



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**EESTI ÜLEKANDEVÕRGU
ALALISVOOLUÜHENDUSTE HARMOONIKUTE
EMISSIONI ANALÜÜS**

**HARMONIC EMISSION ANALYSIS OF ESTONIAN POWER
SYSTEM HVDC CONNECTIONS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Taavet Hermann

Üliõpilaskood 183250

Mari Löper, Doktorant-
nooremteadur

Juhendaja: Jako Kilter, Professor

Tallinn, 2021

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.

"....." 202.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 202.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina _____ (autori nimi)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

_____ /

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on

_____ /

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

_____ (kuupäev)

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

Lõputöö lühikokkuvõte

<i>Autor:</i> Taavet Hermann	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> Eesti ülekandevõrgu alalisvooluühenduste harmoonikute emissiooni analüüs	
<i>Kuupäev:</i> 17.12.2020	143 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja(d):</i> Doktorant-nooremteadur Mari Löper <u>Professor</u> Jako Kilter	
<i>Töö konsultant (konsultandid):</i> Nooremteadur Madis Leinakse	
<i>Sisu kirjeldus:</i> Käesoleva töö eesmärgiks on leida alalisvooluühenduste harmoonikute karakteristikud, mida saab kasutada nende modelleerimiseks. Analüüsitakse Estlink 1 ja Estlink 2 alalisvooluühendusi. Selleks viidi 2019. aasta suve lõpus läbi mõõtmised spetsiaalsete klass A kvaliteedimõõteseadmetega. Esimeses peatükis antakse teoreetiline ülevaade harmoonikute olemusest ning kuidas saaks seda vähendada. Samuti ülevaade muundurseedmetest, türistoridest ning erinevatest kontrolleriitest. Lisaks käsitletakse harmoonikute modelleerimist elektrivõrkudes. Teises peatükis antakse ülevaade Estlink 1-st ja Estlink 2 objektidest ning kirjeldatakse mõõtmiste protseduuri. Lisaks tutvustatakse matemaatilisi valemeid, mille abi lõputöö autor andmeid analüüsis. Sealjuures kirjeldatakse erinevaid harmoonikute visualiseerimise võimalusi tervikliku pildi saamiseks. Kolmandas peatükis antakse ülevaade tulemustest vaadeldes eraldi pinge -ja vooluharmoonikuid. Harmoonikute tulemused esitatakse alalisvooluühenduste võimalustest lähtuvalt arvestades võimsusvoo suunda ja muid tegureid. Lõpuks annab autor omapoolse hinnangu tulemustest.	
<i>Märksõnad:</i> Estlink1, Estlink2, harmoonikud, HVDC konverter, modelleerimine, PQ Box 200.	

Summary of the Diploma Work

<i>Author:</i> Taavet Hermann	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Harmonic emission analysis of estonian power system HVDC connections	
<i>Date:</i> 17.12.2020	143 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Tutor(s) of the work:</i> PhD Student Mari Löper Professor Jako Kilter	
<i>Consultant(s):</i> PhD Student Madis Leinakse	
<i>Abstract:</i> The aim of this work is to find the characteristics of DC harmonics that can be used to model them. The Estlink 1 and Estlink 2 DC connections are analyzed. To this end, measurements were performed at the end of the summer of 2019 with special Class A quality measuring devices. The first chapter provides a theoretical overview of the nature of harmonics and how it can be reduced. Also, an overview of converter devices, thyristors and various controllers. In addition, the modeling of harmonics in electrical networks is discussed. The second chapter provides an overview of Estlink 1 and Estlink 2 objects and describes the measurement procedure. In addition, mathematical formulas are introduced, with the help of which the author analyzes the data. Various ways of visualizing harmonics to obtain a complete image are described. The third chapter provides an overview of the results by looking at voltage and current harmonics separately. The results of the harmonics are presented based on the possibilities of DC connections, considering the direction of the power flow and other factors. Finally, the author gives his own assessment of the results.	
<i>Keywords:</i> Estlink 1, Estlink 2, harmonics, HVDC converter, modeling, PQ Box 200.	

SISUKORD

Lõputöö ülesanne	8
EESÕNA	11
SISSEJUHATUS	12
1. HARMOONIKUD ELEKTRISÜSTEEMIS NING NENDE MODELLEERIMINE.....	14
1.1 Elektrikvaliteet	14
1.2 Harmooniku mõiste ja olemus	15
1.3 Alalisvooluühenduste muundurid	23
1.4 Modelleerimine	32
1.4.1 Meetodid	33
1.4.2 Aseskeemid ja Nortoni ekvivalent	34
1.4.3 Vaeharmonikute modelleerimine	37
2. EESTI ALALISVOOLUÜHENDUSTE HARMOONIKUTE KARAKTERISTIKUTE MÕÕTMINE	39
2.1 Alalisvooluühendused Eestis	39
2.2 Mõõteahel	40
2.2.1 Mõõtetetraford	42
2.2.2 Katse läbiviimine	45
2.3 Mõõtmistulemuste analüüsi metoodika	45
2.4 Karakteristlikute harmoonikute visualiseerimine	47
3. TULEMUSTE ANALÜÜS	50
3.1 Estlink 1	50
3.1.1 Vooluharmonikud	53
3.1.2 Pingeharmonikud	66
3.2 Estlink 2	78
3.2.1 Vooluharmonikud	78
3.2.2 Pingeharmonikud	85
3.3 Järeldused Estlinkidest	91
3.3.1 Vooluharmonikud	91
3.3.2 Pingeharmonikud	92
KOKKUVÕTE.....	96
SUMMARY	99

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema: EESTI ÜLEKANDEVÕRGU ALALISVOOLUÜHENDUSTE
HARMOONIKUTE EMISSIOONI ANALÜÜS

Üliõpilane, üliõpilaskood: Taavet Hermann 183250

Eriala: Elektroenergeetika

Lõputöö liik: Magistritöö

Lõputöö juhendaja: doktorant-nooremteadur Mari Löper, professor Jako Kilter

Lõputöö ülesande kehtivusaeg: 31.01.2021

Lõputöö esitamise tähtaeg: 21.12.2020

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Euroopa Liit on otsustanud, et juba aastaks 2050 saadakse enamus oma elektrit taastuvatest allikatest. See tähendab jõuelektronikaseadmete osakaalu kasvu elektrivõrkudes, mis toob endaga kaasa erinevate väljakutsete lahendamist elektrivõrgu efektiivse toimimise tagamiseks. Üheks väljakutseks on elektrikvaliteet, millele ülekandevõrkudes on hakatud üha enam tähelepanu pöörama. Konverterid on ühed põhillised jõuelektronikaseadmed, mis paiskavad võrku suures koguses harmoonikuid ning mis on harmoonikute osakaalule ise ka väga tundlikud. Selle raames on tekkinud vajadus modelleerida harmoonikute levikut ülekandevõrkudes ja nende mõju erinevate seadmete tööle. Harmoonikute leviku modelleerimisel ja selle õigel analüüsil on oluline valideerida mudelite tulemused reaalsete võrguandmetega. Selle raames on võimalus Eesti põhivõrgus läbi viia erinevate paigaldiste harmoonikute emissiooni analüüs reaalsete mõõtmistega, mille alusel saab koostada erinevate konverterpaigaldiste harmoonikute karakteristikud.

2. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- 1) Missugused on ülekandevõrkudes kasutatavad erinevad alalisvooluühenduste tehnoloogiad?
- 2) Missugused on Eestis kasutatavate alalisvooluühenduste pinge- ja voolu harmoonikute karakteristikud?

- 3) Missuguseid lähenemisviise on kasutusel alalisvooluühenduste harmoonikute modelleerimiseks ja analüüsiks?
- 4) Missugused on soovitud Eesti alalisvooluühenduste harmoonikute emissiooni modelleerimiseks?

3. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on uurida Eesti elektrisüsteemi alalisvooluühenduste harmoonikute emissioone ja esitada soovitud nende modelleerimiseks.

4. Lähteandmed:

Töös on kavandatud kasutada: erialast kirjandust, erinevaid uurimustöid, loengumaterjale ja tänaseks rajatud erinevaid konverter tüüpi jaamades läbi viidud mõõtmisi.

5. Uurimismeetodid

Töötulemuseni plaanitakse jõuda reaalsete elektripaigaldiste mõõtmistega, nende andmete töötlemisel programmi MATLAB-ga ning lõpuks vastavalt saadud andmete analüüsiga – võrdlus kirjandusega.

6. Graafiline osa

Graafiline osa, tabelid, skeemid, graafilised süsteemide kirjeldused, esitatakse töö põhiosas.

7. Töö struktuur

Sissejuhatus

1. Töö teoreetiline osa
2. Alalisvoolu harmoonikute karakteristikute mõõtmine
3. Tulemuste analüüs

Kokkuvõte

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Erialane kirjandus erinevatest andmebaasidest.

