsteemide modelleerimiseks, simuleerimiseks ja analüüsiks. Simscape Electrical on Simulink-i lisapakett, mis täiendab põhiteeki elektrisüsteemide modelleerimiseks mõeldud komponentide ja plokkide mudelitega. Neid komponente on võimalik kasutada elektrienergia tootmise, muundamise, edastamise ja tarbimise analüüsiks võrgu tasandil. [20]

Kuna uuritakse ainult konkreetset kommunaalvõrku, on mudelis võrgu alguspunktiks tänavavalgustusvõrgu lülitusjaotusseade, mitte sellest ettepoole jääv jaotusvõrk.

3.2.1 Mudeli komponendid



Joonis 3.2 Näidisobjekti mudel Simulink keskkonnas

Toiteallikana kasutatakse mudelis kolmefaasilist ideaalset pingesallikat, mille parameetrid on järgnevad:

- Ühendusviis – maandatud tähtühendus;
- Liinipinge efektiivväärtus – 400 V;
- Sagedus – 50 Hz;
- Võrgu lühisvõimsus – 1056 kVA;
- Takistuste X/R suhe toitepunktis – 3,8.

Andmed võrgu lühisvõimsuse ja takistuste suhte kohta toitepunktis on võetud Elektrilevi andmebaasist.

Mudelis on seitse plokki faasipingete ja voolude mõõtmiseks. Esimene plokk, B1, asub toiteallika juures ning ülejäänud kuus (F1a ja F1b, F2a ja F2b, F3a ja F3b) asuvad koormuste ees. Simulatsioonide käigus analüüsitakse faasipingete lainekuju ja efektiivväärtust.

Simulink-is on elektriliini modelleerimiseks kolm varianti: on võimalik kasutada *PI Section Line* (PI-aseskeem) plokki, *Distributed Parameters Line* (hajutatud parameetritega liin) plokki või kasutada ette nähtud plokkide asemel skeemis liini takistuslikele, mahtuvuslikele ja induktiivsuse parameetritele vastavat koormust. PI-

aseskeemi plokki kasutatakse peamiselt lühikeste toiteliinide modelleerimiseks. PI-aseskeemi mudel moodustatakse R, L ja C parameetritest. Maksimalne sagedus, millega on võimalik PI-aseskeemi mudelit täpsete tulemuste jaoks kasutada, on ligikaudu 375 Hz. See mudel on piisav elektrivõrgu püsiseisundi uurimiseks, kuid näiteks kõrgsageduslike transientliigpingete uurimiseks PI-aseskeemi plokk ei sobi. Hajutatud parameetritega liini plokk on toiteliini kadudeta mudel, mis põhineb „Bergeron'i“ meetodil. Selles mudelis on liini parameetrid hajutatud piki liini. Erinevalt PI-aseskeemist, ei kirjelda see mudel elektriliinide R, L ja C parameetrite sõltuvust sagedusest ning kujutab palju parema täpsusega pingelainete leviku nähtusi. [21] [22] [23]

Toitepunktist väljub kolm fiidrit. Fiidrite toiteliinide modelleerimiseks on kõige otstarbekam kasutada PI-aseskeemi (*PI Section Line*) plokk. Toiteliinide kirjeldamiseks on vaja määrata liini pikkus, takistus, induktiivsus, mahtuvus ja nulljärgnevustakistused. Näidisobjektile kasutusel olevate toiteliinide takistused on toodud vastavatel andmelehtedel (lisad 1 ja 2).

Kaabli AXPK 4G25 parameetrid:

- Soone takistus – 1,20 Ω /km;
- Soone induktiivsus – 0,28 mH/km;
- Mahtuvus – 0,29 μ F/km. [24]

Õhuliinijuhtme EX 4x16 parameetrid:

- Soone takistus – 1,91 Ω /km. [25]

Kuna õhuliinijuhtme andmelehel [25] puudusid andmed selle induktiivsuse ja mahtuvuse kohta, kasutati mudelis sama ristlõikega AXPK kaabli induktiivsuse ja mahtuvuse andmeid.

Kaablite nulljärgnevustakistused olenevad peale kaabli konstruktsiooni ka paigaldusviisist ja asukohast, seega tuleb nende määramiseks teha vastavaid mõõtmisi reaalses paigalduskohas. Kuna mõõteandmed puuduvad, võib kasutada ligikaudseid hinnanguid:

- $R_0 \approx 10 * R_1$;
- $X_0 \approx (3,5 \dots 4,6) * X_1$. [26]

Tänavavalgustid ei ole kolmefaasilised tarbijad, iga valgusti on ühendatud vaheldumisi ühele faasile, mistõttu ei ole koormus fiidril täiesti sümmeetriline. Andmed selle kohta,

kuidas näidisobjektile valgustid faasidele ühendatud on, pärinevad Tartu tänavavalgustuse kaardirakendusest VALGIS [19]. Kuna valgusteid on fiidril palju ning iga üksiku valgusti lisamine teeks mudeli liiga keeruliseks, tuleb mudelit lihtsustada. Selleks on vaja toiteliinide pikkused ja fiidrite koormused mudelis kaheks jagada nii, et esimese ja teise liinilõigu vahele ühendatakse esimene pool koormusest ning teise liinilõigu ehk fiidri lõppu teine pool koormusest. Selliselt on võimalik ka hinnata, kuidas näiteks fiidri lõpus toimuv stsenaarium mõjutab fiidri alguses olevat koormust ja vastupidi.

Näidisobjektile on peamiselt kasutusel mitme erineva tootja LED tänavavalgustid. Ainus võrgus kasutatav LED valgusti, mille andmelehel on võimalik leida infot selle võimsusteguri kohta, on tootja Vizulo valgusti Stork [27]. Kuna teistel tootjatel võimsusteguri infot andmelehtedel ei ole, siis tuleb koormuste reaktiivvõimsuse suurust arvutades eeldada, et näidisobjektile on kõik ühe tootja valgustid ühesuguse võimsusteguriga.

Paljusid LED valgustussüsteeme juhitakse tänapäeval juba elektroonilise toiteplokkidega, mis on oma olemuselt mahtuvuslike omadustega. Nendesse toiteplokkidesse on integreeritud võimsusteguri korrigeerimise ahel (*PFC*), mille tulemusena on valgustitel võimalik saavutada võimsustegur suurusega kuni 0,99. [28]

Kuna ei ole teada, milline on näidisobjektile kasutatava valgusti Vizulo Stork täpne mudel ning andmelehel on erinevate mudelite võimsustegurid vahemikus 0,90 – 0,98, kasutatakse reaktiivvõimsuse arvutustes võimsustegurit 0,95. Tarbijate reaktiivvõimsused on võimalik leida valemite 3.1 ja 3.2 abil.

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} \quad (3.1)$$

kus P – koormuste aktiivvõimsus, W
 $\cos \varphi$ – võimsustegur
 S – koormuste näivvõimsus, VA

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (3.2)$$

kus Q – koormuste reaktiivvõimsus, var
 P – koormuste aktiivvõimsus, W
 S – koormuste näivvõimsus, VA

Iga fiidri kohta arvatatud koormuste summaarne aktiiv- ja reaktiivvõimsus faasi kaupa on näidatud tabelis 3.2.

Tabel 3.2 Fiidrite koormuste arvutustulemused faaside kaupa

Fiidri nr	Faas	Aktiivvõimsus, W	Reaktiivvõimsus, var
1	L1	84	26
	L2	112	36
	L3	146	48
2	L1	193	63
	L2	229	75
	L3	285	93
3	L1	996	327
	L2	778	255
	L3	929	305

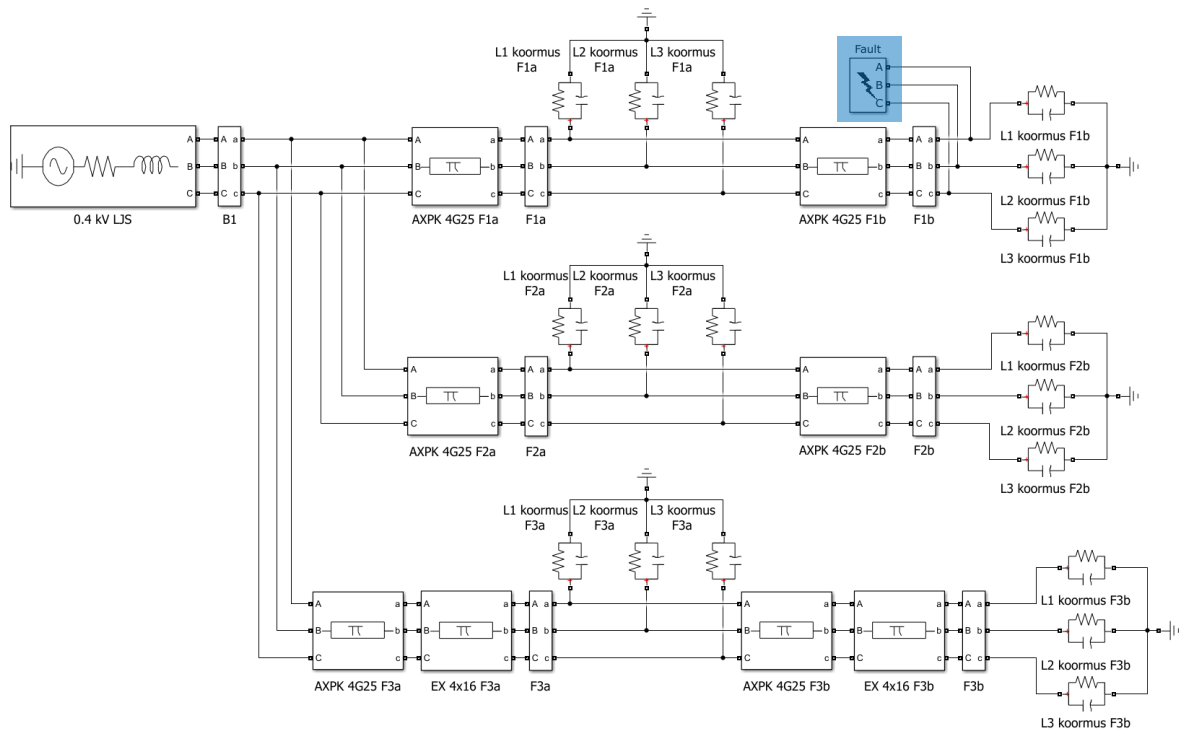
3.3 Kasutusjuhtude kirjeldus

Pingeprobleemide uurimiseks ja leidmaks lahendusi nende leevendamiseks koostati näidisobjekti baasil neli erinevat kasutusjuhtu. Nende kasutusjuhtude eesmärk on tekitada neli enamlevinud probleemi: pingelohku, pingemuhku, värelust ning katkestust. Igal fiidril tekitati üks pingeprobleem ning toitepinge katkestus teostati tervele võrgule.

Pärast simulatsioonide teostamist võrreldi tulemusi iga pingeprobleemi teoreetilise käsitlusega ning otsustati, kas saavutatud tulemus vastab pingeprobleemi käsitlusele.

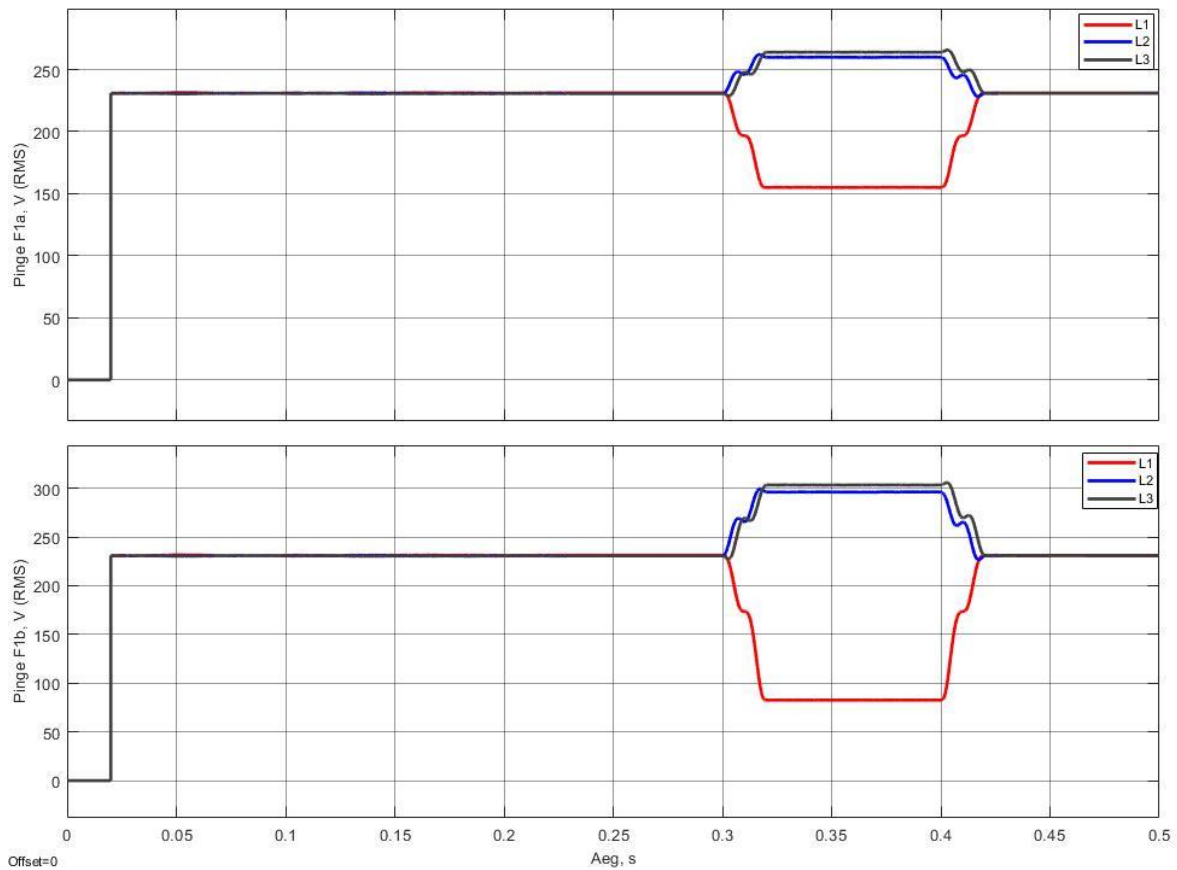
3.3.1 Pingemuhk

Esimese kasutusjuhu korral tekitati pingemuhk esimesel fiidril koormuse juures. Pingemuhu saavutamiseks simuleeriti ühefaasilist lühist, kuna see on kõige sagedasem ja levinum pingemuhu tekkimise põhjus.

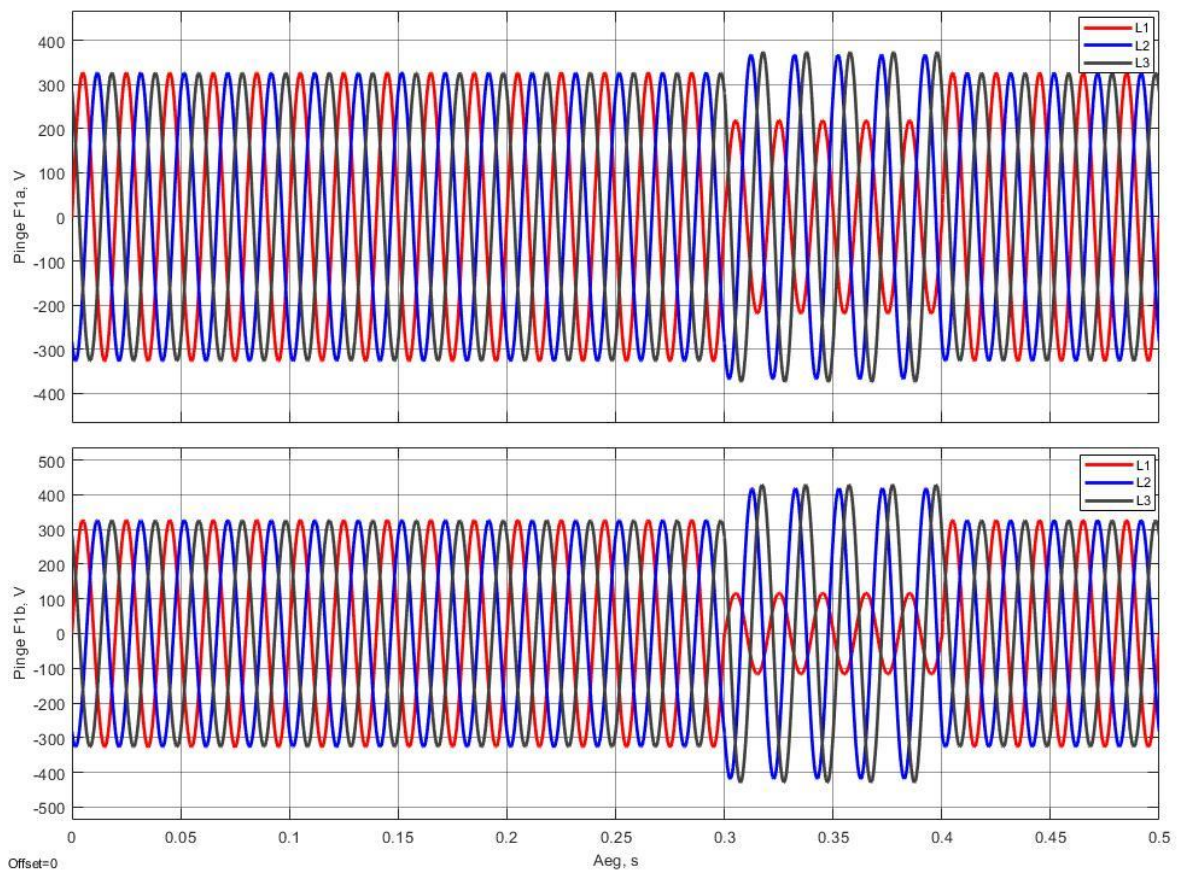


Joonis 3.3 Stsenaarium pingemuhu simuleerimiseks Simulink keskkonnas

Pingemuhu tekitamiseks lisati esimesele fiidri teise liinilõigu lõppu, koormuse juurde, Simulink-i lühise plokk. Simulatsiooni pikkus on 0,5 sekundit ning lühis tekitati faasi L1 ja maa vahel ajahetkel 0,3 sekundit kestusega 100 millisekundit.



Joonis 3.4 Pingemuhu simulatsiooni tulemused – efektiivväärtused



Joonis 3.5 Pingemuhu simulatsiooni tulemused – lainekujud

Joonistelt 3.4 ja 3.5 on näha tulemused esimese fiidri keskel ja lõpus mõõtepunktides F1a ning F1b. Ülemisel graafikul on näha mõõtepunktis F1a mõõdetud väärtused ning alumisel graafikul F1b mõõdetud väärtused.

Pingemuhu simulatsiooni tulemusi vaadates on näha, et mõlemas mõõtepunktis langeb pinge efektiivväärtus rikke hetkel alla 100 voldi selles faasis, milles toimub lühis. Esimese liinilõigu järel, mõõtepunktis F1a, tõuseb pinge rikke hetkel kõige kõrgemaks, 264 voldini, faasis L3. Fiidri lõpus, mõõtepunktis F1b, tõuseb pinge samuti kõige rohkem faasis L3, 303 voldini.

Eelnevalt on kirjutatud, et standardi EVS-EN:50160 järgi algab pingemuhk siis, kui pinge on nimipingest 110% suurem. Valemi 3.3 alusel leitakse, kui suur erinevus oli lühise hetkel faaside L2 ja L3 pingete ja nimipinge vahel.

$$\Delta U_{F1x} = \frac{U_{L2}}{U_{nimi}} * 100\% \quad (3.3)$$

kus ΔU_{F1x} – pingete erinevus mõõtepunktis, %

U_{L2} – faasi L2 pinge, V

U_{nimi} – võrgu nimipinge, V

Kuna faasi L3 pinge on mõlemal juhul suurem kui L2 pinge, arvutatakse erinevus ainult L2 pingetega.

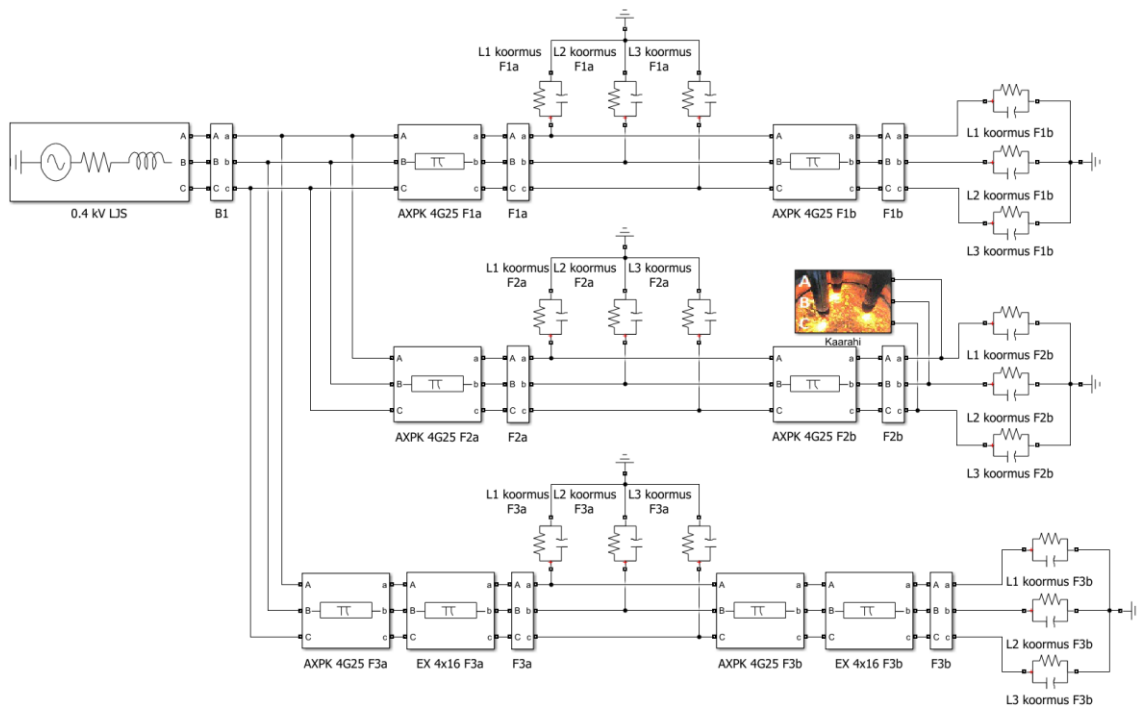
$$\Delta U_{F1a} = \frac{260}{230} * 100\% = 113\%$$

$$\Delta U_{F1b} = \frac{295}{230} * 100\% = 128\%$$

Kuna mõlemas mõõtepunktis on faaside L2 ja L3 pinged nimipingest üle 110% võrra suuremad, võib järeldada, et simulatsiooni tulemusena tõesti saavutati 10 ms kestusega pingemuhk.

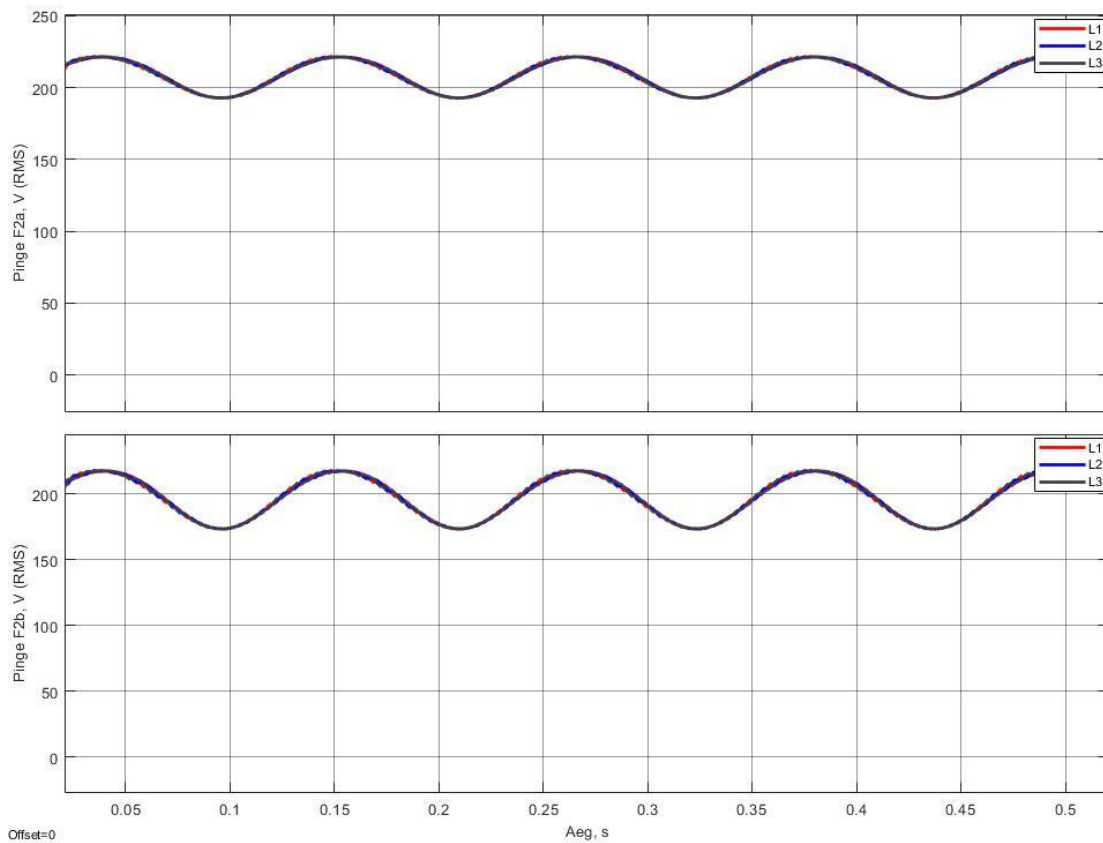
3.3.2 Värelus

Teise kasutusjuhu tagajärjel tekib võrgus värelus. Kuna Simulink-i teekides puudub spetsiaalne moodul väreluse simuleerimiseks, ühendati teisele fiidrile, koormuse juurde, kaarahi, mille mudel hangiti MathWorks File Exchange keskkonnast [29]. Kuigi on ebatõenäoline, et kommunaalvõrgu ristkasutuse korral keegi kaarahju sellesse võrku ühendaks, täitis see oma eesmärgi ning tekitas võrgus väreluse.

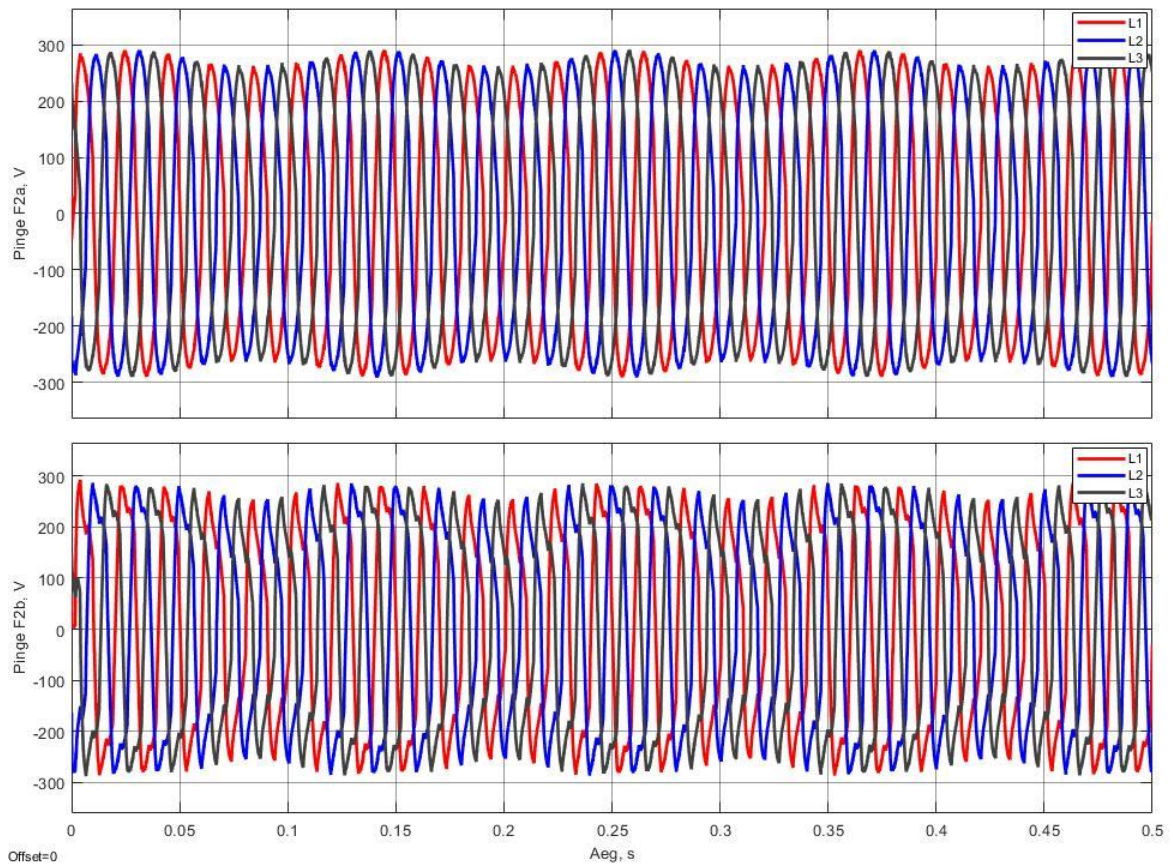


Joonis 3.6 Stsenarium väreluse simuleerimiseks Simulink keskkonnas

Väreluse tekitamiseks lisati teise fiidri lõppu, koormuse juurde, kaarahju tööd simuleeriva mudeli plokk. Simulatsiooni pikkus oli 0,5 sekundit. Selles simulatsioonis uuriti pinget mõõtepunktides F2a ja F2b.

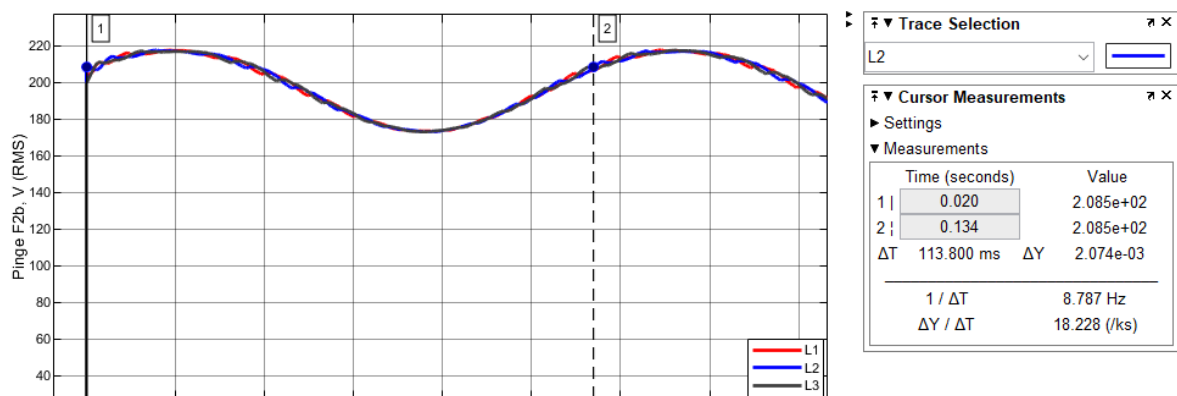


Joonis 3.7 Väreluse simulatsiooni tulemused – efektiivväärtused



Joonis 3.8 Värelyse simulatsiooni tulemused – lainekujud

Joonistelt 3.7 ja 3.8 on näha, et kaarahi põhjustab fiidril värelysele iseloomulikke aeglaseid pingemuutusi. Sarnane värelyst põhjustava pinge efektiivväärtuse ja lainekuju graafik on kujutatud ka joonisel 2.4. Värelyseks nimetatakse häiringut, mille korral toitepinge muutumise sagedus on väiksem võrgusagedusest ning jääb tavaliselt alla 30 Hz-i.

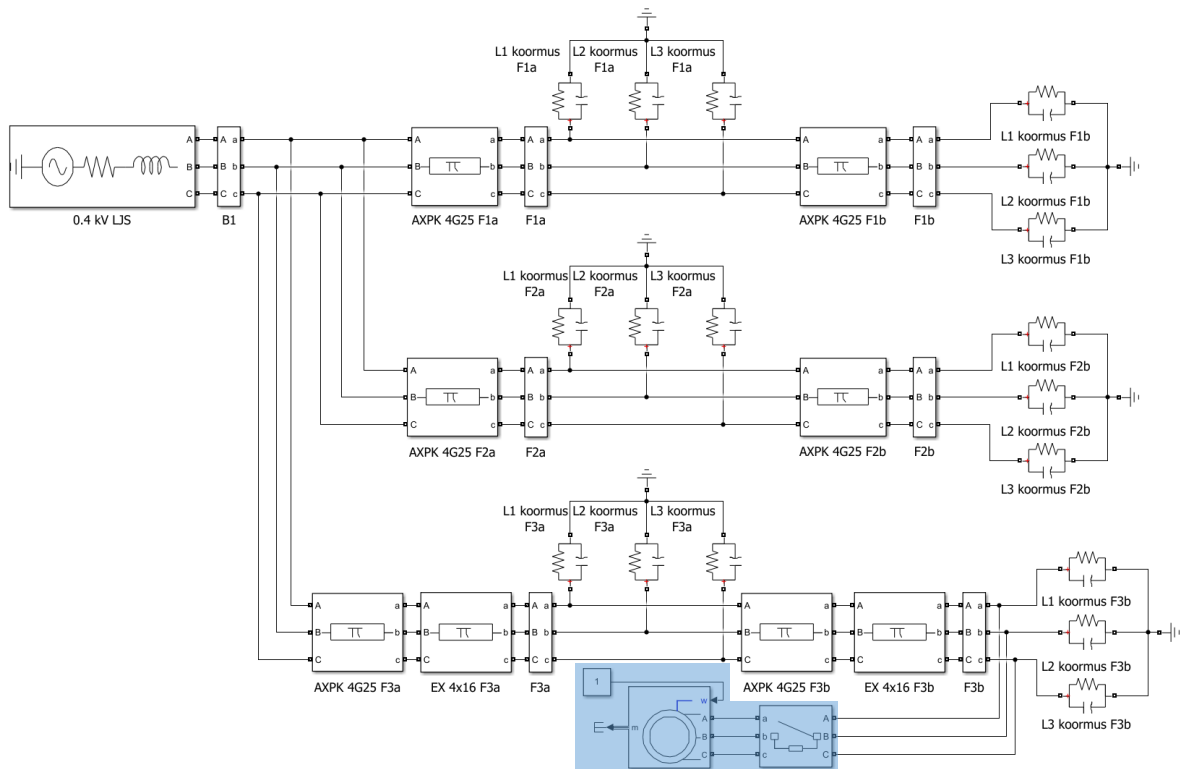


Joonis 3.9 Värelyse põhjustatud pingemuutused

Jooniselt 3.9 on võimalik näha, et simulatsioonis oli mõõtepunktis F2b pinge muutumise sageduseks umbes 8,8 Hz, mis on ühtlasi inimesele kõige häirivam valguse värelyse. Tulemustest võib järeldada, et simulatsiooni tulemusena saavutati fiidril värelyse.

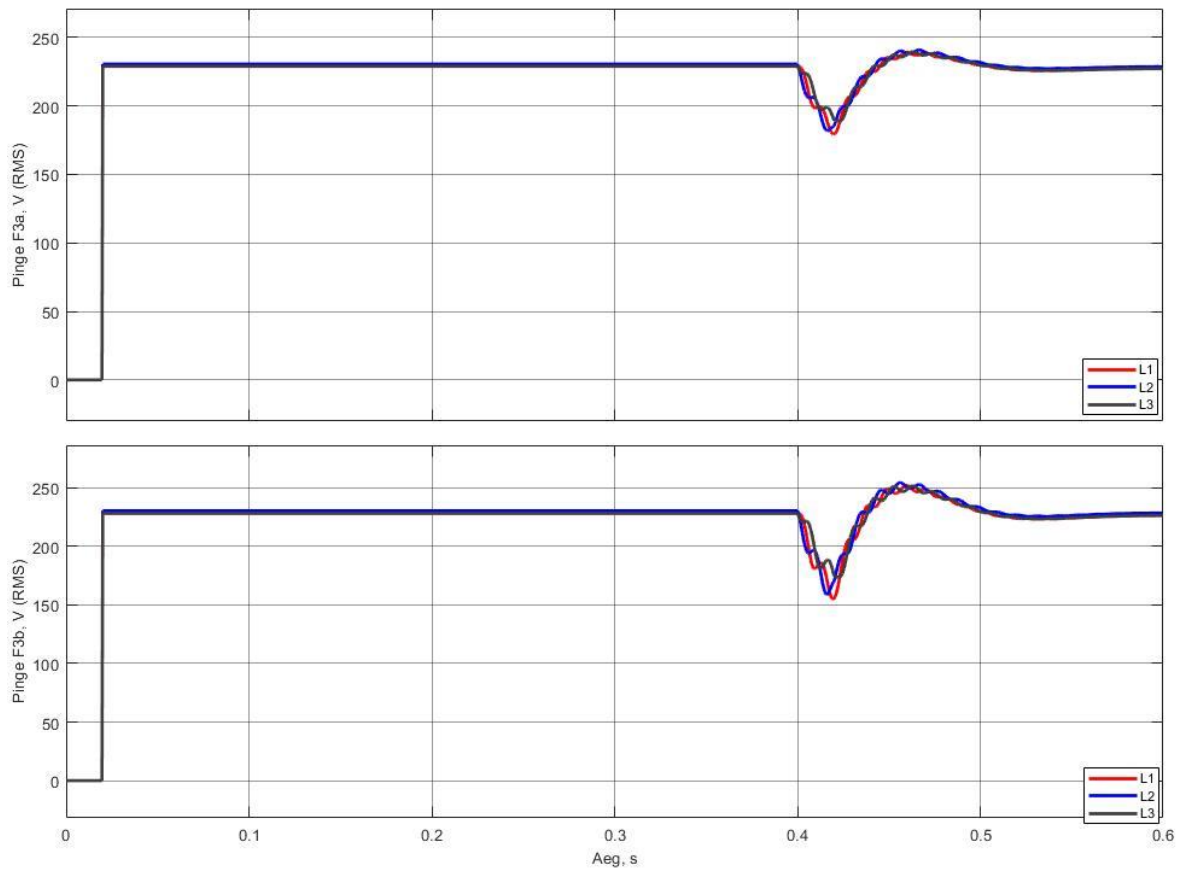
3.3.3 Pingelohk

Kolmandaks kasutusjuhuks on pingelohu tekitamine, mida põhjustab asünkroonmasina käivitamine. Asünkroonmasin ühendati kolmanda fiidri lõppu. See on üsna aktuaalne pingelohu tekkepõhjus, sest see esineb sageli erinevates tööstusettevõtetes.

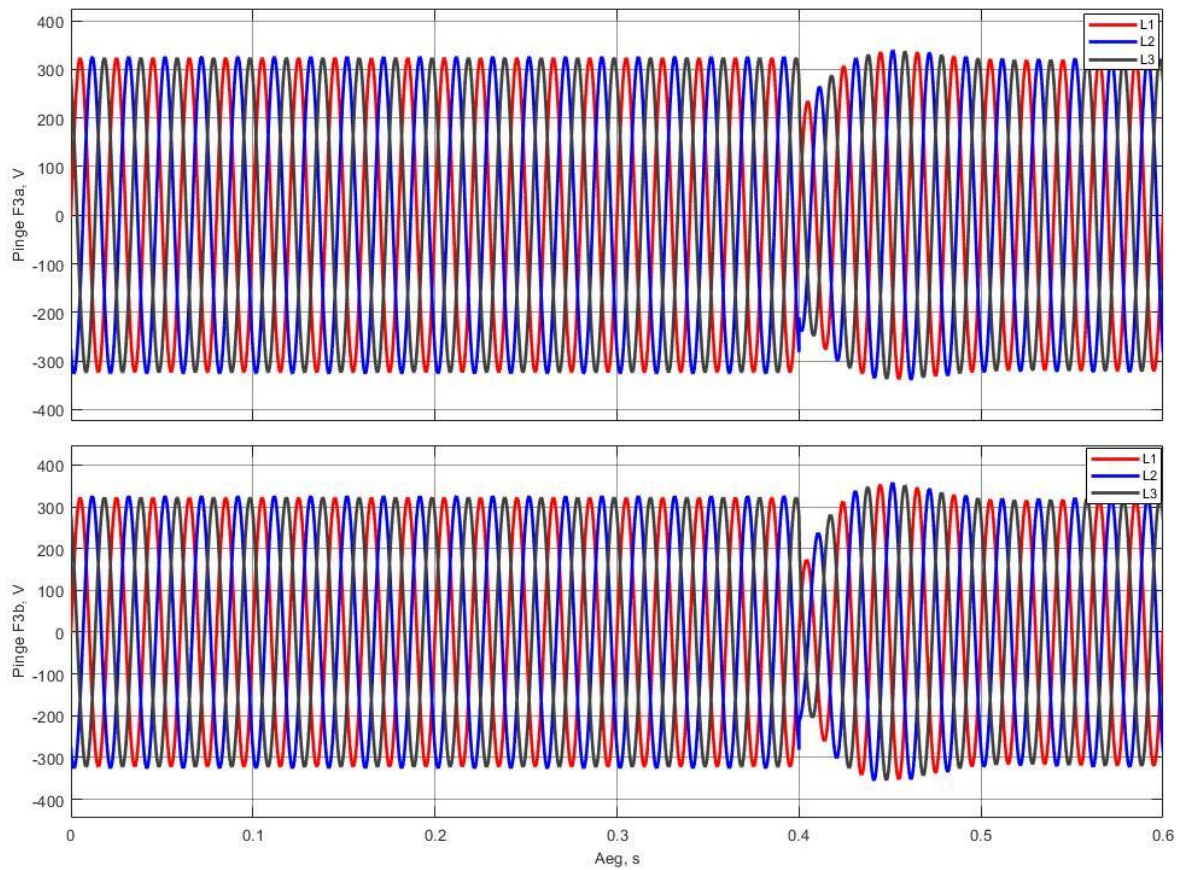


Joonis 3.10 Stsenarium pingelohu simuleerimiseks Simulink keskkonnas

Pingelohk tekib asünkroonmasina käivitamise tagajärjel, mis leiab aset ajahetkel 0,4 sekundit. Pingelohu simulatsiooniks valiti eelseadistatud 15 kW võimsusega asünkroonmasina mudel. Simulatsiooni pikkuseks on 0,6 sekundit. Pingeid vaadeldi mõõtepunktides F3a ja F3b.