- [1] J. Luszcz, „High Frequency Harmonics Emission of Modern Power Electronic AC-DC Converters“, Gdansk, Poland, 2013.
- [2] K. Yang, „On Harmonic Emission, Propagation and Aggregation in Wind Power Plants“, Sweden, 2015.
- [3] A.M. Blanco, R. Stiegler, J. Meyer, M. Schwenke, „Implementation of harmonic phase angle measurement for power quality instruments“, Germany, 2016.
- [4] G. Ye, V. Cuk, Joseph F. G. Cobben, „A Study on Harmonic Current Summation Using Field Measurement Data“, Netherlands, 2016.
- [5] B. Peterson, J. Rens, G. Botha, A.M. Blanco, J. Meyer, J. Desmet, „Impact of Aggregation Interval on Harmonic Phase Angle Measurements“, South Africa, Germany, Belgium, 2018.
- [6] V.J. Gosbell, S. Perera, R. Barr, A. Baitch, „Primary and Secondary Indices for Power Quality (PQ) Survey Reporting“, 2004.

EESÕNA

Käesolev magistritöö teema sai valitud MIGRATE projektist ja mina osalesin selle Eesti poolses uurimusrühmas. Tegemist oli kitsa valdkonnaga, millega olin varem vähe kokku puutunud. Siinkohal soovin tänada oma kahte juhendajat, kes mind palju aitasid. Lisaks soovin tänada oma konsultanti Madis Leinakse, kes abistas mind arvutiprogrammiga MATLAB. Tegemist oli kõige mahukama osaga ning tänu tema nutikusele, suutsin koostada koodi, mis põhines matemaatilistel valemitel. Ma usun, et antud lõputöö on väga tähtis võrguettevõtetele ning kasulik tulevikus.

SISSEJUHATUS

Euroopa Liit on seadnud eesmärgiks olla aastaks 2050 kliima neutraalne, st rohkem taastuenergia tehnoloogial põhinevaid jaamu, riikide vahelisi alalisvooluühendusi, ja meetmeid tagamaks paremat varustuskindlust. Järjest enam lisandub elektrivõrku jõuelektroonikaseadmeid, mille kasutuselevõtt loob väljakutseid võrgu efektiivseks ja töökindlaks toimimiseks. Üheks väljakutseks jõuelektroonika olulise kasvuga on elektrikvaliteedi küsimused. Jõuelektroonika seadmed paiskavad elektrivõrku suures koguses harmoonikuid, olles samal ajal nendele ka väga tundlikud. Selletõttu on harmoonikute analüüsimise ja modelleerimise osatähtsus suurenenud viimastel aastatel nii akadeemilisel kui ka võrguettevõtete tasandil.

Harmoonikute mõju uurimiseks on enam hakatud tegema erinevaid mõõtmiseid, hindamaks nende mõju võrgule. Lisaks on suurenenud huvi ka elektrisüsteemides harmoonikute modelleerimise vastu. Oluline sealjuures ei ole teada ainult harmoonikute mõju võrgule, vaid paljude uuringute eesmärgiks on koostada mudel, mida saaks kasutada harmoonikute mõju täpsemaks uurimiseks tulevikus. Antud lõputöö annab modelleerimise teostamiseks alusinformatsiooni, mille põhjal on hiljem võimalik teostada mudelite ülesehitust ning neid valideerida. Autor annab numbrilised (voolu -ja pinge moodulid ja nurgad) väärtused, mille põhjal saab tulevikus koostada Eesti põhivõrgu (ja ka teiste samalaadsete võrkude) harmoonikute mudeleid.

Lõputöö autori eesmärgiks on antud töö jaoks saada teada Eestis kasutatavate alalisvooluühenduste pinge- ja voolu harmoonikute karakteristikuid. Oluline on saada ülevaade Eesti-Soome vahel töötavatest (Estlink 1 ja Estlink 2) alalisvooluühenduste hetkeolukorrast, leides kõige probleemsemad harmoonikud erinevates olukordades. Saadud andmeid on võimalik tulevikus kasutada modelleerimiseks. Antud teaduslik töö annab vajalikud teadmised energeetika sektoris töötavatele spetsialistidele ja teadlastele, töötamaks välja arvutusmudeleid, kasutades töös toodud mõõtmistulemusi.

Töö esimeses peatükis antakse teoreetiline ülevaade harmoonikutest elektrisüsteemis. Rõhutatakse elektrikvaliteedi tähtsust elektrivõrgus. Antakse ülevaade harmooniku mõistest ja mõjust elektrivõrgus ning nende analüüsimise metoodikast. Arutatakse, mis on harmoonikud, nende mõjud ja hindamine. Lisaks vaadeldakse vaheharmoonikute olemust ja kuidas erinevate filtritega on võimalik vähendada harmoonikute kulgemist. Täiendavalt kirjeldatakse alalisvooluühenduste muundureid ja nende eripärasid ning

antakse ülevaade harmoonikute modelleerimisest. Tutvustatakse erinevaid mudeleid, meetodeid ja modelleerimisega kaasnevaid probleeme.

Teises peatükis käsitletakse Eesti alalisvooluühenduste harmoonikute karakteristikute mõõtmist. Tutvustatakse kahte alalisvoolu ühendust, millistes on lõputöö autor teaostanud mõõtmised. Antakse ülevaade mõõteahelast, katsete läbiviimisest ja kasutatud mõõteseadmest. Lisaks antakse ülevaade ka mõõtmistulemuste analüüsi meetodikast keskendudes käesoleva töö raames kogutud andmete analüüsimisele lõputöö eesmärke arvestades. Sealjuures kirjeldatakse mõõtmistulemuste erinevaid visualiseerimise võimalusi lähtudes informatsiooni mahu eripäradest.

Kolmandas peatükis esitatakse läbiviidud mõõtmiste tulemused pinge -ja voolu harmoonikute suhtes eraldi. Vaadatakse eraldi kahte alalisvooluühenduse objekti Eesti ja Soome vahel, arvestades nende tehnoloogiate eripärasid. Estlink 1 puhul hinnatakse lisaks võimsusvoo suuna mõjudele ka sageduse reguleerimise funktsiooni mõju tuues välja ka ülevaate probleemsematest harmoonikutest. Seejärel uuritakse Estlink 2 voolu ja pinge harmoonikuid mõlemal suunal ning antakse Estlink 1-ga sarnane ülevaade probleemsetest harmoonikutest. Arvestatakse nii aktiiv- kui reaktiivvõimsuse mõju olenevalt alalisvooluühenduste võimalustest.

Mõõtetulemuste analüüsi põhjal on koostatud nii moodulgraafikud kui nurgagraafikud, mis on aluseks modelleerimise teostamiseks. Tuuakse välja uurimistöö autori poolne analüüs tulemustest ja antakse suunised, millele tuleks enam tähelepanu pöörata tulevikus modelleerimise läbiviimiseks. Lõputöö tulemuste kirjeldamiseks on toodud välja spetsiifiliste harmoonikute (1-50 järk) karakteristikud erinevatele olukordadele.

1. HARMOONIKUD ELEKTRISÜSTEEMIS NING NENDE MODELLEERIMINE

Käesolevas peatükis esitatakse ülevaade elektrikvaliteedist ja selle tähtsusest elektrivõrgus. Täpsemalt kirjeldatakse harmoonikuid, mis neid põhjustab ning kuidas neid vähendada. Seletatakse lähemalt harmoonutusteguri THD (*Total harmonic distortions*) olemust, vaeharmonikuid ning harmoonikute filtri põhimõtet. Samuti antakse ülevaade muundurite süsteemidest ning nende erinevatest tüüpidest. Lõpuks analüüsitakse modelleerimist ning kirjeldatakse erinevaid mudeleid.