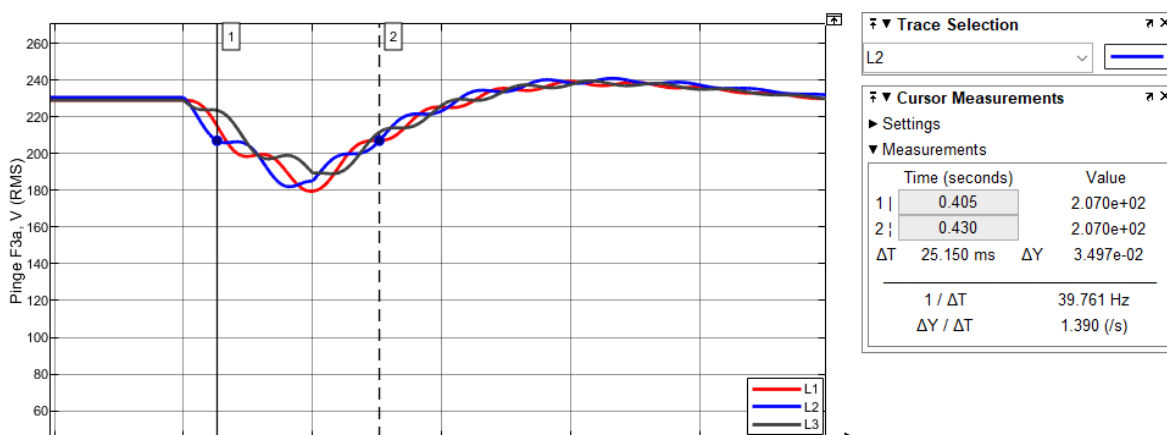
Joonis 3.11 Pingelohu simulatsiooni tulemused – efektiivväärtused



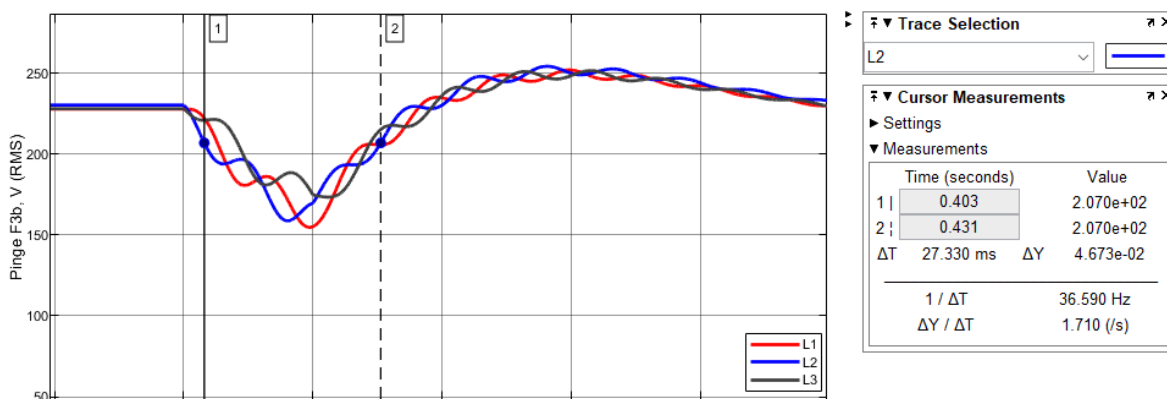
Joonis 3.12 Pingelohu simulatsiooni tulemused – lainekujud

Simulatsiooni tulemustest selgub, et asünkroonmasina käivitamise hetkel langes pingeline efektiivväärtus esimeses mõõtepunktis umbes 180 voldini ning teises mõõtepunktis 152 voldini.

Pingelohk tekib siis, kui pinge vähemalt ühes faasis langeb alla 90%-i nimipingest ning lõppeb siis, kui kõik pinged on üle 90%-i nimipingest. Pingelohu kestus on minimaalselt 10 millisekundit. Kuna simulatsioonis on võrgu nimipinge 230 V, siis pingelohu alguse ja lõpu piiriks on 207 V.



Joonis 3.13 Pingelohu kestus mõõtepunktis F3a

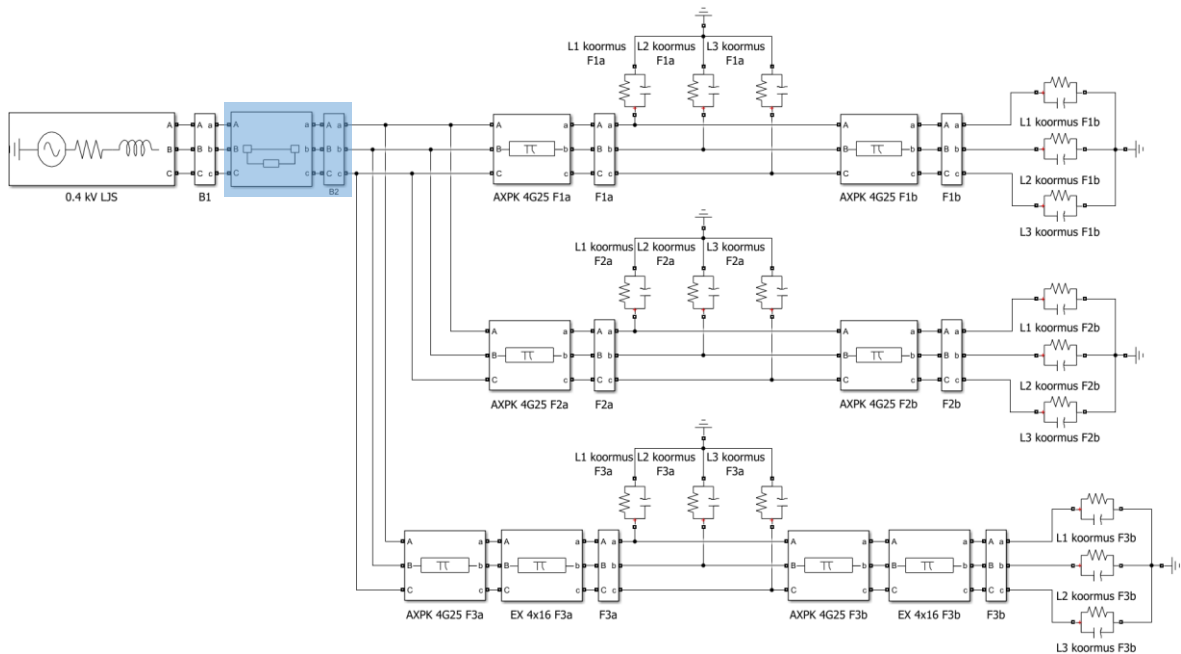


Joonis 3.14 Pingelohu kestus mõõtepunktis F3b

Joonistel 3.13 ja 3.14 on välja toodud pingelohkude kestused mõlemas mõõtepunktis. Pingelohu algust mõõdeti sel ajahetkel, kui pinge efektiivväärtus oli 207 V ning lõppu ajahetkel, mil efektiivväärtus oli samuti 207 V. Joonistelt on näha, et esimeses mõõtepunktis oli pinge väärtus madalam pingelohu alguse ja lõpu piirist 25 ms vältel ja teises mõõtepunktis 27 ms vältel. Kuna pingelohu minimaalseks kestuseks loetakse 10 millisekundit, siis on võimalik järeldada, et asünkroonmasina käivitamise tagajärjel tekkis fiidril mõlemas mõõtepunktis pingelohk.

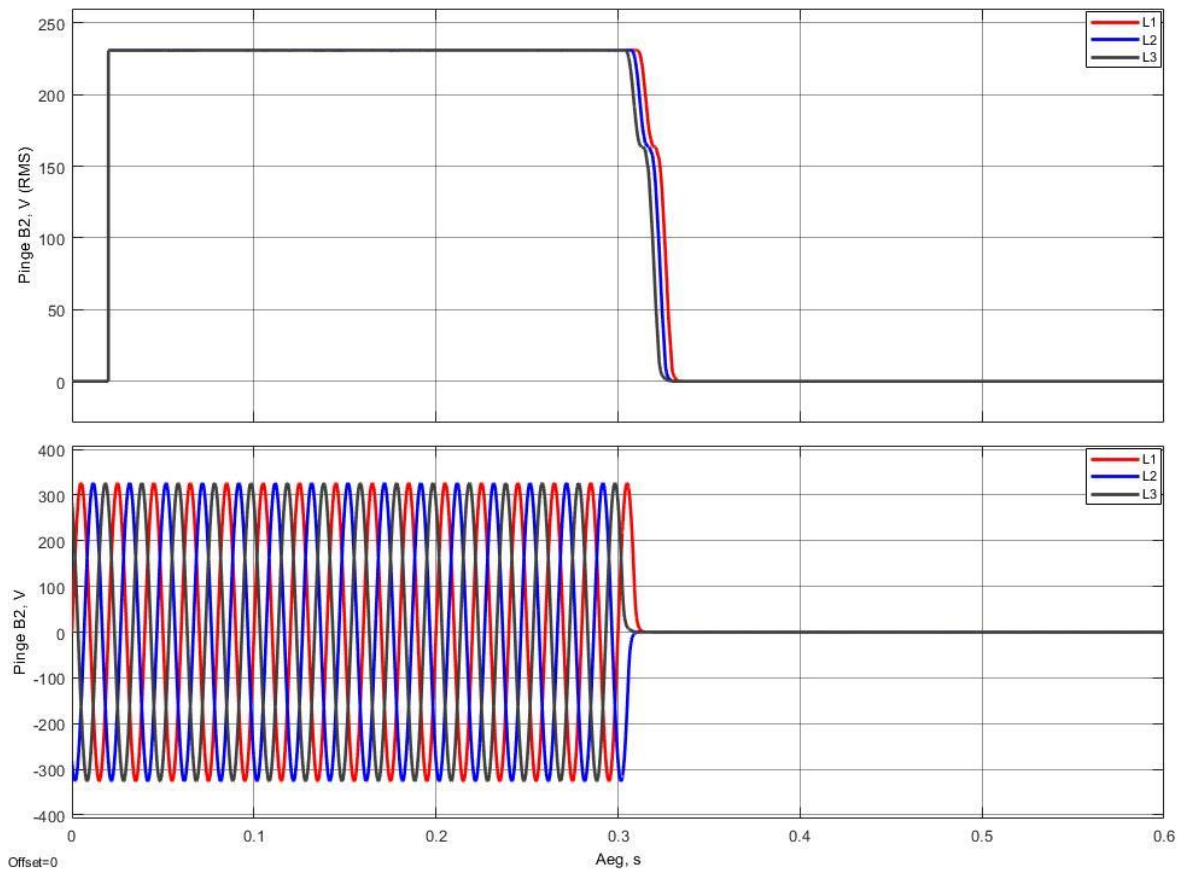
3.3.4 Toitepinge katkestus

Neljandal kasutusjuhul leiab terves võrgus aset katkestus. Katkestuse teostamiseks lahutati kõik fiidrid korraka toitepunktist.



Joonis 3.15 Stsenaarium toitekatkestuse simuleerimiseks Simulink keskkonnas

Toitekatkestuse simuleerimiseks lisati mudelisse toitepunkti järele lüliti. Võrk lahutati toitepunktist ajahetkel 0,3 sekundit, simulatsiooni kestuseks oli 0,6 sekundit. Mudelisse lisati ka täiendav mõõtepunkt B2, milles vaadeldi selle simulatsiooni pingeid.



Joonis 3.16 Toitekatkestuse simulatsiooni tulemused

Toitekatkestus on seisund, mil pinge liitumispunktis on alla 5% võrgu nimipingest ning jooniselt on näha, et simulatsioonis langes lülituse järel pinge 0 voldini, seega toimus simulatsiooni tulemusena võrgus katkestus.

3.4 Simulatsioonid pingeprobleemide lahendamiseks

Pingeprobleemide tuvastamiseks teostati nelja erineva kasutusjuhu simulatsioonid. Nüüd, kui kõik pingeprobleemid on simulatsioonide tulemusena saavutatud, tuleb võrku lisada aku, et näha, milline on selle mõju uuritavale pingeprobleemile. Aku ühendatakse võrguga paralleeltöösse ning selle mõju pingeprobleemidele analüüsitakse ainult pingete efektiivväärtuste graafikuid uurides. Igas akuga teostatud simulatsioonis oli aku 100% täis laetud olekus. Simulatsioone teostati pingemuhu, väreluse ja pingelohu juhul kolmel korral. Esimesel juhul oli aku ühendatud fiidri algusesse, teisel juhul fiidri keskele ning kolmandal korral fiidri lõppu, pingeprobleemi põhjustava elemendi juurde.

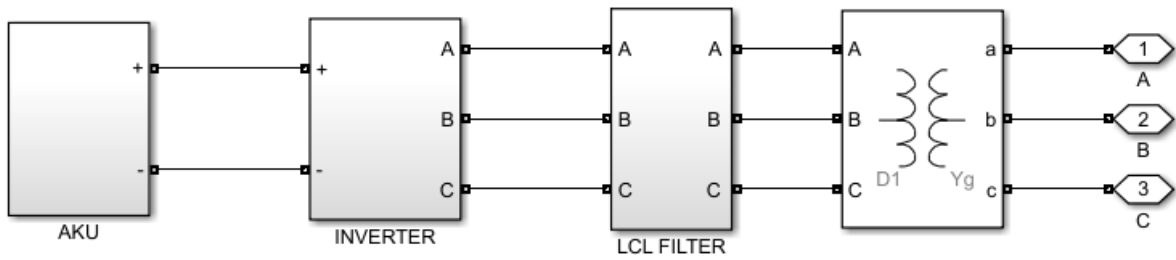
Akuenergiasalvesteid saab pingeprobleemide leevendamiseks kasutada, sest nad võimaldavad läbi alalisvoolulingi ja inverteri tekitada tüürpinget, mis aitab näiteks pingelohkusi kompenseerida. [30]

Mudelil kasutatakse Sungrow SBR256 akut. Tegemist on Hiina ettevõtte 2021 aastal müügile tulnud modulaarse SBR seeriaga, mis on eelkõige mõeldud kodukasutajatele optimeerimaks omatarbimist või toimimaks varutoiteallikana. Aku andmed on kantud tabelisse 3.3.

Tabel 3.3 Sungrow SBR256 aku andmed [31]

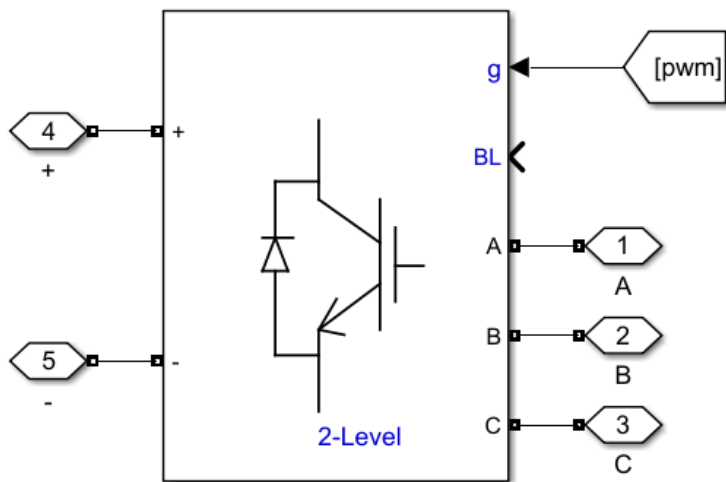
Aku tüüp	LiFePO4
Aku mahutavus	25,6 kWh
Nimipinge	512 V
Tööpinge	400-584 V
Nimivõimsus	15,36 kW
Maksimaalne laadimis- /tühjenemisvõimsus	17,52 kW
Maksimaalne laadimis- /tühjenemisvool	30 A
Mõõdud (L*K*S)	625*1195*330 mm
Kaal	279 kg
Paigaldusviis	Sise ja välispaigaldus (IP55)

Selline aku valiti mahtuvuse ja võimsuse järgi. Arvestati, et kuna näidisobjekti valgustite koguvõimsus on 3,75 kW, siis katkestuse korral oleks sellise akuga võimalik võrku toita peaaegu 7 tundi. Aku võimsus võimaldaks katkestuse ajal ka kommunaalvõrgu ristkasutust: näiteks oleks võimalik katkestuse ajal akult toita ka väiksemat, 11 kW võimsusega elektriauto laadijat [32].



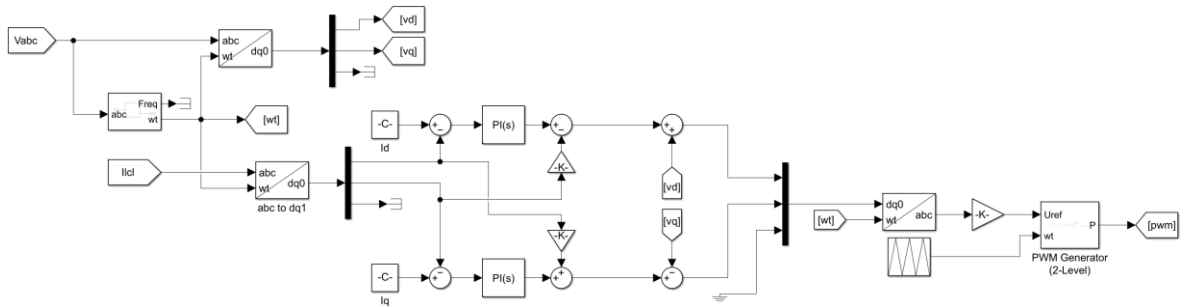
Joonis 3.17 Akuenergiasalvesti komponentide aseskeem

Aku võrguga ühendamiseks kasutati MathWorks File Exchange keskkonnast saadud lihtsa inverteri, kontrolleri ja filtri mudelit, mis on näidatud joonisel 3.17 [33]. Akuenergiasalvesti inverteri puhul sooviti kasutada olemasolevaid ressursse, kasutades juba koostatud inverteri ja filtri mudelit ning proovides seda näidisobjekti simulatsioonides kasutada. Akuenergiasalvesti aseskeem koosneb akust ja alalisvooluahelast, inverterist, LCL filtrist ning trafost.



Joonis 3.18 Inverteri skeem

Joonisel 3.18 olev „2-Level Converter“ on Simulink-i plokki, mis kirjeldab kolmefaasilist, kahetasandilist inverterit. See muundur on modelleeritud IGBT diodipaaridega, mida juhitakse PWM generaatori poolt (ühendatud „g“ klemmiga) tekitatud impulssidega ning selline mudel annab kõige täpsemad simulatsioonitulemused [34].