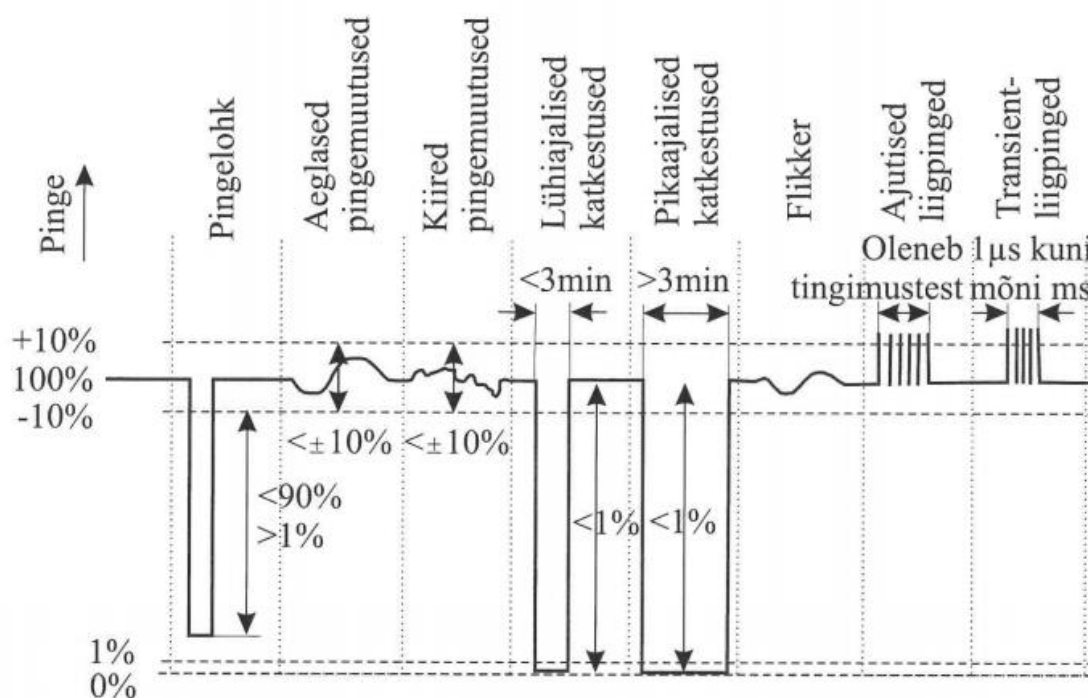
1.1 Elektrikvaliteet

Elektrikvaliteet on oluline teema klientidele elektrisüsteemis, seadmete tootjatele ja teenuse pakkujatele. Üldiselt elektrikvaliteet on nõuete ja piirangute kokkulepe, mis võimaldab elektrisüsteemis töötada usaldusväärselt, turvaliselt ja pideva hea kvaliteediga elektriga ilma täiendavate kadudeta. Elektrikvaliteedile on hakatud rohkem tähelepanu pöörama viimastel aastatel seoses suurel määral jõuelektroonika seadmete lisandumisega. Seda eelkõige põhjusel, et jõuelektroonika seadmed on tundlikud elektrikvaliteedile ja harmoonikutele ning nad mõjutavad oluliselt ka võrku. Elektrivõrgu seisukohast on olulised alalisvooluühendused ja ka muud konverterseadmetel põhinevad paigaldised (nt. tuuleelektrijaamad, päikeseelektrijaamad jms). Mitmes Euroopa riigis nt Iirimaa, kus oluline osa elektri toodangust tuleb tuuleelektrijaamadest ja kus on oluline roll alalisvooluühendustel teiste süsteemidega, on hakatud tähelepanu pöörama elektrikvaliteedi jälgimisele ja analüüsimisele, sealjuures hinnatakse suures osas harmoonikute mõju võrgule.

Elektrikvaliteedi all mõistetakse elektritarbijate elektrivarustuskindlust ja talitusparameetrite vastavust nimisuurustele. Elektrikvaliteet mõjutab majanduslikult elektrisüsteemi, võrguettevõtete seadmete ja kõigi elektritarbijate tööd. Tuginedes allikatele [1],[2] võivad erinevatest põhjustest tekkinud toitekatkestused (planeerimata- avariilise iseloomuga, tormid jne) ja pinge kõikumised vähendada toodangut ja põhjustada praaki, mis omakorda võivad tekitada suuri rahalisi kahjusid. Tarbijate poolt genereeritud häiringute eemaldamine nõuab võrguettevõtelt investeringuid ja käidukulude kasvu. Tänapäeval on tõusnud tööstuses elektroonika ja automaatika osakaal - märkimisväärselt on suurenenud infotehnoloogia tähtsus. Vaieldamatult kõik elektroonikaseadmed on suuremal või väiksemal määral tundlikud toitepinge häirumisele,

kuid on ka ise häiringute allikaks. Elektrikvaliteet mõjutab suurel määral seadmete töökindlust, eluiga, kasutegurit, stabiilsust, valeoperatsioonide teket, rikkeid jm. Elektrienergia tarnijale on pikkade katkestuste tõttu andmata ja saamata jäänud elektrienergia maksumus suur kulu ning kvaliteedinõuetele mittevastav toitepinge võib kahjustada tarbijate erinevaid seadmeid ning põhjustada liigseid toitepinge kadusid.

Elektrikvaliteedi hindamisel tuleb võrrelda reaalselt pinget ideaalse pingega. Viimane peab vastama normdokumentides piiritletud väärtustele. Eestis kehtestab elektri kvaliteedistandardid Eesti Standardikeskuse standard EVS-EN 50610:2010 [3]. Elektrivõrgu kvaliteeti võivad mõjutada mitmesugused häired, näiteks rikked, lülitused, looduslikud nähtused, mis tekitavad ideaalse toitepinge parameetrite kõrvalekaldumisi. Alljärgnevalt on illustreerivalt toodud joonisel 1.1 olulisemad elektrikvaliteedi näitajad ja nende iseloomulikud omadused. Antud joonisel on näha, et vertikaal teljel on protsentides pinge kõikumisi normaal talitus pinge ümber ja horisontaal teljel on erinevad pinge suurust iseloomustavad olukorrad.



Joonis 1.1. Elektri kvaliteedi näitajad [1]

1.2 Harmooniku mõiste ja olemus

Elektrikvaliteedi tagamiseks on üks peamisi väljakutseid harmoonikud. See nõuab harmoonikute kontrollimisel hoolikat analüüsi ja piiritlemist vastuvõetava tasemini. Huvi harmoonikute mõju vastu sai alguse 1990-ndate aastate alguses seoses kõrgepinge

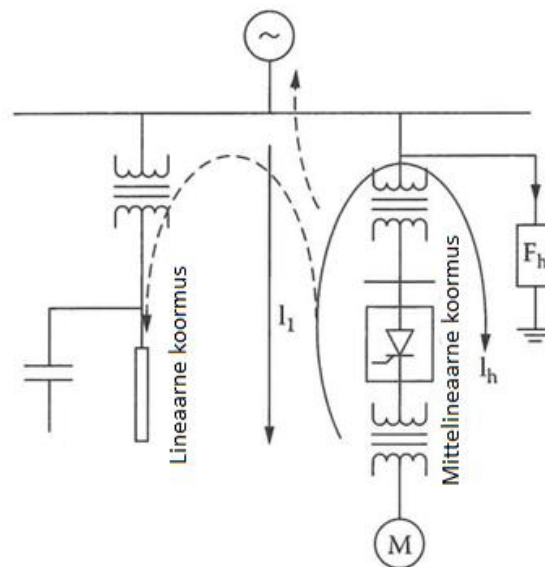
alalisvoolu süsteemide ja staatiliste reaktiivvõimsuste kompensatorite kasutusele võtmisega [4]. Mõiste „harmoonikud“ pärineb akustika valdkonnast, kus see on seotud nõõri või õhusamba vibratsiooniga sagedusel, mis on baassageduse kordne. Vahelduvvoolu toitesüsteemi harmooniline komponent on määratud, kui perioodilise lainekuju sinusoidne komponent, mille sagedus võrdub süsteemi põhisageduse täisarvuga [5]. Harmoonikud on sinusoidsed pinged või voolud, mille sagedused on täisarv kordajad põhisagedus võrgus. Täisarvude amplituud on tavajuhtudel suhteliselt madal [6].

Harmoonikud on energiasüsteemides eksisteerinud palju aastaid. Elektrisüsteemide lühike ajalugu näitab seda, et harmoonikute komponentide või mitte-sinusoidsete komponentide lainekujud elektrivõrkudes on nähtavad juba vahelduvvooluvõrkude algusest peale. Tänapäeval kasvab harmooniku küsimuste keerukus elektrivõrkude muutudes üha enam küllastunud mittelineaarsete koormustega. Harmooniku moonutatud mõju koormuse võrgupingele ei piirdu ainult koormuse enda omadustega, vaid on tugevalt mõjutatud võrgu „tugevusest“ ehk teisisõnu võrgu iseloomuliku takistuse võrgust [6].

Harmoonikuid põhjustavad üldiselt mittelineaarsed seadmed, nimelt trafod, pöörlevad masinad, elektri keskkütteahi, päevavalguslambid, elektroonilised juhtseadised ja türistoriga juhitud seadmed [7]. Jõuelektronika seadmete üha suurem integreerimine ülekandevõrkudes põhjustab harmooniku reostust ja moonutatud faasipingeid ja -voolusid, täiendavaid energiakadusid ja ülekuumenemist seadmetes. Madalama impedantsi tõttu kõrgemal sagedusel või koos teiste induktiivsete elementidega resonantsil, võib harmooniku vool suurene dramaatiliselt, mis omakorda aitab kaasa täiendavatele soojuskadudele ja võrguelementide eluea vähenemisele [6]. Mittelineaarsete seadmete mõju kontrollimiseks ja teatavate harmoonikute olukordade analüüsimiseks viiakse läbi harmooniku uuringuid. Nende eesmärk on resonantsi tuvastamine ja moonutustegurite arvutamine.

Harmoonikuid tekitavad mitte ainult mittelineaarsed elektrooniliselt juhtivad koormused, vaid ka tavalised jõuseadmed, näiteks trafod, mootorid ja generaatorid. Näiteks tekivad harmoonikud magnetahelate küllastustumisega normaalse töö korral ja transientide vaheldumisega elektrivõrgus[4]. Kuna enamusele elektriseadmetele on määratud sagedust iseloomustavate parameetrite alusel, põhjustavad harmoonikud suurenenud kadusid lisandumist ja kokkuvõttes on piiratud seadmete töö alla nende nimiväärtuse. Need kaod on seotud mittelineaarsete koormuste töötamisel tekkiva mähiste ja elektriahelate üleliigse soojenemisega. Lihtsamalt vaadates võib harmoonikute poolt põhjustatud kadusid pidada soojuse hajumise erinevuseks kahe sama suurusega paralleelse koormuse - ühe lineaarse ja teise - mittelineaarse vahel, kui need juhitakse samast allikast. Joonis

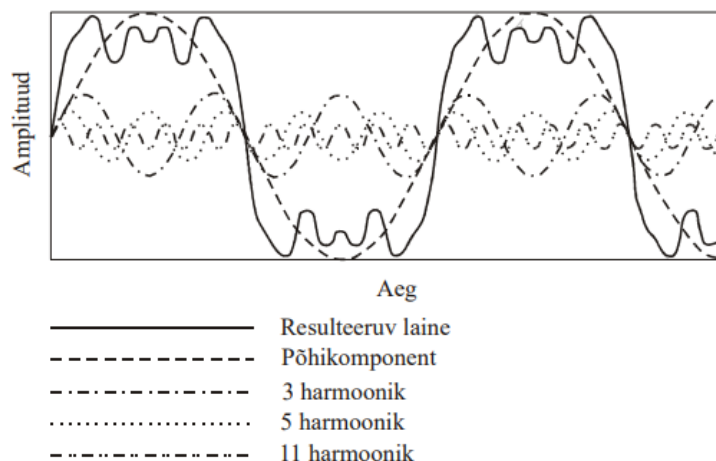
1.2 käsitleb seda mõistet. I_h on harmooniline vool, mis tekitab lisakadusid. Joonisel vasakul on lineaarne koormus ja paremal mittelineaarne koormus. Mittelineaarne koormus on muutuva sagedusega ajam, mida siin sümboliseeritakse lihtsuse mõttes just türistorina [5].



Joonis 1.2 Harmoonilise voolu jaotus mittelineaarsest koormusest, mis mõjutab külgnevat rajatist [5]

Ettekujutus harmoonikutest põhineb Fourier' teisendusel, mille kohaselt igasugust perioodilist funktsiooni on võimalik kujutada reana. Prantsuse matemaatik J.B.J. Fourier (1758-1830) näitas, et suvalisi perioodilisi funktsioone saab tähistada harmoonikut seotud sagedustega sinusoidide lõpmatu reaga. Fourieri analüüsi kasutatakse harmoonikute mõõtmistel [4]. Täpsemalt koosneb see erineva sagedusega siinuseliselt muutuvatest komponentidest, millel on iseloomulik amplituud, sagedus ja faasinurk. Põhikomponendi sagedus elektrivarustuses on 50 Hz. Kasutusel on mõisted: paaritud, paaris- ja vaeharmonikud (siinuslaine sagedused on vastavalt paaritud ja paarisarv täiskordsed põhiharmonikud sagedusega ning siinuslaine, mille sagedus ei ole põhiharmoniku täisarv kordne) [8].

Elektriliste suuruste käsitlemisel nimetatakse erinevaid komponente põhi- ja kõrgemateks harmoonikuteks. Erandjuhtudel esinevad ka vaeharmonikud ja alaliskomponent. Joonisel 1.3 on näide moonutatud lainekujust, kus põhiharmoniku kõrval on lisaks kolm kõrgemat harmoonikut paaritu järjekorranumbriga $H= 3, 5$ ja 11 [1].



Joonis 1.3 Moonutatud lainekuju näide [1]

Harmoonikuid iseloomustatakse tavaliselt harmooniliste väärtuste harmooniku moonutuse teguri (THD) abil. Harmoonutustegurit (THD) kasutatakse enamasti pingemoonutuste kirjeldamiseks, kuna pingepõhikomponent muutub ainult paari protsendi ulatuses. Vooluharmoonutusteguri kujutamine on võrdlemisi keeruline, kuna erinevalt pingest on voolu väärtus liitumispunktis mõnevõrra muutuv. Väikeste voolude korral võivad moonutused olla suured, kuna vooluharmoonikute emissioonid ei sõltu suurel määral genereeritavast ega tarbitavast võimsusest, mis aga ei avalda ohtlikku mõju elektrivarustusele [1].

Harmoonimoonutustegur (THD) on oluline indeks, mida kasutatakse laialdaselt energiakvaliteedi probleemide kirjeldamiseks ülekande- ja jaotussüsteemides. Sellega arvestatakse iga üksiku harmooniku komponendi panust. [5] Kõrgemate pingepinge- ja vooluharmoonikute poolt põhjustatud moonutus toitepinges ning võrgupingetes on võimalik hinnata harmoonimoonutus teguriga THD [8], mida arvutatakse valemiga 1.1 ja 1.2. See tähendab, et signaalide, sealhulgas harmoonikute ja ainult põhisageduste arvestavate signaalide suhe määratleb kogu harmooniku moonutuse.

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n U_h^2}}{U_1} \quad (1.1)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_1} \quad (1.2)$$

kus n – hinnatava harmooniku kõrgem järk,
 U_1 – pingepinge, V,
 I_1 – vool, A,
 h – harmooniku järk.

Valemite 1.1 ja 1.2 kasutatava pinge ja voolu väärtused on ruutkeskmistatud väärtused. Ruutkeskmist väärtust kasutatakse laialdaselt elektroenergeetikas ning arvutatakse vastavalt standardile [9]. Antud lõputöös on vaja leida rms väärtused, sest sellest lähtutakse mõõtmistulemuste analüüsimisel. Ruutkeskmise väärtused saadakse valemiga 1.3 [5]:

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int f^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^n F_h^2} \quad (1.3)$$

kus F_{rms} - ruutkeskmise funktsioon F ,
 T - periood.

Harmonikute taseme hindamiseks kasutatakse ühe nädalase mõõtevahemiku 10-minutilisi pinge efektiivväärtuse keskväärtusi. Saadud tulemused peavad 99 % juhtumil olema väiksemad, kui tabelis 1.1 toodud väärtused. Pinge harmooniliste tegur THD kuni 40-nda järguni ei tohi ületada 3 % [8].

Tabel 1.1 Kõrgemate harmoonikute pingete (kuni 25-nda järku) lubatavad väärtused nimi-pinge suhtes 110 kV värgus [8]

Paaritud harmoonikud				Paarisharmoonikud	
3-ga jagumatud		3-ga jaguvad			
Järk h	Suhteline pinge uh,%	Järk h	Suhteline pinge uh,%	Järk h	Suhteline pinge uh,%
5	3	3	3	2	1
7	2,5	9	1,5	4	0,7
11	1,7	15	0,5	6	0,5
13	1,7	21	0,5	>6	0,3
17	1,2	>21	0,3		
19	1,2				
23	0,8				
25	0,8				
>25	0,5				

Vooluharmoonikute maksimaalsed väärtused, mida tarbija võib võrku anda on toodud tabelis 1.2. Normitakse harmoonikute voolu I_p . Vool on arvutatud keskmise aktiivvõimsuse ja nimipinge ning võimsusteguri 1 juures liitumispunktis [8] ja seda tehes lähtutakse valemist 1.4.

$$I_p = \frac{1}{1000} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^n (p_h \cdot I_h)^2} \quad (1.4)$$

kus

I_h – h harmooniku faasivool
 h – harmooniku number
 N – harmoonikute koguarv
 P_h – harmooniku h sageduse kaal

Tabel 1.2 Tarbijatele maksimaalsed lubatud voolu emissiooni väärtused [8]

% tarbija nimivoolust	
Voolu maksimaalne moonutus	6 %
Faasivoolu psohomeetriline väärtus	5 A
Voolu vastujärgnevuskomponent	20 %

Vooluharmonikute puhul tuleb jälgida lubatavaid piiremissioonide väärtusi püsiolukorras. Tabelis 1.3 on esitatud paaritute vooluharmonikute lubatavad piiremissioonid, kus tähelepanu tuleb pöörata sellele, et samas sagedusvahemikus paaris vooluharmonikute piiremissioonid ei tohi ületada 25 % antud tabelis esitatud väärtusi [8].

Tabel 1.3 Paaritute vooluharmonikute lubatavad piiremissioonid [8]

Harmoniku järk	Vooluharmonikute piiremissioonid voolutugevuse suhtes %
$h < 11$	4,0
$11 \leq h < 17$	2,0
$17 \leq h < 23$	1,5
$23 \leq h < 35$	0,6
$35 \leq h < 50$	0,5
Harmonikute summaarne moonutustegur (THD)	5,0

Vaeharmonikuteks nimetatakse kõrgemate harmoonikute vahel oleva sagedusega siinuspinget, mille sagedus ei ole põhiharmoniku suhtes täisarvkordne.[8] Vaeharmonikuid saab tekitada, kui sagedus pole põhisagedusega sünkroniseeritud, mis võib juhtuda madala ja kõrge sagedusega lülitamisel [4].