Joonis 3.19 Inverteri kontrolleri

Inverteri väljundpinge peab olema sünkroonis võrgu pingega. Sünkroniseerimiseks kasutati inverteri kontrolleri faasiluku meetodit (PLL). PLL-i kasutamine kolmefaasilistes ahelates on tänapäeval väga levinud. Selle meetodi puhul transformeeritakse kolmefaasiliste pingete D- ja Q-komponentide saamiseks abc süsteemist dq0 süsteem (Park'i transformaator). Kui inverter on võrguga paralleeltöösse ühendatud, toimib see joonisel 3.19 kirjeldatud juhtimismeetodi kaudu vooluallikana. Vooluallikana töötamiseks tuleb määrata konstantide I_d ja I_q väärtused, mida kasutatakse inverteri aktiiv- ja reaktiivvõimsuse seadistamiseks. Kuna inverteri väljundvõimsus on määratud konstantide kaudu, ei toimu ka selle automaatset reguleerimist. [35] [36] [37]

PWM signaali tekitamiseks kasutatakse Simulink-i PWM generaatori plokki. See plokki on mõeldud kasutamiseks kahetasandilise inverteriga ning see genereerib impulsse kasutades kahetasandilist topoloogiat. Referentssignaali, mida nimetatakse ka moduleerivaks signaaliks, võrreldakse sümmeetrilise kolmnurkse kandesignaali. Kui referentssignaali on suurem kui kandesignaali, on diodpaari ülemise lülitusseadme tüürimpulsi signaal kõrge ning alumise oma madal. [38]

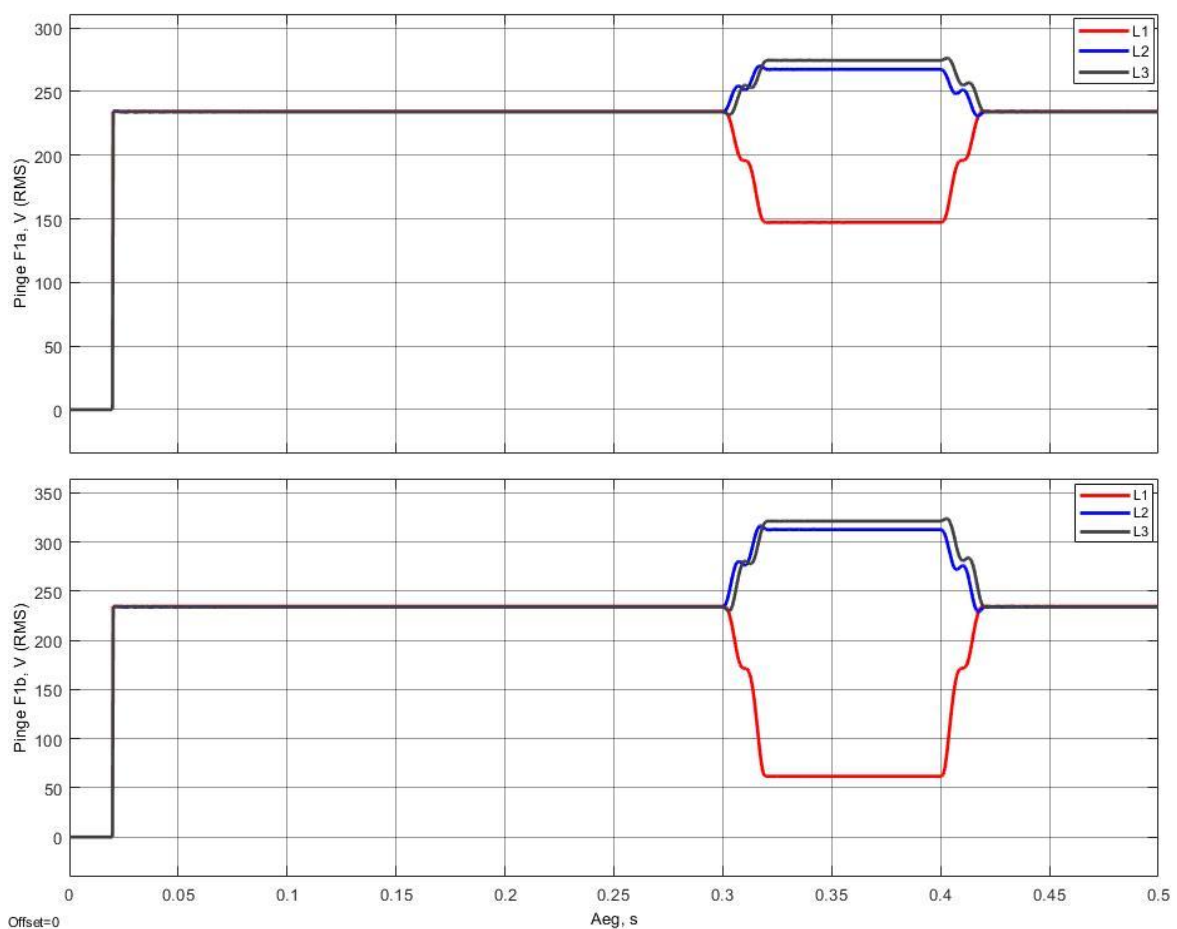
Kui võrgus plaanitakse kasutada inverterit, on vaja inverteri väljundi ja võrgu vahele ühendada LCL filter, mis aitab inverteri lülitussagedusest tekkivaid vooluharmonilisi moonutusi vähendada [39].

Eraldustrafo peamine roll on selles mudelis muunduri ahela ja võrgu galvaaniline eraldamine. Kuna muunduri ahel on kolmejuhtmeline ja neutraal selles puudub, siis trafo abiga saab sekundaarpoolele neljanda juhtme tekitada, sest trafo sekundaarmähisel on tähtlülitus ning neutraal maandatakse. Lisaks saab trafo ühe mähise ühendamisel tähte ja teise ühendamisel kolmnurka takistada kõrgemate harmooniliste levikut. [40]

3.4.1 Pingemuhk

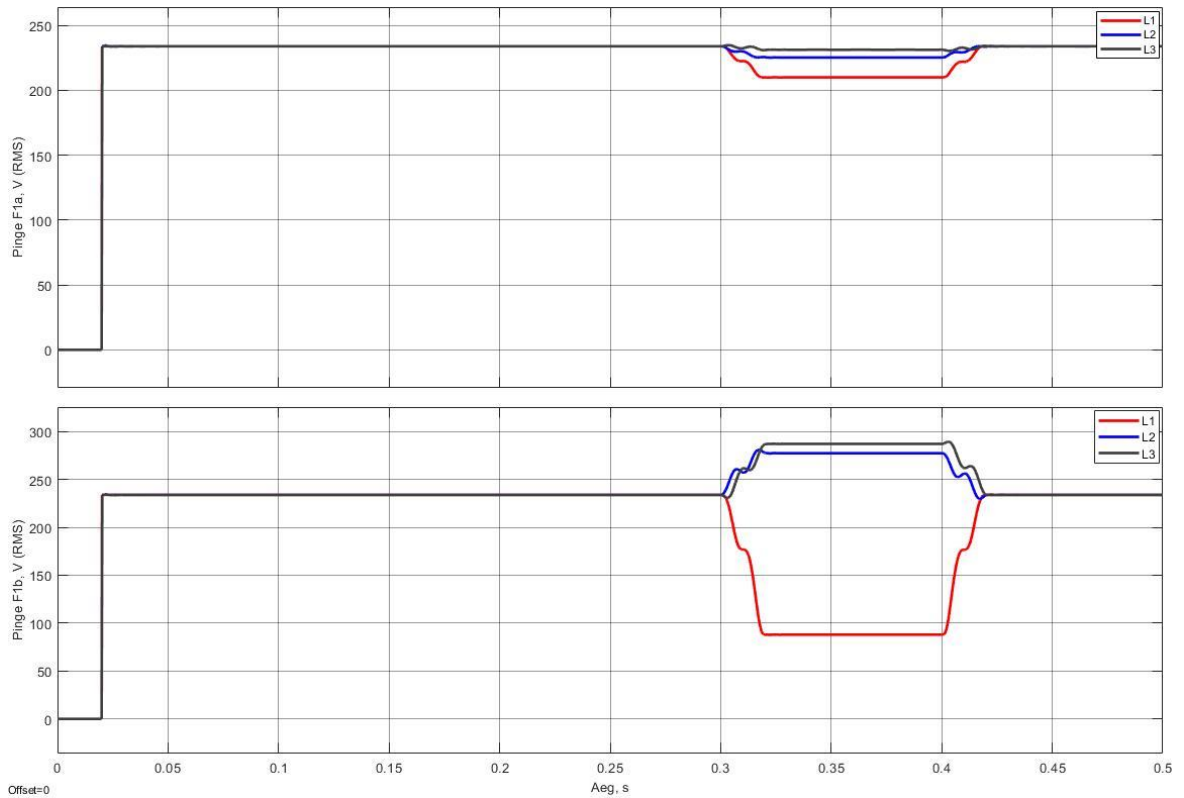
Pärast pingelohu tekitamist lisati mudelisse aku, et näha, millist mõju see fiidril toimuva lühise korral pingemuhule avaldab. Simulatsioonid akuga teostati samadel tingimustel nagu ilma akuta.

Simulatsioonide tulemustest on näha, et olukorras, mil aku oli ühendatud toitepunkti juurde, see pingeprobleemile suurt mõju ei avaldanud. Pingete väärtused olid peaaegu võrdsed ilma akuta simulatsiooni korral. Lühiseta faasides tõusis pinge väärtus veel kõrgemaks.



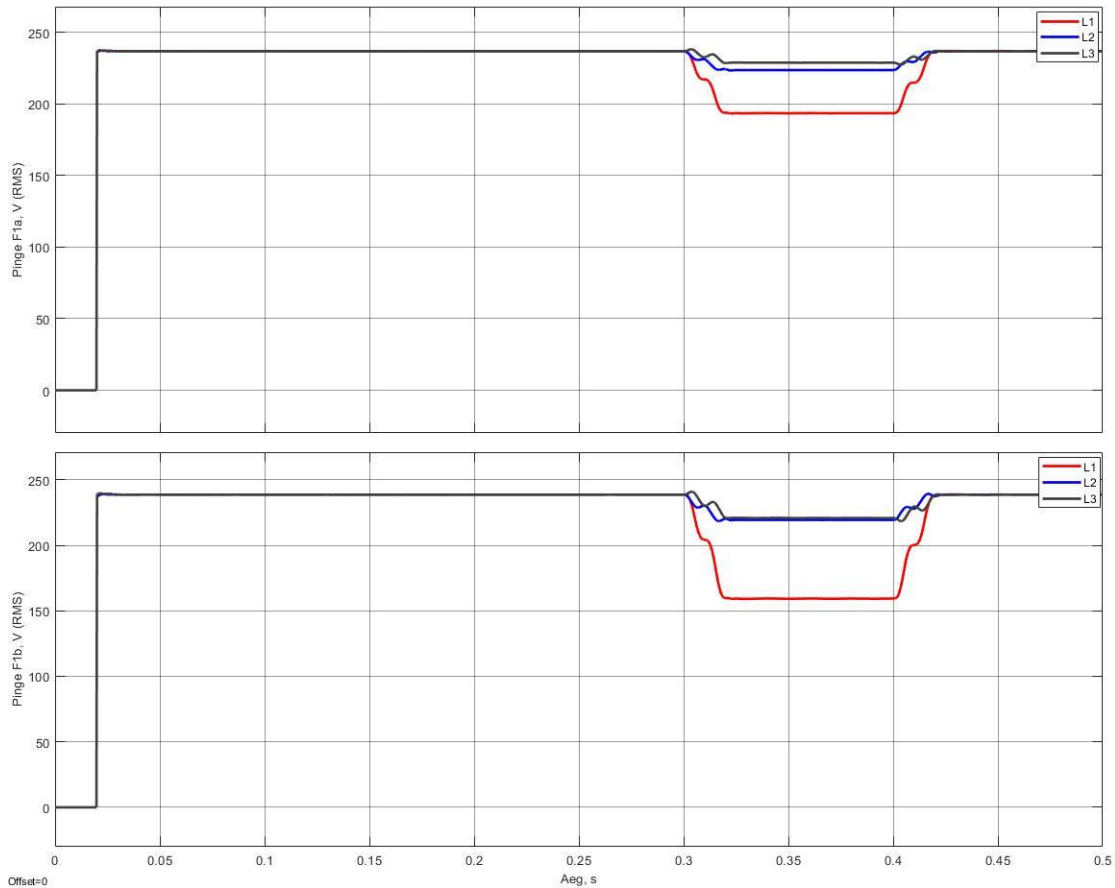
Joonis 3.20 Pingemuhu simulatsiooni tulemused - aku toitepunkti juures

Kui aku oli ühendatud fiidri keskele, siis esimeses mõõtepunktis oli pingeprobleem peaaegu kompenseeritud, pingemuhku enam ei tekkinud, kuid pingelohu väärtus oli väiksem kui pingelohu alguse lävepiir. Teises mõõtepunktis jäi pingeprobleem alles.



Joonis 3.21 Pingemuhu simulatsiooni tulemused – aku fiidri keskel

Olukorras, kui aku ühendati fiidri lõppu, suudeti pingemuhu tekkimist mõlemas mõõtepunktis vältida. Pingemuhu asemel faasides L2 ja L3 pinge hoopis langes, kuid mitte nii madalale, et tekiks pingelohk. Lühisega faasides jäi mõlemas mõõtepunktis pingelohk alles, kuid see ei olnud enam nii sügav, kui ilma akuta simulatsiooni korral.

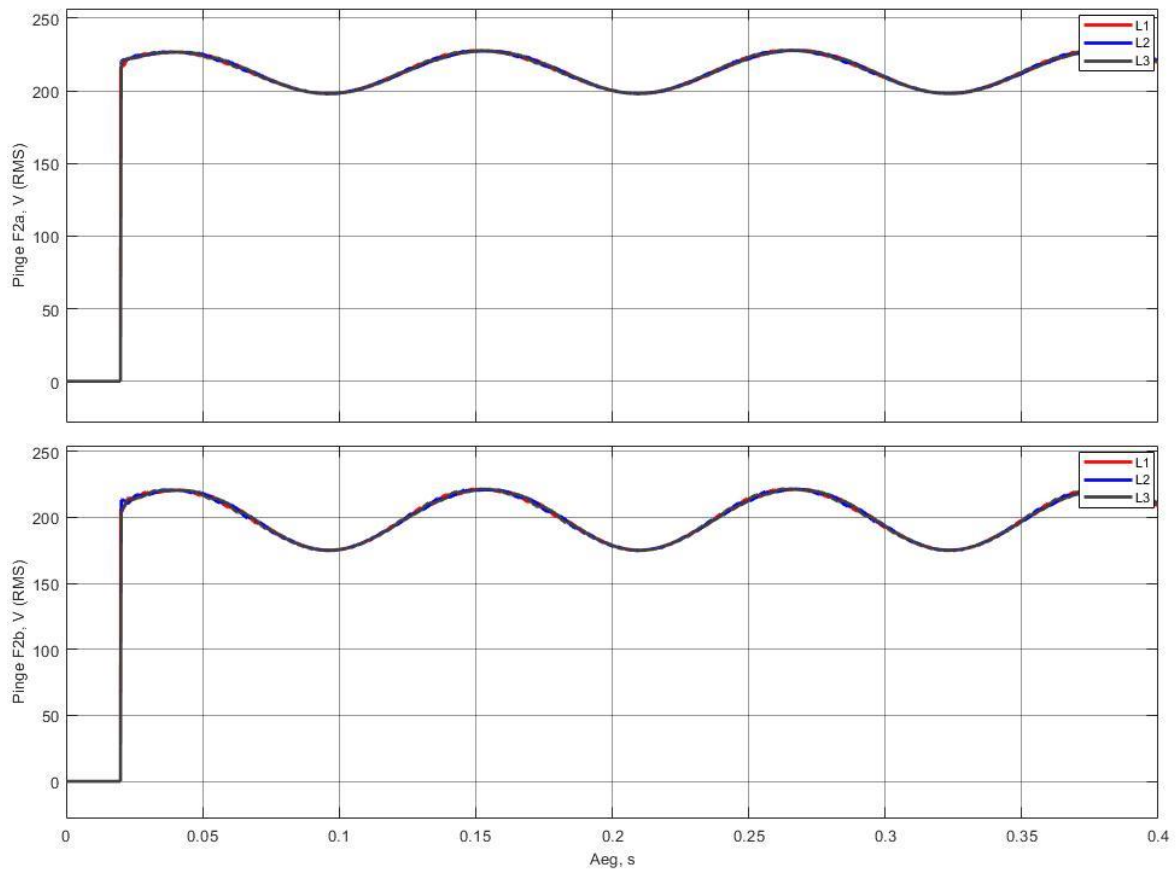


Joonis 3.22 Pingemuhu simulatsiooni tulemused – aku fiidri lõpus

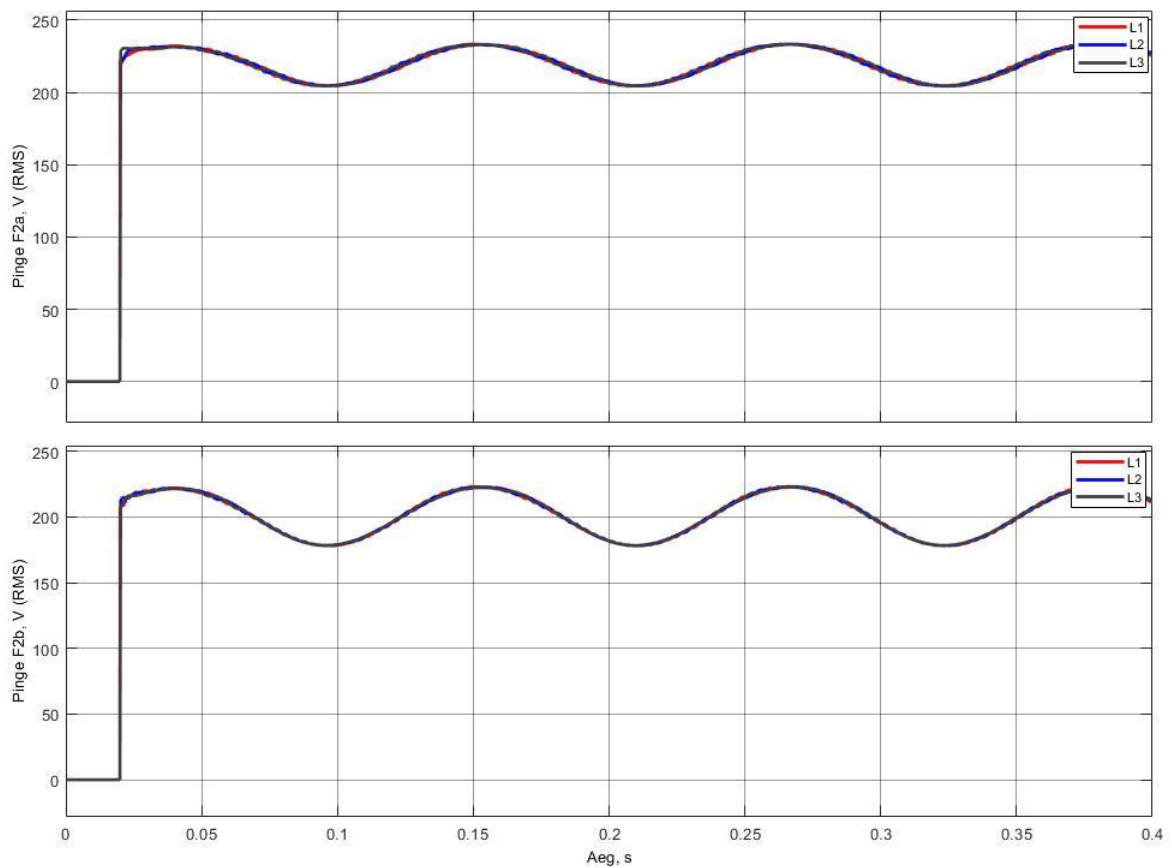
Simulatsiooni tulemuste põhjal on võimalik järeldada, et akuenergiasalvesti ja mudelis kirjeldatud juhtimisloogika abil saab efektiivselt pingemuhu mõju leevendada ning see mõju ulatub ka akuenergiasalvesti taha jäävale võrguosale. Lisaks selgub, et mida lähemale lühisekoha juurde on aku ühendatud, seda tõhusamalt see pingemuhku ja -lohku kompenseerib. Faasides, milles lühist ei toimunud, ei olnud pinged võrdsed selle tõttu, et koormused on ebasümmeetrilised.

3.4.2 Väreluse simulatsioon

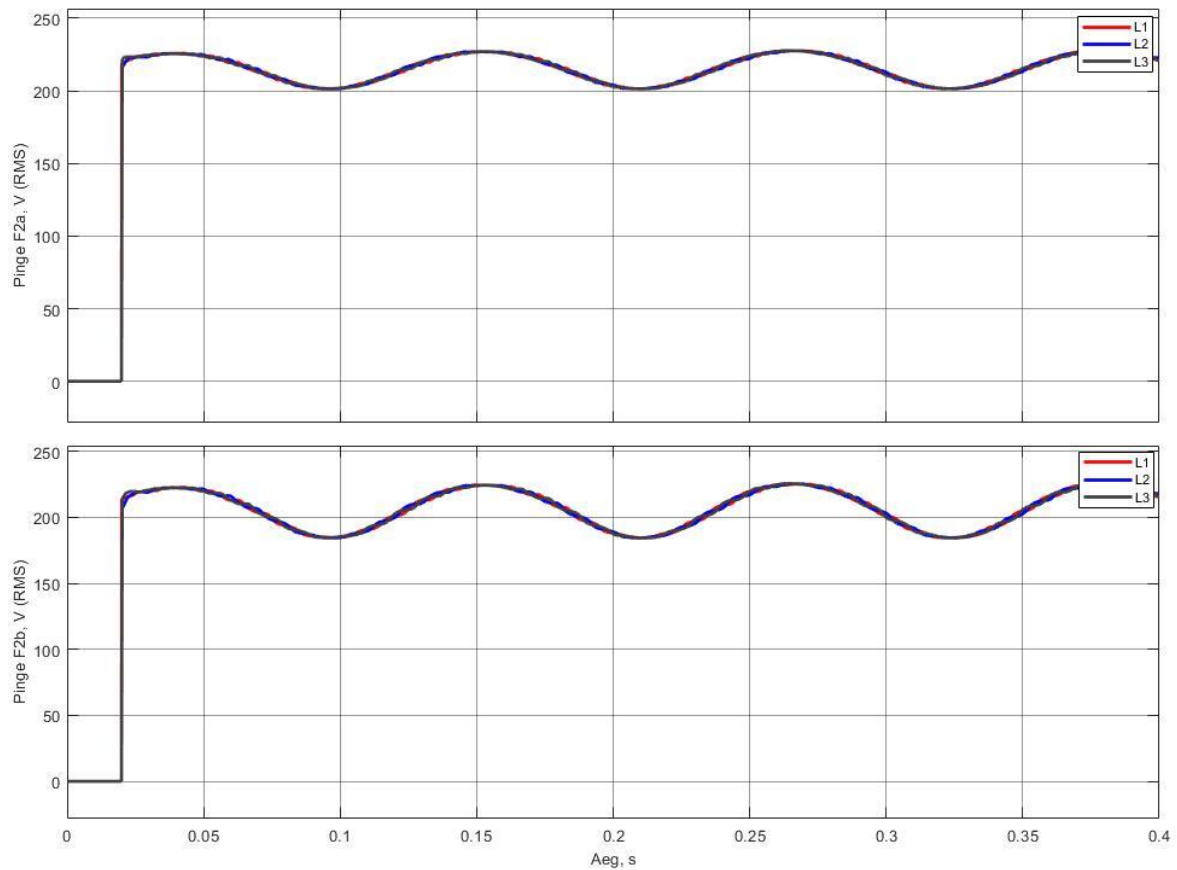
Järgmisena uuriti, milline on kasutatava inverteri ja aku mõju värelusele. Simulatsioone teostati kolmel erineval korral ning simulatsiooni kestuseks oli 0,4 sekundit, sest väreluse simulatsioonid akuga on Simulink-i jaoks väga ressursimahukad ning ühe simulatsiooni tegemine võtab väga kaua aega. Et simulatsioonile kuluvat aega lühendada, vähendati selle kestust.



Joonis 3.23 Väreluse simulatsiooni tulemused – aku fiidri alguses



Joonis 3.24 Väreluse simulatsiooni tulemused – aku fiidri keskel



Joonis 3.25 Väreluse simulatsiooni tulemused – aku fiidri lõpus

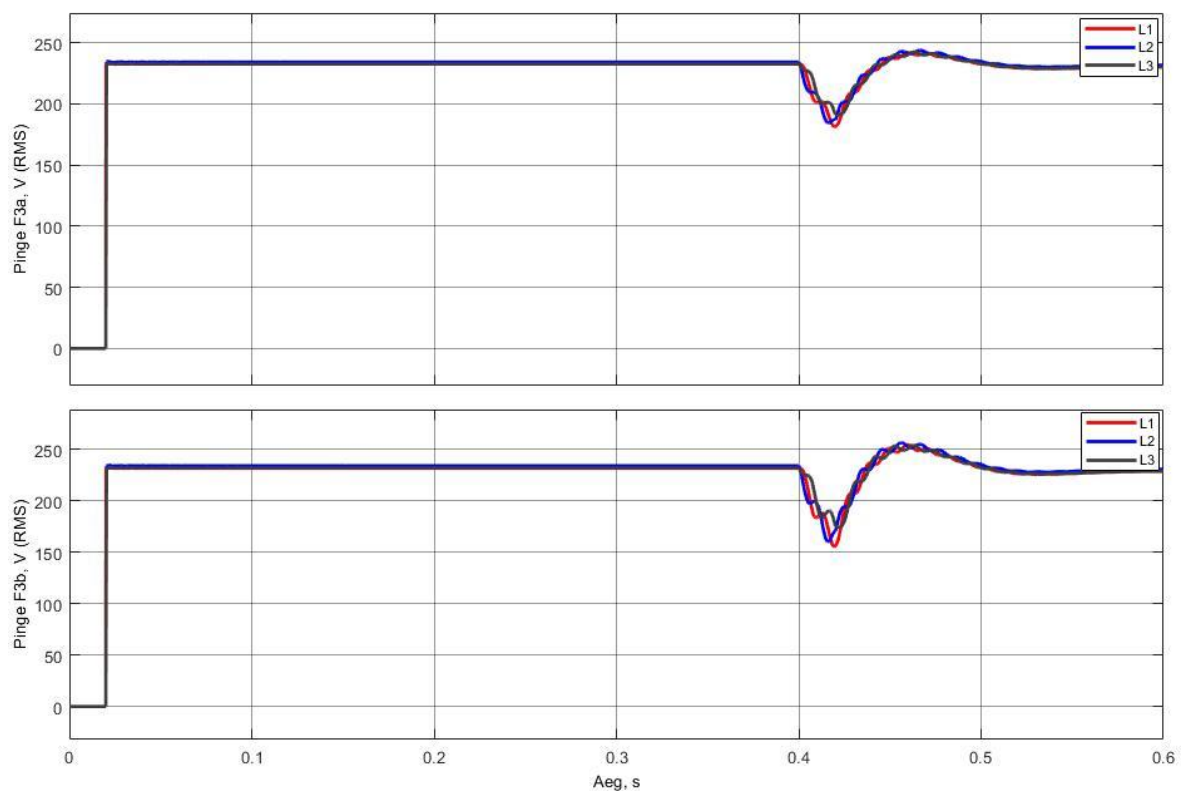
Tulemustest vaadates selgub, et aku kasutamisega ei õnnestu värelust vältida ega ka leevendada. Kui aku on ühendatud fiidri keskele, siis selle mõjul tõuseb esimeses mõõtepunktis pinge efektiivväärtuse alampiir mõne voldi võrra, ning kui see ühendatakse fiidri lõppu, siis pinge efektiivväärtuse alampiir tõuseb teises mõõtepunktis. Pinge võnkumise amplituud ja sagedus akuenergiasalvesti mõjul ei muutu.

Järelikult ei ole mudelis kasutatud akuenergiasalvestiga võimalik kaarahju poolt põhjustatud värelust kompenseerida ning energiasalvesti asukoht võrgus ei avalda värelusele mõju. Üks põhjustest võib olla, et inverteris kasutatud juhtimisloogika ei sobi sellise pingeprobleemi kompenseerimiseks. Väreluse mõju leevendamiseks tuleks uurida alternatiivseid võimalusi ja proovida kasutada muud inverteri baasil lahendust.

3.4.3 Pingelohu simulatsioon

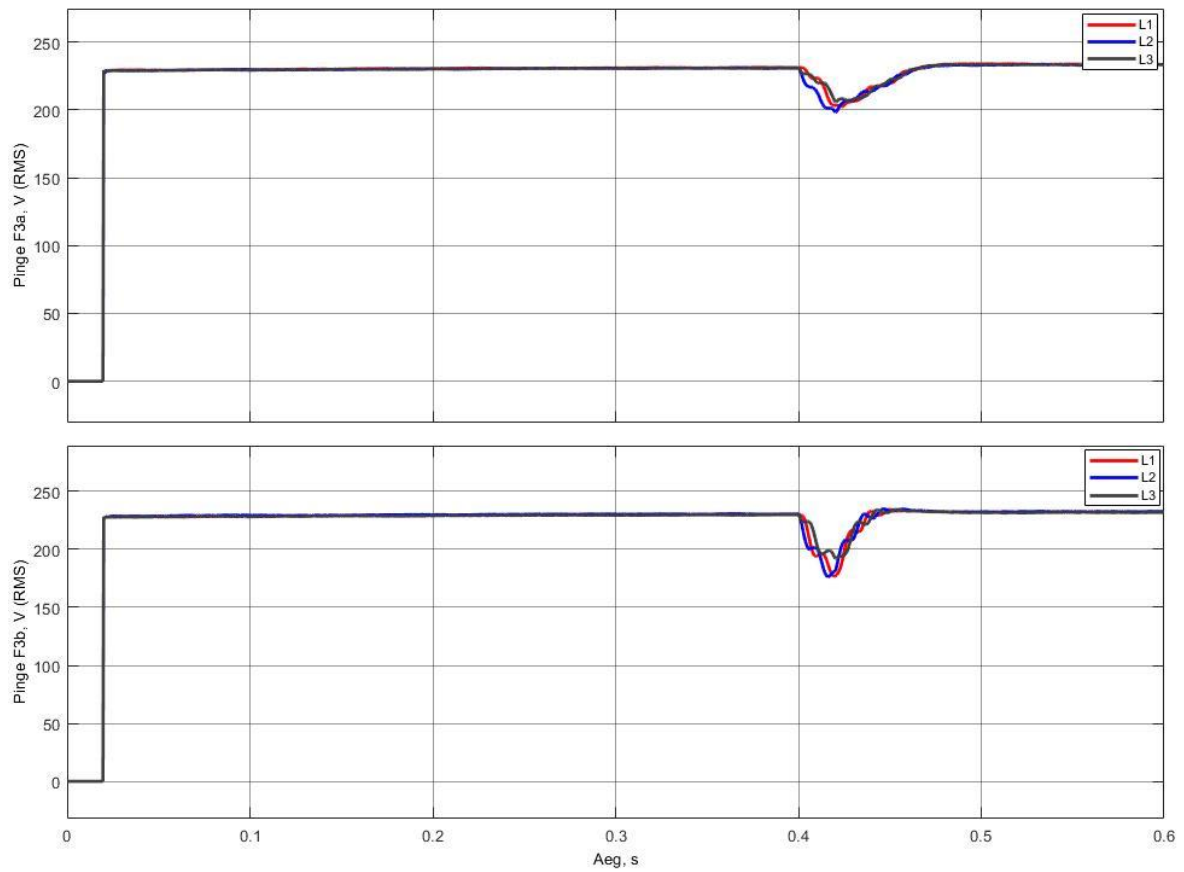
Uurimaks, kas asünkroonmasina käivitamisest põhjustatud pingelohku on võimalik vältida või leevendada, lisati mudelisse aku. Simulatsioonid teostati samadel tingimustel nagu ilma akuta ning pingeid vaadeldi mõõtepunktides F3a ja F3b.

Simulatsioonide tulemusi vaadates on näha, et sarnaselt pingemuhu tulemustele, ei suuda võrguga ühendatud akuenergiasalvesti pingelohku kompenseerida, kui see asub fiidri alguses. Pingelohk oli mõlemas mõõtepunktis peaaegu sama sügav kui ilma akuta simulatsioonide korral. Fiidri lõpus asuvas mõõtepunktis, kuhu oli asünkroonmasin ühendatud, tõusis pinge väärtus pingelohu järgselt 250 voldini.



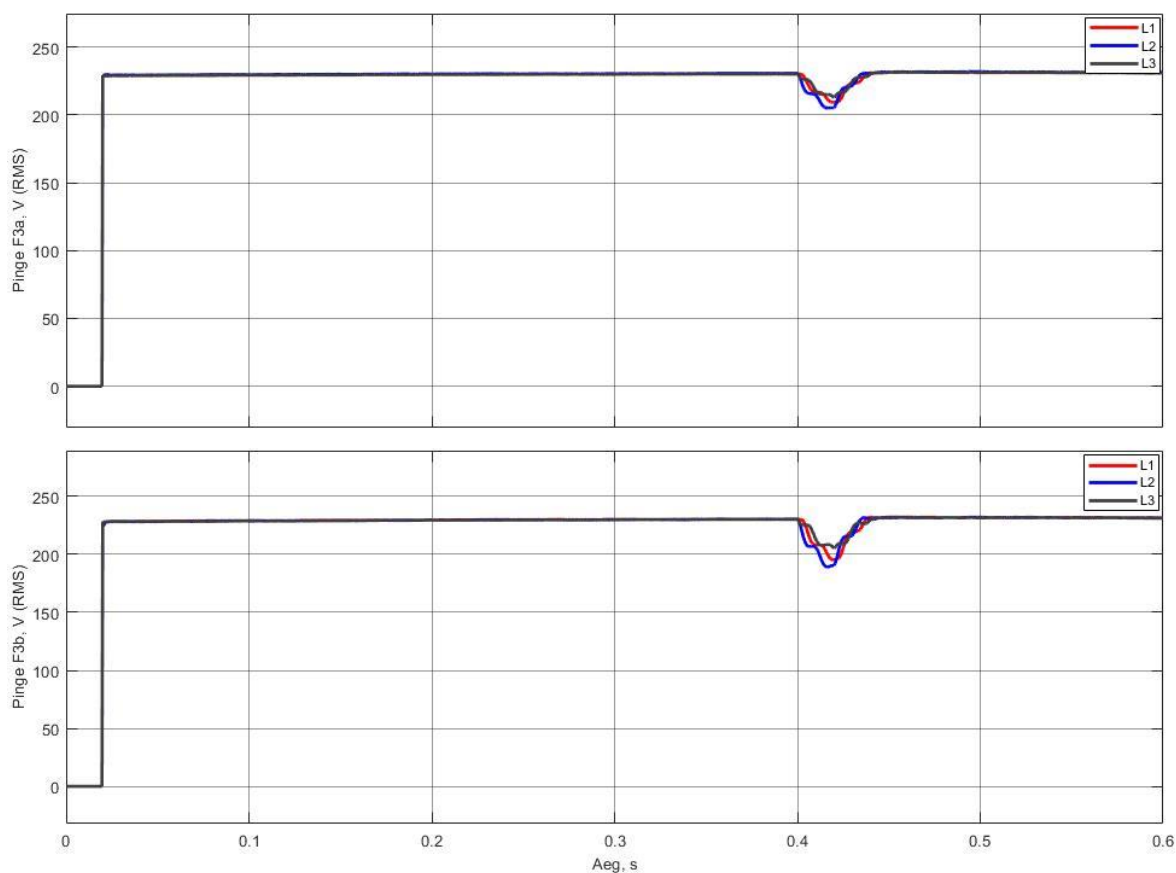
Joonis 3.26 Pingelohu simulatsiooni tulemused - aku toitepunkti juures

Kui aku oli ühendatud fiidri keskele, siis pingelohu sügavus mõlemas mõõtepunktis vähenes ning teises mõõtepunktis ei tekkinud enam lohule järgnevat pingetõusu: pärast pingelohu lõppu pinge stabiliseerus 230 voldi juures.



Joonis 3.27 Pingelohu simulatsiooni tulemused – aku fiidri keskel

Viimasel juhul, kui aku ühendati fiidri lõppu, siis pingelohu sügavus mõlemas mõõtepunktis vähenes veelgi, kuid pinge langes siiski alla 207 voldi, mis on pingelohu alguse lävepiiriks.



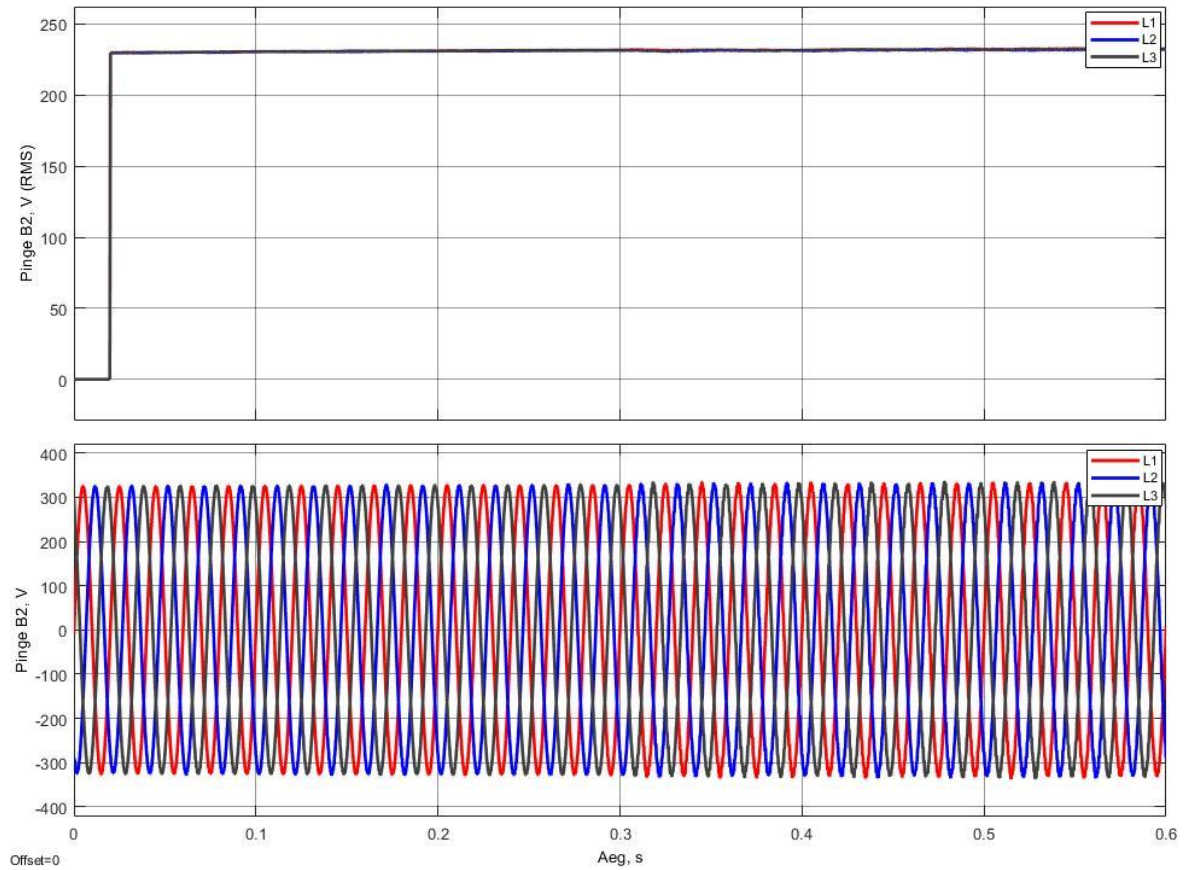
Joonis 3.28 Pingelohu simulatsiooni tulemused – aku fiidri lõpus

Seega ei ole mudelis kasutatud aku ja muunduriga võimalik 15 kW võimsusega asünkroonmasina käivitamisest põhjustatud pingelohku vältida. Selgus, et mida lähemale on pingelohku põhjustavale elemendile aku ühendatud, seda rohkem on võimalik selle mõju leevendada. Pingelohu vältimiseks akuenergiasalvesti abil tuleks tõenäoliselt samuti kasutada mõnda alternatiivset inverteri baasil lahendust.

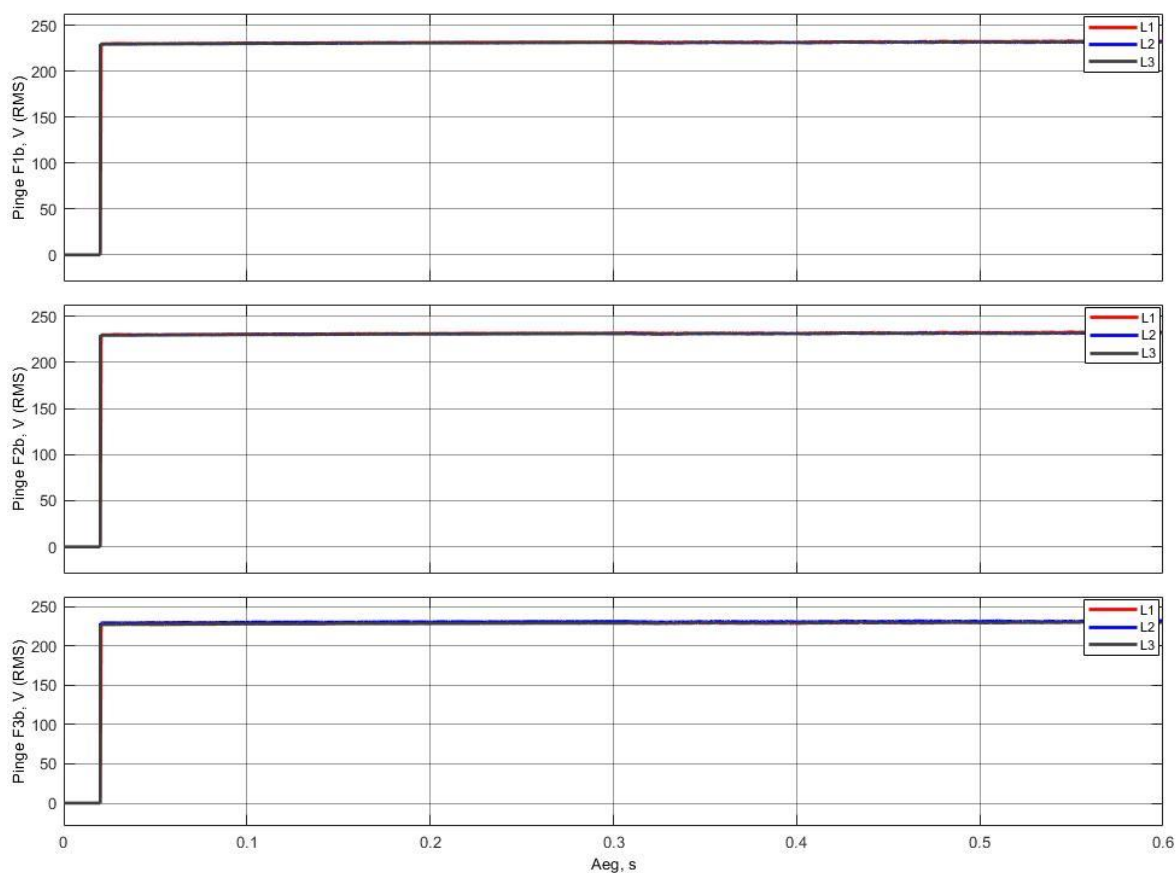
3.4.4 Toitekatkestuse simulatsioon

Pärast toitekatkestuse simulatsiooni ühendati võrguga aku, et näha, kas põhitoite kadumisel suudab aku terve võrgu kvaliteetse pingega ära toita. Aku ühendati võrgu toitepunkti juurde, lülitati järele. Selles simulatsioonis vaadeldi võrgu pinget joonisel 3.15 näidatud mõõtepunktis B2 ning iga fiidri viimases mõõtepunktis. Lülitus toimus ajahetkel 0,3 sekundit ning simulatsiooni kestuseks oli 0,6 sekundit. Et inverter jääks võrgu pingega sünkroniseerituks ka pärast toiteallika lahutamist, jäeti mudeli lihtsuse mõttes allika pingete mõõtesignaali sünkroniseerimise jaoks ka pärast selle võrgust lahutamist alles.