Elektrisüsteemi vaeharmonikuid põhjustavad enamasti kaks üldist nähtust. Esimene on kiired mitteperioodilised voolu ja pinge muutused, mis on põhjustatud siirdeseisundis (ajutiselt) töötavatest koormustest või kui juhtimiseks on rakendatud pinge või voolu amplituudi modulatsioon. Need muudatused võivad olla üsna juhuslikud või sõltuvalt kasutatavast protsessist ja juhtelementidest järjekindel. Voolutugevuse või faasinurga

muutused võivad luua ka kaasnevaid põhisagedus komponente ja selle harmoonikuid vaheharmoonikute sagedustel [10].

Teiseks vaheharmooniku allikaks on staatilise muunduri lülitamine, mis pole toitega süsteemi sagedusega sünkroniseeritud (asünkroonne lülitamine). Türistorlülitiga muundurid lülitatakse sisse juhtivusrežiimis ja jätkakse juhtimist seni, kuni nende vool langeb alla selle hoidevoolu. Keerates välja sama tsüklis pinge, sünkroniseeritakse türistoriseadmed toitesüsteemi sagedusega, mis ei produtseeri vaheharmoonikuid. Isoleeritud paisuga bipolaarsed transistorid (IGBT) kasutavad muundurites türistoreid, mida saab välja, kui ka sisse lülitada, kuna nende suurem paindlikus võimaldab nii reaktiivset kui ka reaalsel võimsuse reguleerimist ja elektrisüsteemi võnkesummutust. Muundurite asünkroonne lülitamine IGBT-de abil loob vaheharmoonikuid [10].

Suure võimsusega sagedusmuundurite töö nõrkade võrkude puhul põhjustab võrgus harmoonikute pingete suurenemist, millel on negatiivne mõju ühendatud tarbijatele. Tööriikete ja süsteemiriikete vältimiseks tuleb muundurite abil harmoonikute voolu hoida madalal, eelistatavalt lähtepunktis. Selle eesmärgi jaoks saab kasutada süsteeme, mis on spetsiaalselt loodud võrkude madalama reaktsioonide tekitamiseks või passiivsete vooluringide jaoks. Aktiivse sekkumise abil saab olemasolevaid harmoonikuid (ja pingemuutusi) vähendada [12]. Seda tüüpi seadmeid nimetatakse filtriteks ja võrgu toetusseadmeks.

Harmoonikute kompenseerimiseks mõeldud lahenduste hulka kuuluvad, näiteks faaside tühistamine, filtrite kasutamine ja vooluahela seadistamine. Harmoonikute uuringute eesmärgiks on arvutada sõlme pingeharmoonikuid, harmooniliste voolude hargnemist, pinge ja arvutada voolu koguharmoonilisi moonutusi (THD) ning tuvastada resonantstingimusi. [2] Harmoonikute emissioon sõltub muunduri allikatest, rakendatud harmoonikute filtritest ja lühisvoolust PCC juures [4].

Harmoonikute mõju vähendamiseks kasutatakse erinevaid filtreid. Filtrid koosnevad tavaliselt kondensaatoritest ja induktiivsetest komponentidest. Nende ülesanne on vähendada suuri takistusi, kui filtritel on paralleelsed resonantsid või laiendada sagedusvahemikku, milles filtritel on madalad takistused [12]. Harmoonikuid saab tõhusalt vähendada passiivfiltri abil, mis koosneb põhimõtteliselt kondensaatori ja reaktori kombinatsioonist, mis on häälestatud kindlale harmoonilisele sagedusele. Filtrid tekitavad harmoonikule, millele filter on häälestatud, madala takistusega „lõksu“ [7]. Teoreetiliselt on filtril häälestamissagedusel nulltakistus, neelates seega kindlaid harmoonikuid.

Passiivsed harmoonikute filtrid (PHF) klassifitseeritakse erinevatesse rühmadesse (jadaühendused, paralleelühendused ja hübriidid). Hoolimata nende puudustest (tugevad konstruktsiooni- ja resonantsnähtused koos võrgu impedantsiga jne) kasutatakse neid laialdaselt tööstuses. Neid saab kasutada jaotussüsteemi kõrge, keskmise ja madala pingega, seda tänu madalamale hinnale, konstruktsiooni lihtsusele ja vajaliku reaktiivvõimsuse kompenseerimise võimele [11].

Aktiivvõimsuse filtrid (APF) ehk inglise keeles *active power filter* on tänu suurepärasele jõudlusele pälvinud palju tähelepanu, kuna parandavad pingetasakaalu, kompenseerivad voolu ja pinge harmoonikuid, kompenseerivad reaktiivvõimsust ja summutavad virvendust, et vähendada harmoonikute moonutust ja reaktiivvõimsuse probleeme elektrienergia tööstuses. APF võib vähendada teatud tüüpi energiakvaliteedi häireid, nagu harmoonikuid, reaktiivvõimsust ja tasakaalustamata koormusvooli [11].

APF kasutatakse grupis tasakaalustamata jaotusvõrgus koormuse tasakaalustamiseks, võimsusteguri parandamiseks ja vooluharmooniliste eemaldamiseks. APF-id klassifitseeritakse erinevatesse struktuuridesse [11]:

- Paralleelühendus APF
- Jadaühendus APF
- Hübriid APF

Võttes arvesse kõrgema pingega võrgustruktuuri ja lubatud ühilduvuse taset, tuleb filtri kavandamise ja komponentide valiku abil saavutada võrgu ja filtrimooduli kogutakistus, mille korral harmoonikud hoitakse lubatud ühilduvuse tasemel. Siin peab arvestama, et kriitilised tööpiirkonnad võivad tekkida paralleelsete resonantside tõttu filtrimooduli ja võre vahel ning filtrite all [12]. Lisaks peab filter olema vastupidav ja tundlik parameetrite kõikumiste suhtes, nagu näiteks võrgu lühise võimsuse ja koormuse muutustele. See peab ka alati vastama vajalikele ühendustingimustele.

Filtriüksused on tavaliselt paigutatud mitmesse sektsiooni. See võimaldab häälestada üksikuid filtritasemeid samadele ja erinevatele resonantssagedustele [12]. Põhimõtteliselt on väikseima harmooniku sageduse jaoks ette nähtud spetsiifiline filtri elementidest koosnev vooluring. Edasised kõrgemate harmoonikute filtrid on konstrueeritud järgarvude suurendamise järjekorras. Resonantssagedus valitakse mõnevõrra madalamaks eemaldatavate harmoonikute sagedusest, et vältida ülepinget ja kondensaatori liigseid voolusid. Sobivate sektsioonide kombinatsioonide kasutamisel saab mahtuvuslikku reaktiivvõimsust antud võimsustegurite vahemikus kohandada erinevatele koormusolukordadele.

Passiivne (LC) ehk võimsusfilter mõjutab muunduri harmoonikute moonutusi ja suurendab harmoonikuid, eriti kui see on ühendatud mittelineaarse koormusega. Harmoonikute voogude kontrollimiseks saab kasutada mitut meetodit, näiteks staatiline Var kompenseerimine, harmooniku voolu sissepritse, paralleelselt või jadas asetsevad aktiivfiltrid, magneetilise voo kompensatsioon ja alalisvoolu pulsatsioon. Pinge või voolu harmoonikute vähendamiseks jaotatud energiasüsteemides on parimaks lahenduseks passiivsed energiafiltrid. Kirjanduse põhjal [11] on kolm peamist harmooniku tüüpi, mida tekitavad ükskõik millised jõuelektroonika süsteemid:

- Kõrge järguga harmoonikud
- Elektrivõrgu seadmete lülitusega või nende väljunditest tekkivad harmoonikud
- Madala järgu harmoonikud

Harmoonikud põhjustavad elektrisüsteemi elementides suuremaid kadusid, seadmete kuumenemist, seadmete riknemist võitekitada häireid kaitse-, juhtimis- ja kommunikatsiooniahelates ja klientide koormustes. Samas on mitmeid tehnilisi viise, kuidas vähendada harmoonikute osakaalu[7]:

- Faaside pinge ja voolu kõverate lähendamine normaalkujule toitmemuundurites, mis hõlmab suuremate impulsside arvu muundurite kasutamist.
- Ümberpaigaldamine või kondensaatorpatareide muutmine. Kondensaatoreid saab täiendavalt kujundada teatud harmoonikute filteerimiseks jadareaktori ja takisti lisamisega. Häälstatud harmoonikul on võrdsed reageerimisvõimend kondensaatoril ning reaktoril. Tähelepanu tuleb pöörata, et kondensaator taluks kogupinget.
- Kolmnurk ühenduse kasutatamine generaatori ja trafo poolt toodetud harmooniku voolu takistamiseks elektrisüsteemides. K-reitinguga trafod sobivad disainifunktsioonidega, mis võimaldavad neil töötada harmoonilises keskkonnas.
- Filtrite kasutamine, mis koosnevad põhimõtteliselt kondensaatorist ja reaktorist, mis on häälstatud kindlale harmoonikule.

1.3 Alalisvooluühenduste muundurid

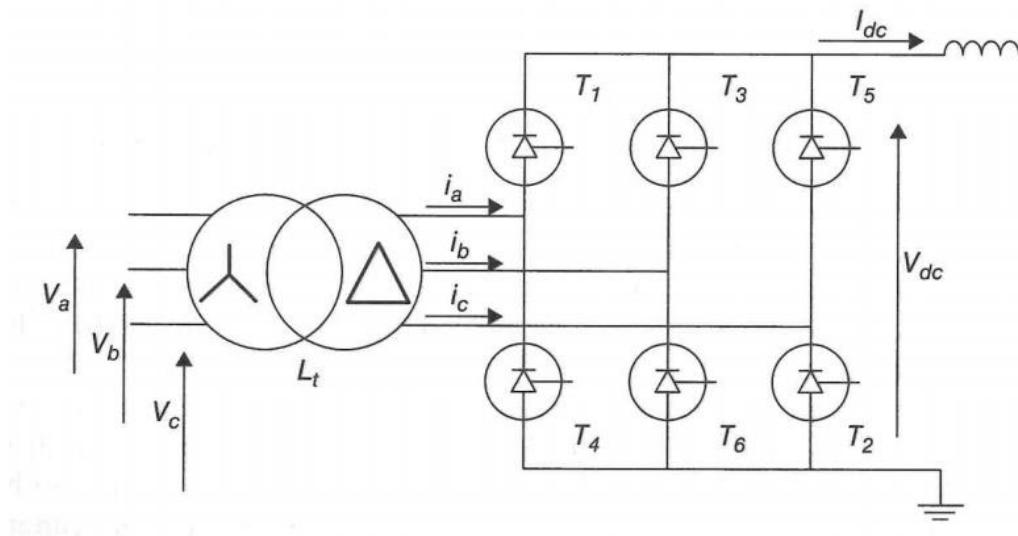
Selleks, et muuta alalisvoolu vahelduvvooluks või vastupidi, on vaja muundureid. On olemas peamiselt kahte tüüpi muundureid: voolumuunduri tehnoloogial põhinev muundur (LCC - *Line commutated converter*) ning pingemuunduri tehnoloogial põhinev muundur (VSC - *Voltage source converter*). Voolumuunduri puhul on pooljuht türistor, mida saab lülitada ainult sisse. Pingemuunduri pooljuht on transistor, mida saab lülitada nii sisse kui ka välja. Voolumuunduri puhul väljundpinge võib olla kummagi polaarsusvõimsuse suuna

muutmiseks, aga pingemuunduri puhul väljundpinge polaarsus ei muutu. Voolumuundur ja pingemuunduri põhiline erinevus on, et voolumuunduri voolu suunda ei muutu [13].

Tabel 1.4 Voolumuunduri tehnoloogial põhinev muundur LCC vs pingemuunduri tehnoloogial põhinev muundur VSC võrdlus [13]

LCC HVDC	VSC HVDC
Kõrge võimsuse võimekus	Madala võimsuse võimekus
Hea ülekoormusvõime	Nõrk ülekoormusvõime
Nõuab tugevamaid AC süsteeme	Töötab nõrgemates AC süsteemides
isekäivitusvõimetus nõuab lisavarustust	Isekäivitusvõimetus
Genereerib harmoonilisi moonutusi, vajatakse AC ja DC harmoonilisi filtreid	Harmoonikuid genereerib ebaolulisel tasemel, seetõttu pole filtreid vaja
Jämedam reaktiivvõimsuse juhtimine	Peenem reaktiivvõimsuse juhtimine
Suurem vahemik, kus domineerivad harmoonilised filtrid	Kompaktne ala, 50-60% LCC ala pindalast
Vajab muunduritrafosid – pidev DC pinge	Tavaliste trafode kasutamine – sümmeetriline monopol
Madalamad jaama kaod	Kõrgemad jaama kaod
Madalamad kulud	Kõrgem hind 10-15%
Suurem töökindlus	Madalam töökindlus, suurema komponentide arvu tõttu
Nõuab MI-kaablite kasutamist	Ideaalne kasutamiseks koos XLPE kaablitega

Voolumuundur kasutab kuue impulsilist silda, mis koosneb kuuest elektroonilisest lülitist, igaüks ühendab ühe kolmest faasist ühega kahest alalisvoolu klemmist. Esimesed alalisvooluühenduste süsteemid kasutasid voolumuunduri konfiguratsioon eranditult. Alles 1990 aastast hakati alternatiivselt kasutama ka pingemuundurit, tänu just uutele isekommuteerivate ja suurte võimsustega lülitite (GTO ja IGBT) olemasolule ja DSP-de arvutusvõimsusele sobivate lülitusmustrite genereerimiseks. Kaasaegsed alalisvooluühenduste ülekandesüsteemid saavad põhilise muundamise tööhoovana kasutada, kas traditsioonilist vooluallika muundurit (LCC) või pingeallika muundurit (VSC) [14]. Konverterjaama südameks on muundur, kus toimub vahelduvpinge muundamine alalispingeks ja vastupidi. Alalisvool tekitatakse pooljuhtelementide (jõutüristoride) taaislülitamise tulemusena. Muundur koosneb 12 ventiilist, milles igaühes on 64 optilise juht impulsiga türistori [15].



Joonis 1.4 Türistor kuue impulsiga AC/DC konverter koos trafoga [15]

Türistorid on pooljuhid, millel on neli erinevat ala kihti [11]. Türistormuundur töötab vahelduvvoolu pool vooluallikana. Täisvõimsuse korral saab kuue impulsiga muunduri silla vahelduvvoolu, nagu on näidatud joonisel 1.4 ja ühendatud Y-Y trafo kaudu, väljendatud Fourier-seeria abil [15]:

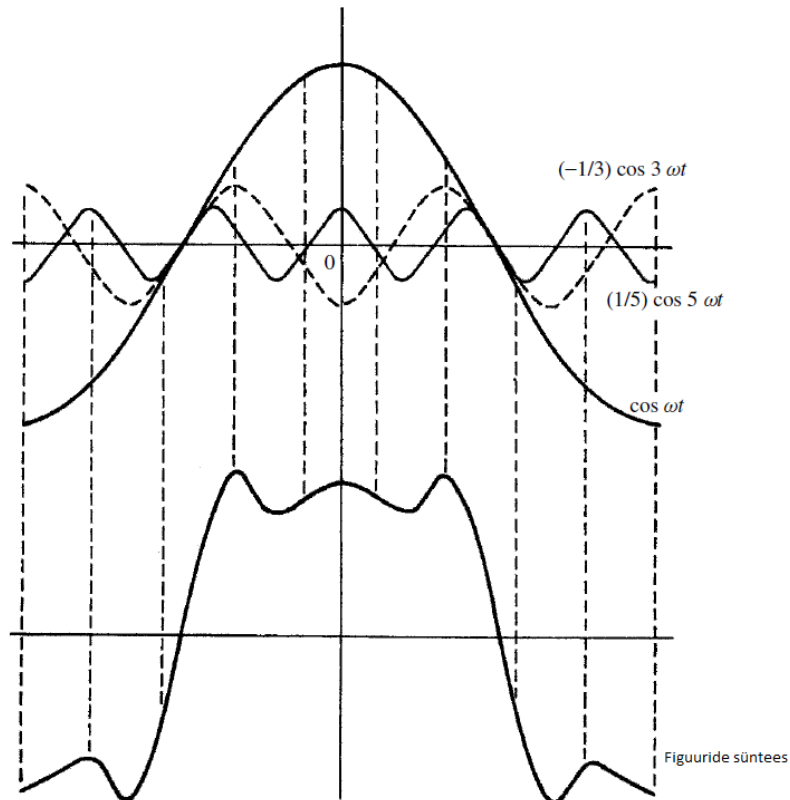
$$I_g = 2 \frac{\sqrt{3}}{\pi} I_{dc} \left[\sin\omega t - \frac{1}{5} \sin 5\omega t - \frac{1}{7} \sin 7\omega t - \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \frac{1}{13} \sin 13\omega t + \dots \right] \quad (1.10)$$

Seda saab ka väljendada teistmoodi [15]:

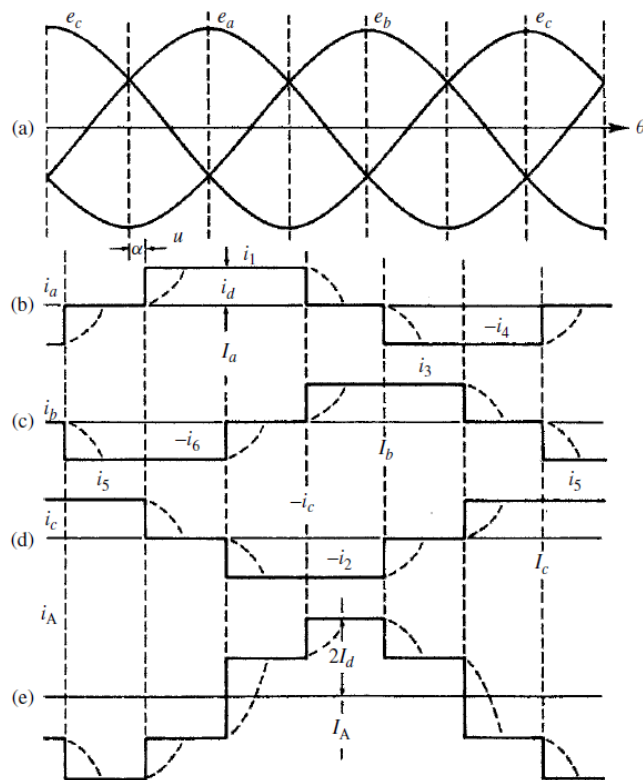
$$I_g = 2 \frac{\sqrt{3}}{\pi} I_{dc} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n\omega t), n = 6k \pm 1, k = 1, 2, 3, \dots \quad (1.11)$$

Järeldatakse, et kõik astme $6k \pm 1$ harmoonikud on esitatud vahelduvvoolu poolel, kus k on mis tahes täisarv. Harmoonikute suurus on pöördvõrdeline harmoonikute järjestusega [15].