Toitekatkestuse tulemustest joonistel 3.29 ja 3.30 on näha, et aku suudab võrku pärast allika välja lülitamist toitma jääda ning lülituse järel ei teki ühtegi täiendavat pingeprobleemi, pinge püsib iga fiidri lõpus 230 voldi juures ning selle lainekuju ei muutu.



Joonis 3.29 Toitekatkestuse simulatsiooni tulemused – aku toitepunkti juures



Joonis 3.30 Toitekatkestuse simulatsiooni tulemused – aku toitepunkti juures

Modelleeritud võrgu näitel saab järeldada, et aku on koormusi arvesse võttes õigesti dimensioneeritud ning inverter jäi võrguga sünkroniseerituks, sest lülituse järel häiringuid ei tekkinud. Seega on rikkeliste või plaaniliste katkestuste ajal õigesti dimensioneeritud akuenergiasalvesteid ja muundureid kasutades võimalik tarbijatele tagada katkematu toide.

3.5 Järeldused simulatsioonide tulemustest

Võttes arvesse simulatsioonide tulemusi, võib väita, et mudelis kasutatud lihtsa juhtimismeetodiga energiasalvestussüsteem sobib ainult teatud tüüpi pingeprobleemide lahendamiseks.

Sellega oli võimalik leevendada pingemuhu tekkimist ühefaasilise lühise korral ning katkestuse ajal tagada võrgule katkematu toide. Pingemuhu kompenseerimise tulemus sõltub akuenergiasalvesti asukohast võrgus. Simulatsioonide tulemusena selgus, et pingemuhu tekkimist suudeti kõige rohkem leevendada siis, kui aku asus lühisekoha lähedal.

Toitekatkestuse korral on oluline, et aku oleks õigesti dimensioneeritud ning inverter võrguga sünkroniseeritud, et toiteallika kadumisel ei tekiks täiendavaid pingeprobleeme.

Pingelohku asünkroonmasina käivitusega simuleerides, olenemata aku asukohast, ei õnnestunud vältida. Selgus, et mida lähemale pingeprobleemi põhjustavale elemendile oli aku ühendatud, seda väiksem oli pingelohu sügavus.

Olenemata aku asukohast võrgus, ei olnud mudelis kasutatud energiasalvestiga võimalik varelust vältida ega leevendada. Et välja selgitada, kas akuenergiasalvestitega on võimalik pingelohkusi ja varelust kompenseerida või veelgi vähendada ühefaasilise lühise mõju, tuleks uurida alternatiivseid võimalusi ja proovida kasutada keerukamaid ja rohkemate juhtimisvõimalustega inverteri baasil lahendusi.

4. MAJANDUSLIKU MÕJU ANALÜÜS

Kuigi energiasalvesti kasutamine aitab mõningaid pingeprobleeme vältida või leevendada, tuleb ka uurida, kas selle kasutamine pingeprobleemide vältimiseks oleks ka majanduslikult mõistlik, hinnates seda tasuvusaja kaudu. Selleks on vaja uurida, milliseid süsteeme turul pakutakse ja missugune on nende funktsionaalsus ning maksumus. Seejärel tuleb anda ligikaudne hinnang, milline on ühe pingeprobleemi kulu tarbijale. Selle põhjal on võimalik leida, kas ja kui pika aja vältel muutub energiasalvestussüsteemi soetamine majanduslikult tasuvaks.

4.1 Energiasalvestussüsteemid ning majanduslik teave

Energiasalvestite valik on tänapäeval väga mitmekülgne. Võimalik on valida vajadustele vastav inverter ning lisada sellesse akuenergiasalvesti või energiasalvestussüsteemi täislahendus, kuhu on energiasalvesti, muundur, kontrollid jm vajalik juba integreeritud. Üldisemalt on invertereid otstarbe järgi võimalik jagada kolme suure gruppi: päikesepaneelidega kasutatavad inverterid, akudega kasutatavad inverterid ning hübriidinverterid, mida on võimalik kasutada paralleelselt nii päikesepaneelide kui ka energiasalvestitega.

Olenevalt energiasalvestussüsteemist, võib sellel võrguga ühendatuna olles mitmeid kasulikke funktsioone, näiteks:

- Sageduse reguleerimine;
- Toitekatkestuse tuvastamine ja saartalitlusele lülitumine;
- Tipukoormuse katmine ja liitumispunkti läbilaskevõime suurendamine;
- Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse juhtimine;
- Energia arbitraaž;
- Süsteemi taaspingestamine ehk nullist käivitamine;
- Harmooniliste moonutuste vähendamine. [41]

Sageduse reguleerimise võimekusega energiasalvestussüsteem reguleerib oma väljundvõimsust automaatselt mõõdetud võrgusageduse alusel: kui sagedus on nimiväärtusest madalam, suunab see energiat võrku, ning kui sagedus on nimiväärtusest kõrgem, siis tarbib see energiat. Toitekatkestuse tuvastamine ja saartalitlusele lülitumine tähendab, et kui võrgu poolt toide katkeb, suudab energiasalvestussüsteem lülituda katkestuse tekkimiseta saartalitlusele ning iseseisvalt

võrku edasi toita seni, kuni energiasalvesti on tühjenenud. Vahel võib juhtuda, et katkestuse korral on vaja süsteemi nullist käivitada ilma välise võrgu toeta. Sellised olukorrad võivad tekkida siis, kui ei toimu sujuvat üleminekut võrguga ühendatud režiimilt saartalitlusele. Nullist käivitamine on keeruline ning sellele tuleb pöörata erilist tähelepanu. Energiasalvestussüsteem, millel on nullist käivitamise funktsioon, peab taaspingestamisel suutma korraga tagada kõikide võrgus olevate seadmete käivitamishetke suure võimsusvajaduse. Tipukoormuse katmine aitab kokku hoida elektrikuludelt ja võrgutasudelt või võimaldab tarbimisel kasutada suuremat võimsust, kui liitumislepingus ette nähtud. Kuna elektri hinnad on ühe päeva võrra ette teada, on energiasalvestite abil võimalik elektrit osta just siis, kui see on päeva jooksul kõige odavam ning salvestatud energiat kõrgema hinnaga tundidel kasutada või müüa – seda nimetatakse energia arbitraažiks. Mõnedel energiasalvestussüsteemidel on ka võimekus lisaks aktiivvõimsuse juhtimisele teostada reaktiivvõimsuse juhtimist. See võimaldab energiasalvestussüsteemil pakkuda võrgule reaktiivvõimsuse tuge ja koormuste võimsusteguri juhtimist. Energiasalvestite inverterit saab juhtida ka võrgu harmooniliste moonutuste vähendamiseks. [42] [43] [44]

Alljärgnevalt tuuakse välja kolm erinevat energiasalvesti lahendust ning nende funktsionaalsus. Seadmeid, millel oli kirjelduses konkreetselt välja toodud, et neil on olemas erinevate pingeprobleemide kompenseerimise funktsionaalsus ja võimekus, leidis väga vähe ning ükski neist seadmetest ei olnud mõeldud kodukasutajatele, vaid pigem kommerts- ja tööstustarbijatele.



Joonis 4.1 Tesla Powerpack [45]

Esimene toode on tuntud ettevõtte Tesla poolt valmistatud Powerpack. See on loodud eelkõige kommertstarbijatele ning pakub paindlikumat kontrolli energiatarbimise üle ning suurendab kliendi elektrivõrgu töökindlust. Tesla Powerpack on

energiasalvestussüsteemi täislahendus, mis koosneb liitiumioonakudest, kahesuunalisest inverterist, kontrollierist, erinevatest anduritest ja tarkvarast. [45]

Funktsioonid:

- Tipukoormuse katmine;
- Tarbimise nihutamine;
- Saartalitlusvõime ja võrgu toitmine akult;
- Energia arbitraaž;
- Elektrivõrgu toetamine (sageduse reguleerimine, aktiiv- ja reaktiivvõimsuse juhtimine);
- Taastuvate energiaallikate integreerimine. [45]

Vastavalt turule, on seda võimalik seadistada töötama 50 Hz ja 60 Hz võrgusagedusega, selle väljundpinge on kolmeefaasiline ning seda on võimalik tellida võimsusega vahemikus 50 kW – 500 kW ning mahtuvustega vahemikus 95 kWh, 190 kWh, 475 kWh ja 950 kWh [45].



Joonis 4.2 ABB eStorage Flex 10 [46]

Teise tootena saab välja tuua ABB eStorage Flex 10, mis tagab investeeringu kiirema ära tasumise lihtsama ning kiirema paigaldusega ning odavamate transpordikuludega. See on kompaktne ja täielikult integreeritud süsteem, mis sisaldab liitiumioonakusid, toitemuunduri ahelat, eraldustrafot, kaitseseadmeid, jahutust ning juhtimist, sh. ABB tarkvara eStorage OS. Kasulikematest funktsioonidest saab välja tuua tipukoormuse katmise, saartalitlusvõime, energia arbitraaži, elektrivõrgu toetamise aktiiv- ja reaktiivvõimsuse reguleerimise või sageduse juhtimise teel ning nullist käivitamise. Seda toodet on saadaval võimsusega 80 kW või 160 kW ning mahtuvusega 95 kWh,

190 kWh või 240 kWh. Selle seadme väljundpinge on kolmefaasiline ja 400 V, sagedus on 50 Hz ning võimsusteguri reguleerimine toimub vahemikust 0-st 1-ni. [46]



Joonis 4.3 XOLTA BAT-79 [47]

Viimasena võib tutvustada toodet XOLTA BAT-79. See on väike ja modulaarne energiasalvestussüsteem, mis sobib ideaalselt väiksematele kommerts- ja tööstustarbijatele või suurtele hoonetele. Ka selle toote puhul on tegu täielikult integreeritud süsteemiga, mis sisaldab kõiki energiasalvestussüsteemi vajalikke komponente. Tänu modulaarsusele, saab mitu seadet kokku ühendada ning salvesti mahtuvust ja võimsust suurendada. Ühe mooduli võimsus on 80 kW ja selle mahtuvus on 79 kWh ning seadet on võimalik kasutada kolmefaasilises 400 V nimipingega elektrivõrgus. Salvestina kasutatakse liitiumioonakusid ning selle süsteemi olulisemateks funktsioonideks on energia arbitraaž, tipukoormuse katmine, sageduse ja pinge reguleerimine, harmooniliste vähendamine ja saartalitlusel töötamine. Lisaks on see tootja ainus, kes annab garantii, et 10 aastaga möödudes on alles 70% aku mahtuvusest. [47] [48]

4.2 Pingeprobleemide majanduslik mõju

Elektrienergia kvaliteet katkematu toide on ääriselt kriitiline. Aja jooksul on elektriseadmed ja -masinad erinevate pingeprobleemide suhtes palju tundlikumaks muutunud ning kui näiteks pingelohk või toitekatkestus põhjustab tootmises seisaku,

toob see kaasa kulukad tootmiskaod ja halvemal juhul põhjustab ka seadmete kahjustumise ja nende täiendava hoolduse. Pika- ja lühiajalised katkestused ning pingelohud on tarbija jaoks kõige kulukamad pingeprobleemid. [49]

Kuna ülaltoodud energiasalvestussüsteemid on mõeldud kasutamiseks eelkõige kommerts- ja tööstustarbijatele ning elektrikvaliteedil on suur äriline mõju, analüüsitakse toitekatkestuse aastast rahalist kulu tööstustarbija vaates.

Võrguettevõtted kasutavad võrgu töökindluse kirjeldamiseks erinevaid indekseid. Katkestuste kestuse kirjeldamiseks mingi ajaperioodi vältel kasutavad võrguettevõtted IEEE loodud SAIDI indeksit. SAIDI väärtus näitab, kui pikalt peab üks klient keskmiselt mingi ajaperioodi vältel katkestust taluma. Eesti Elektrilevi hallatavas jaotusvõrgus oli 2021. aastal rikkeline SAIDI väärtus 167,8 ning plaanilise SAIDI väärtus 57,7. Kui need väärtused omavahel liita, saadakse, et kõik katkestused keetsid 2021. aasta jooksul ühe kliendi jaoks kokku keskmiselt 225,5 minutit ehk 3,8 tundi. [50] [51]

2013. aastal Aalto Ülikoolis tehtud uurimistöös leiti, kui suur kulu erinevates tööstussektorites tipuvõimsuse kohta rikkeline ja plaanilise katkestuse korral tekib. Uuringu tulemused on kantud tabelitesse 4.1 ja 4.2. [52]

Tabel 4.1 Erinevate tööstussektorite kulud tipuvõimsuse kohta rikkeline katkestuse korral, €/kW [52]

Sektor	15 min	1 h	4 h	8 h	12 h
Toiduainetööstus	5,81	25,34	41	96,15	143,64
Metallitööstus	12,68	33,37	87,5	164,9	198,13
Paberitööstus	11,7	28,09	124,44	176,72	272,97
Keemiatööstus	3,62	20,85	41,01	92,42	118,18
Klaasitööstus	27,65	48,94	197,16	221,74	251,47
Puidutööstus	6,67	15,4	67,87	131,75	165,17
Ehitustööstus	15,85	53,84	145,92	284,12	346,48
Elektritööstus	8,67	20,05	49,18	96,4	109,33

Tabel 4.2 Erinevate tööstussektorite kulud tipuvõimsuse kohta plaanilise katkestuse korral, €/kW [52]

Sektor	15 min	1 h	4 h	8 h	12 h
Toiduainetööstus	5,23	9,64	21,7	71,81	133,16
Metallitööstus	5,15	18,33	56,05	95,34	123,78
Paberitööstus	9,34	24,4	102,04	160,97	246,39
Keemiatööstus	3,26	16,77	20,28	39,69	46,61
Klaasitööstus	3,72	7,3	27,07	45,09	103,36
Puidutööstus	5,9	7,29	26,56	86,04	115,56
Ehitustööstus	12,1	40,89	124,35	260,86	292,48
Elektritööstus	3,93	9,07	22,76	49,57	61,99

Kuna majandusliku mõju hindamiseks puuduvad mõne konkreetse tööstusettevõtte tarbimisandmed, saab nende asemel kasutada erinevaid koormusgraafikuid, kus tipuvõimsus on välja toodud tunni kaupa. Et leida, kui suur on hinnanguline katkestuse kulu Eesti SAIDI väärtuse järgi, kasutatakse selleks ühe keskmise tarbimisega metallitööstusettevõtte koormusgraafikut.

Tabel 4.3 Metallitööstusettevõtte koormusgraafik – 24h [53]

Tund	1	2	3	4	5	6	7	8
Võimsus, kW	27,4	28,6	27,4	28,6	27,4	28,6	27,4	28,6
Tund	9	10	11	12	13	14	15	16
Võimsus, kW	106,6	115,3	125,7	126,4	112,7	113,7	124,5	125,9
Tund	17	18	19	20	21	22	23	24
Võimsus, kW	35,4	28,6	27,4	28,6	27,4	28,6	27,4	28,6

Kuna Aalto Ülikoolis tehtud uurimistöös leiti, et katkestuse kulu ei ole võrdeline katkestuste kestustega, analüüsitakse katkestuse kulu leidmiseks kolme erinevat stsenaariumit:

- 1. stsenaarium: aasta jooksul toimub kolm 1 tunnist rikkelist katkestust ning üks ca 1 tunnine plaaniline katkestus;
- 2. stsenaarium: aasta jooksul toimub neli 15 minutulist ja kaks 1 tunnist rikkelist katkestust ning üks ca 1 tunnine plaaniline katkestus;
- 3. stsenaarium: aasta jooksul toimub 12 15 minutulist rikkelist katkestust ning neli 15 minutulist plaanilist katkestust.

Katkestuste kulud tuleb leida tabelite 4.1 ja 4.2 andmete põhjal. Kuna Aalto Ülikooli uuring toimus 9 aastat tagasi, tuleb arvesse võtta ka inflatsiooni. Eurotsooni keskmine

inflatsioonimäär aastate 2013 ja 2022 vahelisel perioodil oli 1,16 [54]. Esimese stsenaariumi korral tuleb kõigepealt leida rikkelite katkestuste kulu, ehk:

$$C_{riike} = P_{tund} * C_P * r \quad (4.1)$$

Kus P_{tund} – 1 tunni tipuvõimsus, kW
 C_{riike} – rikkelse katkestuse maksumus, €
 C_P – kulu tipuvõimsuse kohta, €/kW
 r - inflatsioonimäär

Plaanilise katkestuse kulu leitakse sarnaselt valemile 4.1:

$$C_{plaan} = P_{tund} * C_P * r \quad (4.2)$$

Kus P_{tund} – 1 tunni tipuvõimsus, kW
 C_{plaan} – plaanilise katkestuse maksumus, €
 C_P – kulu tipuvõimsuse kohta, €/kW
 r - inflatsioonimäär

Summaarse kulu leidmiseks tuleb liita rikkelite ja plaaniliste katkestuse kulud:

$$C_{katkestus} = C_{riike} + C_{plaan} \quad (4.3)$$

Kus $C_{katkestus}$ – katkestuste summaarne maksumus, €
 C_{riike} – rikkelse katkestuse maksumus, €
 C_{plaan} – plaanilise katkestuse maksumus, €

Esimese stsenaariumi rikkelse katkestuse kulu leidmiseks kasutatakse kolme kõige suurema võimsusega tundi: 11, 12 ja 16. Plaanilise katkestuse kulu leitakse 15-nda tunni järgi. Teise stsenaariumi korral eeldatakse, et rikkelised katkestused toimuvad tööajal. 15 minutilised katkestused toimuvad tundidel 13 ja 15 ning 1 tunnised katkestused leidsid aset 14-ndal ja 16-ndal tunnil. Plaaniline katkestus toimus 10-ndal tunnil. Kolmanda stsenaariumi puhul oletatakse, et rikkelised katkestused toimuvad vahemikus 9-12, igas tunnis 3 katkestust, ning neli plaanilist katkestust toimuvad tundidel 9 ja 14.

Lisaks katkestustele võivad ettevõtetele kulusid põhjustada ka teised pingeprobleemid, näiteks transientliigpinged ja pingelohud. Selliste pingeprobleemide majanduslikku

mõju on keeruline analüüsida, sest ilma konkreetseid mõõtmisi teostamata, nende esinemissageduse kohta üldjuhul info puudub. Leonardo Energy poolt 2007. aastal tehtud uuringus selgub, et ühe pingelohu sündmuse maksumus võib olla vahemikus 2000 – 4000 € [55].

Oletades, et näidisenäidena toodud tööstusettevõttes toimub aasta jooksul lisaks katkestustele ka kuus sügavat pingelohku, võib nende kulu liita katkestuste kuludele. Ühe pingelohu keskmiseks maksumuseks võib arvestada 3000 €. Kuna pingelohu kulu selgus 2007. aastal tehtud uuringus, tuleb ka selle maksumus korrutada inflatsioonimääraga. Eurotsooni keskmine inflatsioonimäär aastate 2007 ja 2022 vahelisel perioodil oli 1,306 [54]. Seega on ühe pingelohu maksumuseks 3920 € ning aasta jooksul toimunud kuue pingelohu kogukuluks kujuneb 15680 €

Viimaks peab leidma ühe aastase perioodi jooksul toimunud kõikide pingeprobleemide summaarse kulu, mille võib arvutada valemi 4.4 abil:

$$C_{sum} = \sum_{i=1}^n C_i \quad (4.4)$$

Kus C_{sum} – pingeprobleemide põhjustatud summaarne kulu, €

C_i – ühe pingeprobleemi poolt põhjustatud kulu, €

Valemeid 4.1, 4.2, 4.3 ja 4.4 kasutades leiti iga stsenaariumi katkestuste kulud ning tulemused on kantud tabelisse 4.4.

Tabel 4.4 Tööstusettevõtte katkestuste ja pingelohkude kulud erinevate stsenaariumite korral

Kulu liik	Stsenaarium 1	Stsenaarium 2	Stsenaarium 3
Rikkeline kulu	14660 €	16284 €	20956 €
Plaaniline kulu	2652 €	2456 €	2637 €
Katkestuste summaarne kulu	17312 €	18740 €	23593 €
Pingelohu kulu	15680 €	15680 €	15680 €
Pingeprobleemide summaarne kulu	32992 €	34420 €	39273 €

Esimese stsenaariumi korral, kui toimusid tunni ajalise kestusega katkestused, kujunes aastaseks kuluks ca 17300 €. Kolmanda stsenaariumi puhul, mil leidsid aset 15 minutilised katkestused, oli summaarseks aastaseks kuluks umbes 23600 €. Katkestuste poolt põhjustatud kulu erinevus esimese ja kolmanda stsenaariumi vahel

on ligi 6000 €. Pingelohud on kulukad, sest need põhjustavad üldjuhul tõrkeid seadmete töös ning nende uuesti seadistamine on ajamahukas. Tulemustest saab järeldada, et ettevõtte jaoks on soodsamad üksikud ja pikema kestusega katkestused.