Joonisel 1.5 on kujutatud aja-domeeni lainekuju sünteesi ülaltoodud ruutlaine protsessina. Selguse huvides on näidatud kolmas ja viies harmoonik ning toodetud keeruline lainekuju pole seetõttu täielik. Põhiline kuue impulsiga seadistatud kolmefaasilised voolud on näidatud vastavalt joonistel 1.6 (b), (c) ja (d) [16]:

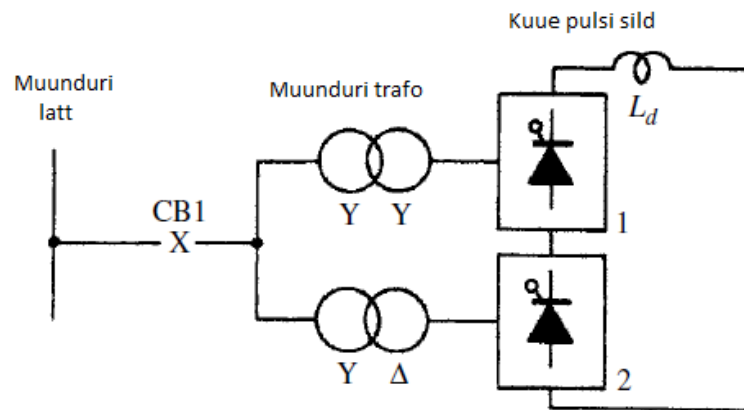


Joonis 1.5 Ruutlaine lainekuju süntees [16]



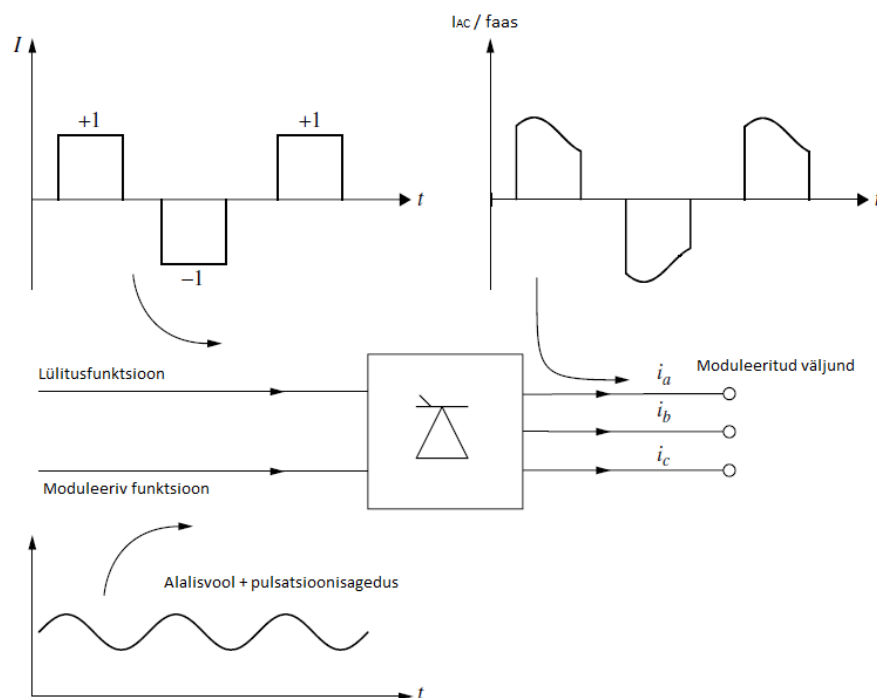
Joonis 1.6 Kuue impulsiga silla lainekuju: (a) faas neutraalsele pingele; (b) - (d) faas voolud muunduri poolel; e) faasivool süsteemi poolel nulljärjestuse pöörlemisega delta-tähtrafoga [16]

12 impulsiga konfiguratsioon koosneb kahest kuue impulssiga rühmast, mida toidetakse kahest kolmefaasilisest paralleelselt trafode komplektist, nende põhipinge on võrdne ja faasinihe 30° ; tavaline 12-impulssiline konfiguratsioon on näidatud joonisel 1.7. Kaheteist impulsiga konfiguratsiooni töö säilitamiseks peavad kaks kuue impulssiga rühma töötama sama juhtimisnurgaga. Seetõttu on põhisagedusvooludega vahelduvvool kahe trafo poolt üksteisega faasis [16].



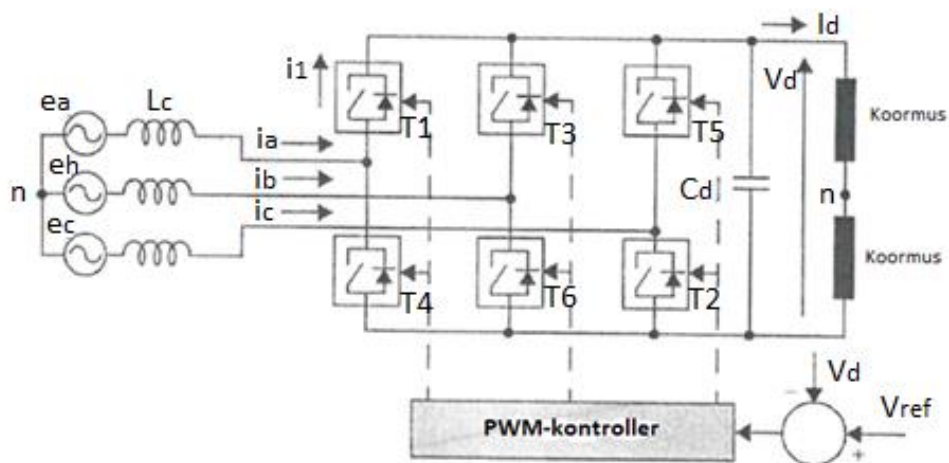
Joonis 1.7 Kaheteistkümnepulssmuunduri konfiguratsioon [16]

Sageduse ristmodulatsioon LCC süsteemi protsessi illustreerib joonis 1.8, mis näitab moduleeritud väljundvoolu vahelduvvoolu konverterilt vastuseks alalisvoolule, mis sisaldab pulsatsioonisagedust. Kommuteerimise kattumisel on ülekandefunktsioonid ristkülikukujulised, nagu on näidatud joonisel 1.8 [16].



Joonis 1.8 vahelduvvoolu modulatsioon ideaalse muunduri lülitamise korral [16]

Pingemuunduri (Voltage source converter) süsteem põhineb ise kommuteerival lülitusel, tavaliselt isoleeritud sissepääsu bipolaarsel transistori (IGBT) tehnoloogial, millel on türistoridega võrreldes mitmeid eeliseid. Automaatkommutatsiooniseadmete kasutamine võimaldab kohaldada kõrgsageduslike (üle 1 kHz) impulslaiuse modulatsiooni (PWM) tehnikaid. PWM-i abil võib VSC sünteesida täielikult kontrollitud vahelduvvoolu pinget, mis võimaldab täpselt aktiiv- ja reaktiivvõimsust juhtida. Antud pinge põhineb põhisageduse siinus harmoonikute lülitussagedustel ja selle korrutisega. Juhtimine on väga kiire ja asjakohase tagasiside korral võib pingeallika muundur reageerida vooluallikana. Suuremate lülitussageduste tõttu on harmoonikud madalamad, seetõttu vähenevad filteerimisvajadused [15].