Pingekvaliteedi probleemide majanduslikku mõju uurides tuleb hinnata kõikide aset leidvate pingeprobleemide põhjustatud kulusid ning leida, kui suur on kulu, mille iga pingeprobleem ühe aasta jooksul tekitab. Selliselt leitud pingeprobleemide poolt põhjustatud kulu saab kasutada energiasalvesti tasuvuse arvutamisel ja kasumlikkuse hindamisel.

4.3 Majandusliku otstarbekuse hinnang

Et anda hinnang, kas energiasalvesti kasutamine pingeprobleemide vältimiseks on majanduslikult otstarbekas, tuleb esmalt leida selle maksumus ning seejärel selle tasuvusaeg ning kasumlikkus, võttes arvesse pingeprobleemide poolt põhjustatud kulusid. Samuti tuleks võrrelda tasuvusaega energiasalvestussüsteemi elueaga. Saadud tulemuste põhjal saab luua meetodika majandusliku otstarbekuse hindamiseks akuenergiasalvesti kasutamisel pingeprobleemide vältimiseks.

Tööstusettevõttele sobivat energiasalvestussüsteemi samade stsenaariumite järgi valida ei saa, sest seda ei ole võimalik ette ennustada, kui kaua rike kestab. Energiasalvestussüsteemi ei ole mõtet üle dimensioneerida. Praeguse näite puhul võib energiasalvestussüsteemi valida selle järgi, et ettevõtte saaks katkestuse korral veel näiteks kaks tundi ilma välise võrgu toiteta toimida. Samuti lubab Elektrilevi, et 83% riketest kõrvaldatakse 2 tunniga [56]. Tabeli 4.3 järgi on 12-s tund kõige suurema koormusega – võimsus ulatub 126,4 kW-ni. Oletades, et nii suurt võimsust tarbitakse terve tunni jooksul, kujuneb ühe tunni elektrienergia kuluks 126,4 kWh. Kuna on vaja, et ettevõtte töö saaks ilma välise võrguta jätkuda 2 tunni vältel, peaks sellise elektrikulu juures energiasalvestussüsteemi mahtuvus olema vähemalt 255 kWh. Sellise näite puhul sobiks kasutada Xolta BAT-79 energiasalvestussüsteemi, mille ühe mooduli võimsus on 80 kW ning mahtuvus 79 kWh. Ühendades omavahel kokku 4 seadet, saadakse 320 kW võimsuse ja 316 kWh mahtuvusega energiasalvestussüsteem.

Mitte ühegi eelnevalt välja toodud salvesti hind ei ole teada. Energiasalvesti maksumuse hindamiseks kasutatakse andmeid Taani Energiaagentuuri ja põhivõrguettevõtte Energinet avaldatavast kataloogist, mis sisaldab informatsiooni energia salvestamise

tehnoloogiate kohta. Kataloogis on välja toodud kolm peamist komponenti, millest energiasalvesti hind koosneb:

- Energia komponent (€/kWh) – 132. See komponent võtab arvesse energiasalvesti mahtuvust;
- Võimsuse ja muundamise komponent (€/kW) – 270. See komponent võtab arvesse energiasalvestussüsteemi võimsust ning sisaldab elektrienergia muundamiseks vajalike seadmete kulu;
- Muude projekti kulude komponent (€/kWh) – 100. Muud projekti kulud arvutatakse salvesti mahtuvuse järgi ning selle sisse kuuluvad näiteks ehitus- ja paigalduskulud. [57]

Kirjeldatud komponentide põhjal on võimalik hinnata valitud energiasalvestussüsteemi soetamismaksumust: $316 \text{ kWh} * (132 + 100) + 320 \text{ kW} * 270 = 159712 \text{ €}$.

Esmalt tuleb leida energiasalvesti tasuvusaeg. Tasuvusaeg näitab aega, mis kulub projekti esialgsete kulude katmiseks. Mida lühem on tasuvusaeg, seda parem on investeerimisprojekt ning kui hinnatakse mitme erineva projekti tasuvusaega, tuleb eelistada lühima tasuvusajaga projekti. Tasuvusaja puudusteks on, et meetod ei võta arvesse rahavoogude laekumise järjekorda ja see ignoreerib rahavooge, mis laekuvad pärast tasuvusaja ületamist. Tasuvusaja saab leida kasutades valemit 4.5: [58]

$$T = \frac{C_a}{C_b} \quad (4.5)$$

Kus T – tasuvusaeg, aastates

C_a – alginvesteering, €

C_b – investeeringu aastane sissetulev rahavoog, €

Esimese stsenaariumi korral oleks energiasalvesti abil pingeprobleemide tekitatud kuluna võimalik kokku hoida 32992 €, teise stsenaariumi korral 34420 € ning kolmanda stsenaariumi puhul 39273 €. Need summad on investeeringu aastased sissetulevad rahavood ning alginvesteering on energiasalvestussüsteemi maksumus. Järelikult, energiasalvesti tasuvusaeg on:

- 1. stsenaarium: 5 aastat;
- 2. stsenaarium: 5 aastat;
- 3. stsenaarium: 4 aastat.

Xolta BAT-79 energiasalvestussüsteemi tootja lubab, et seadme eeldatav eluiga on 15 aastat ning et 10 aastat on selle kasulik eluiga, mille jooksul väheneb salvesti mahtuvus 70 %-ni esialgsest mahtuvusest. Kui nelja seadme summaarne mahtuvus on 316 kWh, siis 10 aasta pärast oleks sellest järgi 221 kWh. 2 tunnise katkestuse katmiseks oli vaja, et salvesti mahtuvuseks oleks 255 kWh. Näitena toodud kulude põhjal saab järeldada, et energiasalvesti kasutamine pingeprobleemide leevendamiseks on tasuv, sest energiasalvesti kasulik eluiga on 10 aastat ning selle tasuvusaeg on pool kasulikust elueast ehk 5 aastat. Seega peale tasuvusaja lõppu hakkab energiasalvestussüsteem omanikule tulu teenima. Tasuvusaega oleks võimalik veelgi lühendada teiste energiasalvestussüsteemi funktsioonidega, näiteks energia arbitraaži või tipukoormuse katmisega, vähendades makstavaid elektrienergia kulusid ja võrgutasusid.

Kuna tasuvusaeg ei võta arvesta raha ajaväärtusega, võib arvutada energiasalvestussüsteemi nüüdispuhasväärtuse ehk NPV. See võimaldab hinnata, kas projekt on kasulik või mitte. NPV arvestab raha ajaväärtusega ning kasutab diskonteeritud rahavooge. Selle meetodi puuduseks on, et see sisaldab palju määramatust ja selle väärtust mõjutab olulisel määral tulevikus tekkivate rahavoogude prognoos, kui ka diskonteerimiseks kasutatav kapitali hind. Üldreegel on, et projektid, mille NPV on positiivne, tuleb vastu võtta. Nüüdispuhasväärtuse saab arvutada valemi 4.6 abil: [59]

$$NPV = -C_0 + \sum_{i=1}^t \frac{C_i}{(1+r)^i} \quad (4.6)$$

Kus NPV – nüüdispuhasväärtus, €
 C_0 – alginvesteering, €
 C_i – sissetulev rahavoog, €
 r – diskontomäär, %

Alginvesteeringuks on energiasalvestussüsteemi maksumus ning sissetuleva rahavoona kasutatakse esimese stsenaariumi pingeprobleemide summaarset kulu, mida on võimalik energiasalvestussüsteemiga kokku hoida. Diskontomääraks võetakse 6%, mis põhineb Konkurentsiameti päikesejaamade tasuvusanalüüsil [60]. NPV arvutamise perioodiks võetakse 10 aastat, sest see on näitena toodud energiasalvestussüsteemi kasulik eluiga. Nüüdispuhasväärtuse arvutustulemused on kantud tabelitesse 4.5 ja 4.6.

Tabel 4.5 NPV arvutustulemused [61]

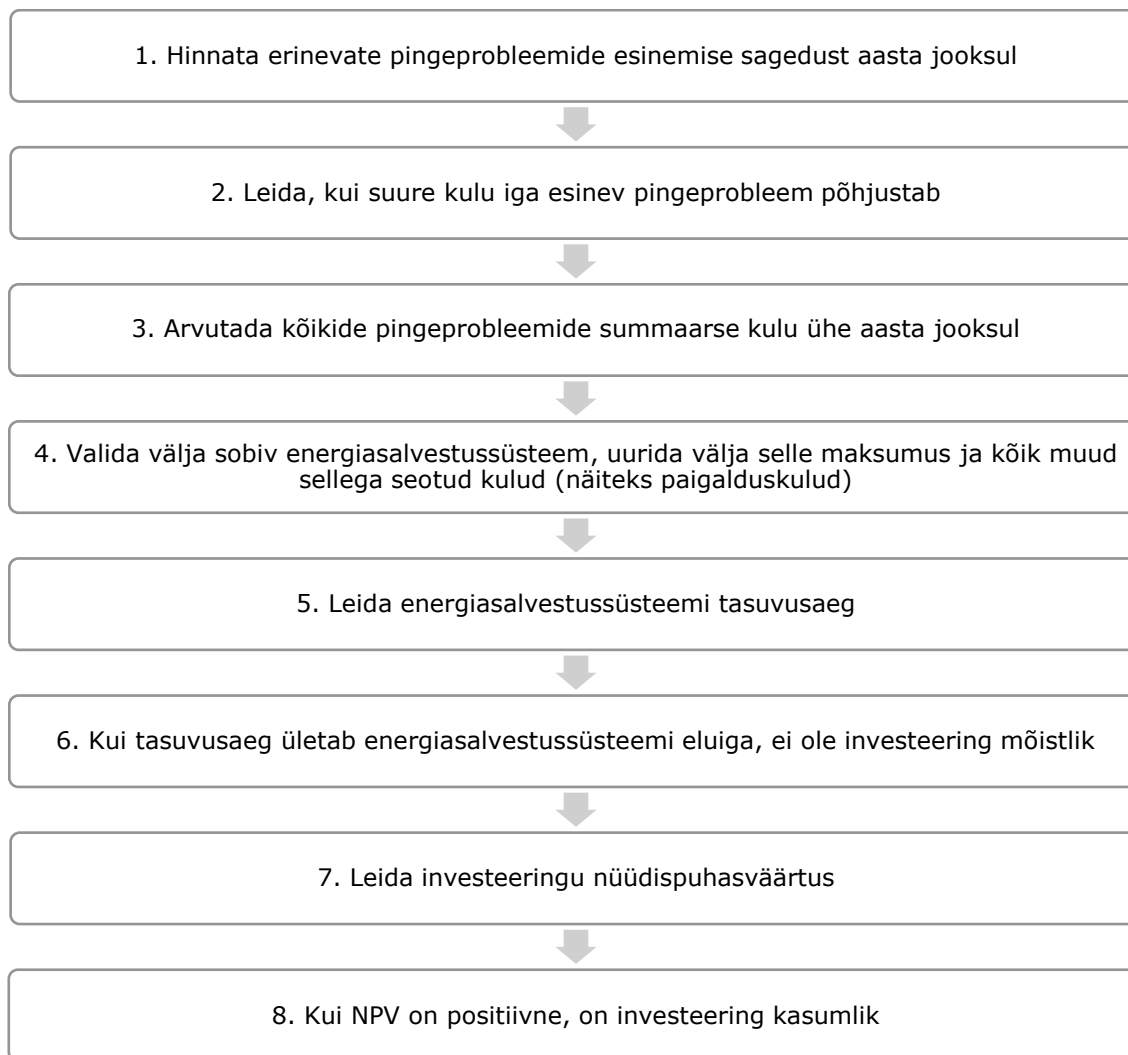
Aasta	Sissetulev rahavoog, €	Alginvesteering, €	Diskonteeritud rahavoog, €
0	0	159712	-159712,00
1	32992	0	31124,53
2	32992	0	29362,76
3	32992	0	27700,72
4	32992	0	26132,75
5	32992	0	24653,54
6	32992	0	23258,06
7	32992	0	21941,56
8	32992	0	20699,59
9	32992	0	19527,91
10	32992	0	18422,56

Tabel 4.6 NPV arvutustulemused [61]

Sissetulek kokku, €	Väljaminek kokku, €	Nüüdispuhasväärtus (NPV), €
329920,00	159712,00	83111,98

Tulemustest selgub, et NPV väärtus on positiivne, mis tähendab, et näitena toodud pingeprobleemide poolt põhjustatud kulude ja energiasalvestussüsteemi maksumuse korral oleks selle kasutamine pingeprobleemide vältimiseks kasumlik.

Kokkuvõtvalt on teostatud analüüsi ja näidete põhjal võimalik välja pakkuda meetodika energiasalvesti majandusliku otstarbekuse hindamiseks pingeprobleemide vältimisel:



Välja pakutud meetodika on ülekantav ka tänavavalgustusvõrkude riskasutamise stsenaariumile. Seda oleks võimalik rakendada tingimusel, kui kommunaalvõrgu omanik peaks vastutama kahjustuste eest, mida tema võrgus tekkinud pingeprobleemid on klientidele põhjustanud ning maksuma hüvitist, kui katkestused kestavad üle kokkulepitud aja. Majandus- ja kommunikatsiooniministri määrusega on kehtestatud lubatud katkestuste pikkused ja hüvitiste suurused [62]. Kirjeldatud meetodika rakendamisel tuleks omanikul hinnata iga võrgus esineva pingeprobleemi poolt aasta jooksul tarbijale põhjustatud kulu, mida talle kompenseerida tuleb. Lisaks tuleks kommunaalvõrgu omanikul hinnata katkestuste esinemise sagedust, kestust ning selle alusel hüvitiste suurust, mida kliendile maksta tuleb. Leitud kulude alusel on võimalik välja pakutud meetodikat kasutades hinnata, kas energiasalvestussüsteemi investeerida on majanduslikult otstarbekas või mitte.

KOKKUVÕTE

Jätkusuutlikud tuleviku linnad peavad suures mahus sisaldama taastuvatest energiaallikatest toodetud elektrienergiat. Üks võimalus linnades hajatootmisele vajalike liitumiste tagamiseks on seda teha läbi kommunaalelektrivõrkude nagu näiteks tänavavalgustuse elektrivõrk. Lisaks tootmisseedmetele, on kommunaalelektrivõrkude kaudu võimalik pakkuda liitumisvõimalust erinevatele avalikele teenustele. Kommunaalvõrgu riskasutus võimaldab suurendada olemasoleva taristu kasutamist ja vähendada investeeringuid, mida muidu oleks vaja teha uute liitumispunktide loomiseks. Kommunaalvõrgu riskasutuse korral võib võrgus sagenema hakata erinevate elektrikvaliteedi probleemide esinemine.

Käesoleva magistritöö eesmärk oli uurida Tartu linna tänavavalgustusvõrgu näitel, kuidas on akuenergiasalvesteid kasutades võimalik kasutada pingeprobleemide vältimiseks kommunaalelektrivõrgu riskasutusel korral ning analüüsida, kas energiasalvesti kasutamine elektrikvaliteedi parandamiseks on majanduslikult otstarbekas.

Esimeses peatükis anti ülevaade erinevatest Eesti tänavavalgustusvõrkudest ning kirjeldati, millised need võrgud oma olemuselt on. Leiti, et töökindluse tagamine tänavavalgustusvõrkudes ei ole kõrge prioriteediga, sest kõik uuritavad tänavavalgustusvõrgud olid konfiguratsiooni järgi radiaalvõrgud, mis tagab võrgule vaid ühepoolse toite. Läbi töötatud tänavavalgustusvõrkude põhjal järelitati, et selliseid võrke saab klassifitseerida konfiguratsiooni, toiteliinide liigi ja mahu ning valgustite arvu järgi.

Teises peatükis kirjeldati, millistele parameetritega pinge kvaliteeti iseloomustatakse ning millised on enamlevinud pingeprobleemid, mis tänavavalgustusvõrkudes esineda võivad. Nendeks on pingelohud, pingemuhud, värelus ja toitepinge katkestus. Võib järelitada, et eri liiki pingeprobleemid põhjustavad tarbijatele erinevaid ebamugavusi.

Töö eesmärgi elluviimiseks koostati Simulink tarkvaras Tartu linna tänavavalgustusvõrgu põhjal mudel. Eri liiki pingeprobleemide uurimiseks koostati näidisobjekti baasil erinevad stsenaariumid, mille eesmärk oli simuleerida nelja erinevat pingeprobleemi. Pärast simulatsioonide teostamist leiti, et iga tekitatud pingeprobleem vastab selle teoreetilisele käsitlusele.

Olles simulatsioonide tulemusena saavutanud neli erinevat pingeprobleemi, uuriti, milline mõju on akuenergiasalvestil kirjeldatud pingeprobleemidele. Simulatsioonide tulemusena selgus, et akuenergiasalvesti abil on võimalik leevendada pingemuhu mõju ning leiti, et mida lähemale pingemuhku põhjustava elemendi juurde on energiasalvesti ühendatud, seda tõhusamalt see pingemuhku kompenseerib. Lisaks oli energiasalvesti abil võimalik püsivvoolu lahti ühendamisel vältida katkestuse tekkimist. Vältida ei suudetud värelevuse ja pingelohu tekkimist. Värelus puhul võis põhjus olla selles, et mudelis kasutatud inverteri juhtimisloogika ei sobi sellise pingeprobleemi kompenseerimiseks. Pingelohu mõju suudeti energiasalvesti abil küll leevendada, kui see ühendati pingeprobleemi põhjustanud asünkroonmasina kõrvale, kuid ka sellisel juhul langes asünkroonmasina käivituse tagajärjel pingelohu tekkimiseks piisavalt madalale.

Töö viimases osas tutvustati kolme erinevat energiasalvestussüsteemi ja nende funktsionaalsust. Samuti analüüsiti ühe tööstusettevõtte näitel, milline on pingeprobleemide majanduslik mõju ning kui suuri kulusid need aasta jooksul võivad tekitada. Majandusliku otstarbekust hinnati tasuvusaja ja nüüdispuhasväärtuse kaudu. Et energiasalvesti kasutamine oleks majanduslikult mõistlik, leiti, et selle tasuvusaeg peab olema lühem kasulikkuse elueast ning kasumlikkuse tagamiseks peaks nüüdispuhasväärtus olema positiivne. Viimaks pakuti välja meetodika, mille alusel energiasalvesti majanduslikku otstarbekust pingeprobleemide vältimisel hinnata.

Töö edasiarendusena oleks võimalik uurida teisi alternatiivseid meetodeid ja võrrelda nende efektiivsust pingeprobleemide vältimisel või leevendamisel. Lisaks võiks alternatiivsete meetodite või seadmete maksumust võrrelda akuenergiasalvestiga. Edasiarendusena oleks võimalik veel uurida, kuidas energiasalvestite teised funktsioonid, näiteks tipukoormuse katmine või energia arbitraaž, aitaksid selle tasuvusaega lühendada.

SUMMARY

Sustainable cities of the future must include a large amount of electricity from renewable energy sources. One way to ensure the necessary connection points for distributed generation in cities is to do so through the street lighting networks. In addition to distributed generation, it is possible to provide access to various public services through street lighting networks. The cross use of the street lighting network will make it possible to increase the use of existing infrastructure and reduce the investment that would otherwise be required to create new connection points. In case of cross use of the street lighting network, various power quality problems may increase in the network.

The aim of this thesis was to study how battery energy storage systems can be used to prevent power quality problems when cross using the street lighting network and to analyze whether it is economically feasible to use energy storage systems to improve power quality.

In the first chapter, an overview of different street lighting networks was given. It was found that ensuring the reliability of street lighting networks is not a high priority, because all the street lighting networks studied were by configuration radial networks, which provide only one-way power to the network. Based on the street lighting networks that were analyzed, it was concluded that such networks can be classified according to the configuration, the type and length of electrical power lines and the number of luminaires.

The second chapter describes the parameters that characterize the quality of voltage and the most common power quality issues that can occur in street lighting networks. These include voltage sags, voltage swells, flicker and power outages. It can be concluded that different types of power quality problems cause different inconveniences to customers.

To achieve the goal of this thesis, a model was compiled in Simulink software based on the street lighting network of the city of Tartu. To study different types of power quality problems, different use cases were developed based on the sample object, the aim of which was to simulate four different power quality problems. After performing the simulations, it was found that each power quality problem simulated corresponds to its theoretical approach.

Having achieved four different power quality problems as a result of the simulations, the effect of the energy storage system on the described voltage problems was investigated. As a result of the simulations, it was found that the battery energy storage system can mitigate the effect of the voltage swell. It was found that the closer the energy storage system is connected to the element causing the voltage swell, the more effectively it compensates the voltage swell. In addition, it was possible to avoid an interruption when disconnecting the power supply with the help of the energy storage system. Flicker and voltage sag could not be avoided. In the case of flicker, this may have been due to the control logic of the inverter used is not suitable to compensate for such a power quality problem. The effect of the voltage sag could be mitigated by the energy storage system when it was connected next to the asynchronous machine that caused the voltage sag, but even then, the voltage dropped low enough to cause the sag.

In the last part of the work, three different energy storage systems and their functionality were introduced. The economic impact of power quality problems and the costs they could incur during the year were also analyzed, following an example based on one industrial company. Economic feasibility was assessed using the payback period and net present value. For the energy storage system to be economically viable, it was considered that its payback period should be shorter than its useful lifetime and that the net present value should be positive in order to ensure profitability. Finally, a methodology was proposed to assess the economic viability of an energy storage system in avoiding power quality problems.

As a further development of the work, it would be possible to study other alternative methods and compare them in avoiding or mitigating power quality problems. In addition, the cost of alternative methods or equipment could be compared to battery energy storage system. In addition, it could be also further explored how other functions of energy storage system, such as peak shaving or energy arbitrage, could help shorten its payback period.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] TalTech, „Microgrids: Energiavajaduse vähendamine mikrovõrkude ning energiasalvestite abil,” 01.06.2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://taltech.ee/uudised/microgrids-energiavajaduse-vahendamine-mikrovorkude-ning-energiasalvestite-abil>. [Kasutatud 15.05.2022].
- [2] G. Singh, „Electric Power Quality-Issues, Effects And Mitigation,” *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, kd. 2, nr 6, 2013.
- [3] Riigi Teataja, „Auditi kohustusega elektripaigaldised ning nõuded elektripaigaldise auditile ja auditi tulemuste esitamisele,” 08.07.2015. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.riigiteataja.ee/akt/108072015014>. [Kasutatud 16.12.2021].
- [4] Tarbijakaitse ja Tehnilise Järevalve Amet, „Elektripaigaldised,” 02.12.2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ttja.ee/ariklient/ohutus/paigaldised-ja-masinad/elektripaigaldised>. [Kasutatud 16.12.2021].
- [5] J. Valtin, H. Tammoja ja P. Raesaar, „Elektrivõrgu klientide elektripaigaldiste ühe ja kahepoolse toite mõju analüüs varustuskindlusele,” Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituut, Tallinn, 2016.
- [6] R. Teemets, „Kaitselülitid,” 2010. [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/AAR3340/5.5.1..._5.5.5_Kaitselylitid._Liinikaitselylitid._Konspekt2010.pdf. [Kasutatud 16.12.2021].
- [7] *EVS-EN 50160:2010+A1+A2+A3:2019 Avalike elektrivõrkude pingetunnussuurused*, Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2019.
- [8] A. Rosin, T. Vinnal, H. Hõimoja, V. Astapov, H. Biechl ja K. Janson, „Alternatiivsete tehniliste lahenduste kasutamine pingeprobleemide lahendamisel madalpingevõrgus,” Tallinna Tehnikaülikool Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut, Tallinn, 2017.
- [9] R. Teemets, „Elektri kvaliteet,” 2010. [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/AAV3340/EIVar_7._Elektri_kvaliteet.Konspekt2010kevad.pdf. [Kasutatud 16.12.2021].
- [10] G. G. Karady, S. Saksena, B. Shi ja N. Senroy, „Effects of Voltage Sags on Loads in a Distribution System,” 10.2005. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://pserc.wisc.edu/wp-content/uploads/sites/755/2018/08/T-16_Final-Report_Oct-2005.pdf. [Kasutatud 18.03.2022].
- [11] T. Vinnal, „Toitepinge kvaliteet Eesti 0,4 kV madalpingevõrkudes ja tarbijapaigaldiste liitumispunktides,” Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2013.

- [12] Q. Han, X. Wang, P. Hu, M. Wang, X. Luo ja W. Hou, „Multi-Mode Voltage Sag/Swell Generator Based on Three-Phase Inverter Circuit,” *Energies*, kd. 14, nr 20, p. 6520, 2021.
- [13] S. D. Dhakulkar, V. A. Manwar, S. G. Banole ja B. S. Rakhonde, „INSPECTION OF VOLTAGE SAGS AND VOLTAGE SWELLS INCIDENT IN POWER QUALITY PROBLEMS - A REVIEW,” *International Research Journal of Engineering and Technology*, kd. 04, nr 01, pp. 1734-1736, 01.2017.
- [14] M. V. Aware ja V. B. Virulkar, „Flicker Detection, Measurement and Means of Mitigation: A Review,” *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, kd. 95, nr 2, pp. 149-162, 06.2014.
- [15] R. Bertram, „Flicker Mitigation by Optimization of Voltage Control,” *2019 IEEE Milan PowerTech*, pp. 1-6, 2019.
- [16] M. A. Golkar, M. T. Bina ja S. Meschi, „A Novel Method of Electrical Arc Furnace Modeling for Flicker Study,” *Renewable Energy & Power Quality Journal (RE&PQJ)*, kd. 1, nr 5, pp. 87-94, 2007.
- [17] M. Deepthisree, I. Karuppasamy, M. G. Nair ja V. S. K. Devi, „Voltage Flicker Mitigation in Electric Arc Furnace using D-STATCOM,” *International Journal of Power Electronics and Drive System*, kd. 5, nr 2, pp. 211-218, 20.08.2014.
- [18] N. C.-F. Tse, J. Y.-c. Chan, W.-H. Lau, J. T. Y. Poon ja L. L. Lai, „Real-Time Power-Quality Monitoring With Hybrid Sinusoidal and Lifting Wavelet Compression Algorithm,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, kd. 27, nr 4, pp. 1718-1726, 2012.
- [19] Tartu Linnavalitsus, „VALGIS projekteerimiseks,” 02.10.2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://geohub.tartulv.ee/apps/Tartu::valgis-projekteerimiseks/explore>. [Kasutatud 28.01.2022].
- [20] MathWorks, „Simulink,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://se.mathworks.com/products/simulink.html>. [Kasutatud 29.03.2022].
- [21] MathWorks, „PI Section Line,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://se.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/pisectionline.html>. [Kasutatud 16.04.2022].
- [22] MathWorks, „Distributed Parameters Line,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://se.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/distributedparametersline.html>. [Kasutatud 16.04.2022].
- [23] A. Jurtsenko, „Standardse Nordic mudeli koostamine ja analüüs PSCAD tarkvaras,” Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2020.

- [24] Prysmian Group, „AXMK-PLUS 4-johtiminen,” 22.02.2019. [Võrgumaterjal].
Saadaval:
https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/business_markets/markets/downloads/datasheets/cpr%20AXMK-PLUS%20220219.pdf. [Kasutatud 04.03.2022].
- [25] Prysmian Group, „EX Alumiiniumsoontega rippkeerdkaabel,” [Võrgumaterjal].
Saadaval: <https://baltics-catalogue.prysmiangroup.com/s/#/family/EX>.
[Kasutatud 04.03.2021].
- [26] Ü. Treufeldt, „Lühised,” Tallinna Tehnikaülikool Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut, Tallinn, 2019.
- [27] Vizulo, „Stork,” 07.03.2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval:
https://www.vizulo.com/storage/document/March2022/Stork_07.03.22.pdf.
[Kasutatud 16.04.2022].
- [28] Philips, „Power Factor when changing from Conventional to LED lighting,” 2020.
[Võrgumaterjal]. Saadaval:
https://www.docs.lighting.philips.com/en_gb/oem/download/xitanium-led-drivers-outdoor/power-factor-white-paper.pdf. [Kasutatud 16.04.2022].
- [29] R. Tan, „Flicker Disturbance Caused By Electric Arc Furnace,” 12.11.2015.
[Võrgumaterjal]. Saadaval:
https://se.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/51937-flicker-disturbance-caused-by-electric-arc-furnace?s_tid=srchtitle. [Kasutatud 13.03.2022].
- [30] R. N. Pragna, L. P. Rani, K. Ramya ja T. K. Mohan, „Dynamic Voltage Restorer Using PI & Fuzzy Logic Control,” *JRAR*, kd. 6, nr 1, 2019.
- [31] Sungrow, „SBR096/128/160/192/224/256,” 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval:
https://www.europe-solarstore.com/download/Sungrow/Sungrow_SBR096_SBR256_High_Voltage_Batteries_Datasheet-V1.2.1.pdf. [Kasutatud 29.03.2022].
- [32] Enefit VOLT, „HomeBox Slim Plus Elektriauto laadimisjaam,” [Võrgumaterjal].
Saadaval:
https://enefitvolt.com/.resources/volt/webresources/assets/pdfs/elinta_charge_homebox_slim_plus_A4.pdf. [Kasutatud 09.04.2022].
- [33] R. Tan, „Three-Phase Grid Connected Inverter,” MathWorks File Exchange, 16.11.2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval:
<https://se.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/102054-three-phase-grid-connected-inverter>. [Kasutatud 08.04.2022].

- [34] MathWorks, „Two-Level Converter,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://se.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/twolevelconverter.html>. [Kasutatud 30.04.2022].
- [35] S. Tahir, J. Wang, M. H. Baloch ja G. S. Kaloi, „Digital Control Techniques Based on Voltage Source Inverters in Renewable Energy Applications: A Review,” *Electronics*, kd. 7, nr 2, p. 18, 2018.
- [36] M. Prodanovic ja T. C. Green, „Control of power quality in inverter-based distributed generation,” %1 *IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02*, Seville, 2002.
- [37] G. M. Quintero, Y. R. Challapuram, A. Bilbao, S. B. Bayne, A. S. Subburaj ja M. A. Harral, „Micro-grid System Modeling Efforts using PQ-Control for Single-phase and Three-phase Inverter,” %1 *2018 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Turino, 2018.
- [38] MathWorks, „PWM Generator (2-Level),” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://se.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/pwmgenerator2level.html>. [Kasutatud 30.04.2022].
- [39] M. K. Döşoğlu ja M. Dursun, „LCL Filter Design for Grid Connected Three-Phase Inverter,” *2018 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, Ankara, 2018.
- [40] R. Teemets, „Trafod,” 2012. [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/AAV3340/EIVar_3._Keskpingevorgud.3.2.3_Trafod.3.2.4___3.2.4Kommutatsiooniparatuur.Slaid2012.pdf. [Kasutatud 30.04.2022].
- [41] N. Singh ja J. Upadhaya, „BESS Benefits: How Battery Energy Storage Systems Support the Grid,” 21.10.2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://blog.norcalcontrols.net/bess-battery-energy-storage-systems-support-grid>. [Kasutatud 07.05.2022].
- [42] J. Marchgraber ja W. Gawlik, „Investigation of Black-Starting and Islanding Capabilities of a Battery Energy Storage System Supplying a Microgrid Consisting of Wind Turbines, Impedance- and Motor-Loads,” *Energies*, kd. 13, nr 19, p. 5170, 10.2020.
- [43] M. Ovaskainen, J. Öörni ja A. Leinonen, „Superposed control strategies of a BESS for power exchange and microgrid power quality improvement,” %1 *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Genova, 2019.

- [44] G. Haines, „Power Factor Control with a Battery Energy Storage System (BESS),“ 13.04.2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.adelaide.edu.au/energy-storage/docs/aeskb-case-study-2-power-factor-control-with-a-bess.PDF>. [Kasutatud 07.05.2022].
- [45] Tesla, „POWERPACK,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.spiritenergy.co.uk/hubfs/Website%20downloads/Brochures/Battery/Product%20Brochure%20-%20Tesla%20Powerpack%20-%20Spirit%20Energy.pdf>. [Kasutatud 08.05.2022].
- [46] ABB, „ABB eStorage Flex 10,“ ABB Ltd, 09.2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://library.e.abb.com/public/dd9b303c44c44d7c80f4bc2ccab0981c/1VPD110001A0630%20Datasheet%20eStorage%20Flex-10.pdf>. [Kasutatud 08.05.2022].
- [47] XOLTA, „BAT-79 Battery Energy Storage System,“ 03.2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://xolta.com/wp-content/uploads/XOLTA_DataSheet_BAT-79_UK_V3_0322.pdf. [Kasutatud 08.05.2022].
- [48] B. Iversen, „Energy Storage Systems,“ 15.12.2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://eu-interact.org/app/uploads/2021/01/XOLTA-Bendt-Iversen-Xolta-energy-storage-solutions.pdf>. [Kasutatud 11.05.2022].
- [49] ABB, „Power quality,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://new.abb.com/low-voltage/launches/power-quality>. [Kasutatud 09.05.2022].
- [50] Ensto, „SAIDI and SAIFI indices guiding towards more reliable distribution network,“ 29.11.2016. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ensto.com/company/newsroom/articles/saidi-and-saifi-indices-guiding-towards-more-reliable-distribution-network/>. [Kasutatud 11.05.2022].
- [51] Eesti Energia, „Eesti Energia aastaaruanne 2021,“ 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.energia.ee/-/doc/8644186/ettevotetest/aastaaruanne/pdf/EE_EST_2021.pdf. [Kasutatud 11.05.2022].
- [52] S. Kufeoglu ja M. Lehtonen, „A Novel Hybrid Approach to Estimate Customer Interruption Costs for Industry Sectors,“ *Engineering*, kd. 5, nr 10A, pp. 34-40, 2013.
- [53] F. Angizeh, A. Ghofrani ja M. A. Jafari, „Dataset on Hourly Load Profiles for a Set of 24 Facilities from Industrial, Commercial, and Residential End-use Sectors,“ Mendeley Data, 21.08.2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://data.mendeley.com/datasets/rfnp2d3kjp/1>. [Kasutatud 12.05.2022].

- [54] Inflation Tool, „Inflation Calculator,” 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.inflationtool.com/euro/2013-to-present-value?year2=2022&frequency=yearly>. [Kasutatud 13.05.2022].
- [55] Leonardo Energy, „Poor Power Quality Qosts European Businesses More Than € 150 Billion A Year,” 2008. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://leonardo-energy.pl/wp-content/uploads/2017/08/Poor-power-quality-costs-european-business-more-than-150-billion-a-year.pdf>. [Kasutatud 09.05.2022].
- [56] Elektrilevi, „Katkestuste kaart,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.elektrilevi.ee/katkestused/katkestuste-kaart>. [Kasutatud 12.05.2022].
- [57] Taani Energiaagentuur ja Energinet, „Technology Data – Energy storage,” 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/technology_data_catalogue_for_energy_storage.pdf. [Kasutatud 13.05.2022].
- [58] Rahandus, „Tasuvusaeg,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.rahandus.ee/et/tasuvusaeg>. [Kasutatud 12.05.2022].
- [59] Rahandus, „Nüüdispuhasväärtus (NPV),” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.rahandus.ee/et/npv>. [Kasutatud 14.05.2022].
- [60] Konkurentsiamet, „Ülevaade päikesejaamade tasuvusanalüüsist,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.konkurentsiamet.ee/sites/default/files/news-related-files/paikesejaamade_tasuvusanaluuskonkurentsiamet.pdf. [Kasutatud 14.05.2022].
- [61] Kalku, „Nüüdis-puhasväärtuse (NPV) ja kasumiindeksi (PI) kalkulaator,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.kalkulaator.ee/et/npv>. [Kasutatud 14.05.2022].
- [62] Riigi Teataja, „Võrguteenuste kvaliteedinõuded ja võrgutasude vähendamise tingimused kvaliteedinõuete rikkumise korral,” 28.09.2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.riigiteataja.ee/akt/882449?leiaKehtiv>. [Kasutatud 16.05.2022].

LISAD

Lisa 1 Maakaabli AXP/AXMK andmeleht [24]

Voimakaapelit 1 kV

AXMK-PLUS 4-johtimiset

OMINAISUUDET

TUOTTEEN NIMI		AXMK-PLUS 4G16 RM 1 kV	AXMK-PLUS 4G25 RM 1 kV	AXMK-PLUS 4G35 AN 1 kV	AXMK-PLUS 4G50 AN 1 kV	AXMK-PLUS 4G70 AN 1 kV	AXMK-PLUS 4G95 AN 1 kV	AXMK-PLUS 4G120 AN 1 kV	AXMK-PLUS 4G150 AN 1 kV	AXMK-PLUS 4G185 AN 1 kV	AXMK-PLUS 4G240 AN 1 kV	AXMK-PLUS 4G300 AN 1 kV		
Sähknumero		0601829	0601830	0601831	0601832	0601833	0601834	0601835	0601836	0601837	0601838	0601839		
RAKENNETIETOJA (1)														
Kaapelin ulkohalkaisija		mm	20	24	24	27	32	35	40	44	49	55	61	
Massa		alumiini kaapeli	kg/km	165	265	365	495	720	1000	1260	1550	1945	2555	3190
			kg/km	360	520	640	840	1150	1500	1890	2310	2870	3700	4580
TOIMITUSTIETOJA														
Vakiotoimituspituus		m	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	
Toimituskela			K9	K11	K12	K12	K14	K16	K18	K20	K22	K24	K24	
Massa (1)		kaapeli+kela	kg	215	315	420	510	700	960	1190	1510	1860	2320	2760
MEKAANISIA ARVOJA (2)														
Pienin sallittu taivutussäde asennusvedossa		m	0,24	0,29	0,29	0,33	0,39	0,42	0,48	0,53	0,59	0,66	0,73	
Pienin sallittu taivutussäde lopullisessa asennuksessa (3)		m	0,16	0,20	0,20	0,22	0,26	0,28	0,32	0,36	0,40	0,44	0,49	
Suurin sallittu asennusvetovoima vetosukalla		kN	0,9	1,5	2,1	3,0	4,2	5,7	7,2	8,5	8,5	8,5	8,5	
Suurin sallittu asennusvetovoima vetopäällä		kN	1,9	3,0	4,2	6,0	8,4	11,4	14,4	18,0	20,0	20,0	20,0	
SÄHKÖISIÄ ARVOJA (2)														
Vaihe- ja PEN-johtimen maks. tasavirtaresistanssi		johdin 20°C	Ω/km	1,91	1,20	0,868	0,641	0,443	0,320	0,253	0,206	0,164	0,125	0,100
Vaihe- ja PEN-johtimen vaihtovirtaresistanssi (1)		johdin 70°C	Ω/km	2,3	1,5	1,0	0,77	0,53	0,39	0,31	0,25	0,20	0,16	0,13
Induktanssi vaihetta kohti (1)			mH/km	0,29	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25
Käyttökapasitanssi (1)			µF/km	0,30	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,28	0,28	0,28	0,27	0,26
KUORMITETTAVUUS (2)														
Asennustapa D		johdin 65°C	A	78	100	125	150	185	220	255	280	330	375	430
Asennustapa E		johdin 70°C johdin 90°C	A A	63 80	81 101	100 125	122 152	156 194	190 236	220 274	255 316	291 361	343 425	396 490
TERMINEN OIKOSULKUKESTOISUUS (2)														
Suurin sallittu 1 sekunnin oikosulkuvirta		vaihe- ja PEN-johdin (4)	kA	1,5	2,4	3,4	4,8	6,7	9,0	11,4	14,2	17,5	22,6	28,2

(1) Likiarvo

(2) Katso taulukkoarvojen lähtöolettamukset kappaleesta Yleistä tuotetietoa.

(3) Taivutus on tehtävä varovaisena ja tasaisena kertataivutuksena.

(4) Johtimen lämpötila on ennen oikosulkua 90°C ja oikosulun päättyessä 250°C.

22.02.2019 © Prysmian Group. Kaikki oikeudet pidätetään.

Tämän asiakirjan sisältämää tietoa ei saa kopioida tai käyttää missään muodossa osaksi tai kokonaan ilman Prysmian Groupin kirjallista lupaa. Informaation uskotaan olevan ajan tasalla julkaisuajankohtana. Prysmian Group pidättää itselleen oikeuden korjata asiakirjan sisältämää tietoa ilman erillistä ilmoitusta. Spesifikaatio ei ole juridisesti pätevä ilman Prysmian Groupin erillistä sitoumusta.

Prysmian
Group

Lisa 2 Rippkeerdkaabli EX andmeleht [25]

Prysmian

A Brand of Prysmian Group

Toote nimi	Soonte arv	Välisläbimõõt, ligikaudne [mm]	Kaal [kg/km]	Min. painderaadius lõplikul paigaldusel [mm]	Min. painderaadius paigaldusel [mm]
EX 1x25	1	9	100	120	160
EX 1x50	1	11	165	150	200
EX 1x70	1	13	235	170	240
EX 1x95	1	15	315	200	270
EX 2x25	2	17	195	240	330
EX 3x25	3	19	292	260	360
EX 3x50	3	23	494	330	450
EX 3x95	3	32	939	440	610
EX 4x16	4	18	262	260	360
EX 4x25	4	21	389	300	420
EX 4x35	4	24	512	350	480
EX 4x50	4	26	659	380	530
EX 4x70	4	31	936	440	620
EX 4x95	4	36	1 253	520	720

Konstruksioon	Soone takistus 20°C juures [Ohm/km]	Soone lühisvool (1s) [kA]	Koormusvool õhus [A]	Max. tensile strength [N]
1x25	1,2	1,8	119	
1x50	0,641	3,6	187	
1x70	0,443	5	244	
1x95	0,32	6,8	291	
2x25	1,2	1,8	95	
3x25	1,2	1,8	83	
3x50	0,641	3,6	131	
3x95	0,32	6,8	203	
4x16	1,91	1,1	67	
4x25	1,2	1,8	83	
4x35	0,868	2,5	106	
4x50	0,641	3,6	131	
4x70	0,443	5	167	
4x95	0,32	6,8	203	

Koormusvool õhus, temperatuur 25°C