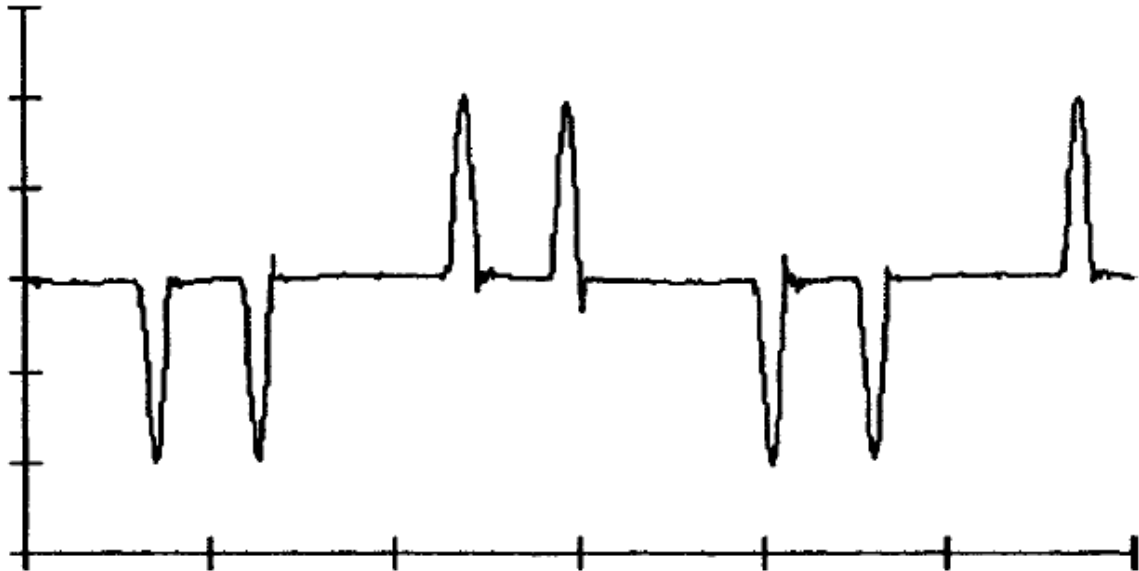


Joonis 1.9 pingemuunduri tööpõhimõtted [14]

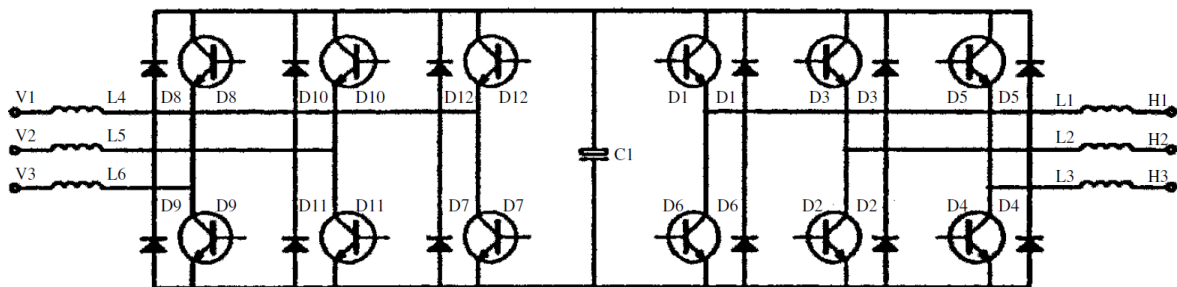
Joonisel 1.9 on näha alalisvoolu kondensaator C_d ja vahelduvvoolupoolne induktiivpool L_c , mis on pinge muundurile vajalikud elemendid. Alalisvoolu pinget V_d jälgitakse ja võrreldakse võrdlusväärtusega V_{ref} , et genereerida tärkesignaali, mis juhib PWM kontrolleri. Kui alalisvoolu vool I_d on positiivne, toimib VSC aladina; alalisvoolu kondensaator tühjeneb, kuna see toidab alalisvoolu koormust ja juhtimissüsteem muudab väljundnurka, et saada toidet vahelduvvoolu süsteemist. Kui alalisvool I_d on negatiivne, toimib VSC inverterina; alalisvoolu kondensaator laaditakse alalisvooluallikast ja juhtimissüsteem muudab väljundnurka toitesüsteemi vahelduvvoolu eksportimiseks [14].

Pingeallika muundurit (VSC) iseloomustab valdavalt mahtvuslik alalisvoolu muunduri pool ja induktiivne vahelduvvoolu süsteem. Nendes tingimustes on alalisvoolu pinge hästi määratletud, samas vahelduvvoolu külgvoolusid juhitakse muunduri modulatsiooniprotsessi abil. Lihtsaim VSC konfiguratsioon on kuue impulssiga diodsild suure kondensaatoriga väljundklemmide vahel. Selles vooluringis laetakse kondensaator

iga pooltsükli jooksul toitesageduse kahe lühisvooluimpulsi abil, nagu on näidatud joonisel 1.10. Vastav harmooniku sisaldus võib ulatuda kuni 90% (5-s), 80% (7-s), 75% (11-s) ja 70% (13-s) [16].



Joonis 1.10 pingemuunduri harmooniku voolu lainekuju [16]



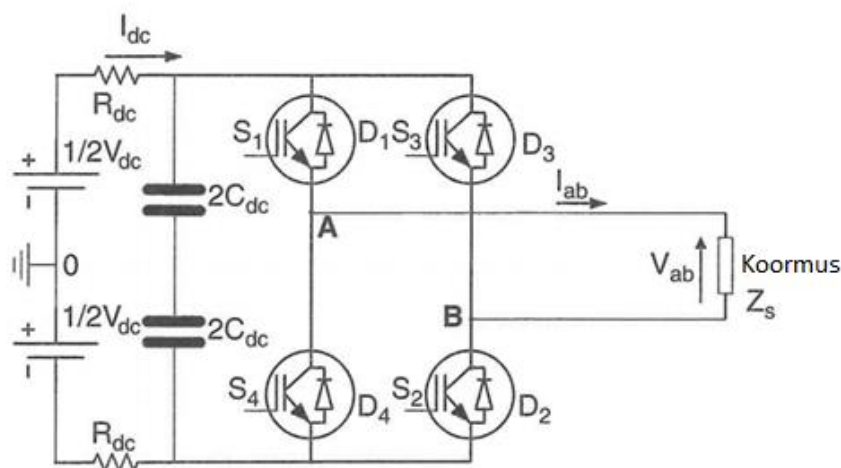
Joonis 1.11 Pingesallikaga alaldi muunduri kaskaad [16]

Kui muunduril on vaja muuta alalisvoolu küljkondensaatori pinget, siis tuleb diodid asendada kontrollitavate alalditega. Veelgi enam on mõeldud, et kui kahe-suunaline võimsus liigub, peavad lülid blokeerima ühesuunalise pinget. Samas peavad olema võimelised juhtima voolu mõlemas suunas. Seda tüüpi muundurid sobivad vahelduvvoolu mootorikäitamiseks, sest nii vahelduvvoolu süsteem ja mootorikoormus on valdavalt induktiivne. Tüüpiline pingesallikaga alaldi / inverter kaskaad on näidatud joonisel 1.11 [16].

Suure võimsusega automaatne kommuteeritud pingesallika muundurit (VSC) saab ehitada lülite abil ühest järgnevatest toiteseadmete grupist: 1) isoleeritud pais bipolaartransistor

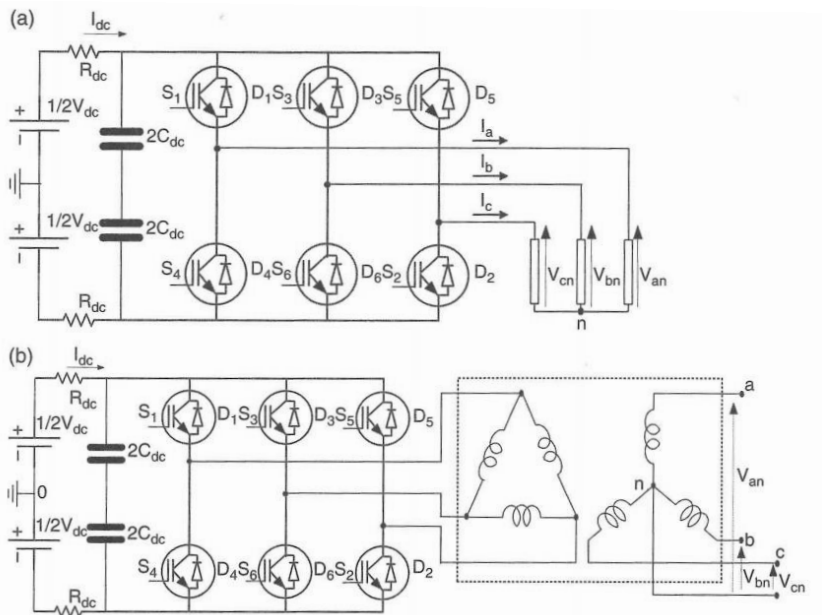
(IGBT) või sissepritsega suurendatud paistransistor (IEGT) ja 2) integreeritud väravkommuteeritud türistor (GCT). IGBT-d on asümmeetrilised seadmed (neil pole pöördblokeerimise võimalust) ja seetõttu ei saa neid vooluallika muundureid kasutada. Kõrge voolutugevusega IGBT-d kasutavad kõrge voolutugevuse saavutamiseks seadme sees paralleelselt mitut p-n ristmikku. Positiivne temperatuurikoefitsient ja ühe juhi kasutamine võimaldavad sisemist paralleelsust [15].

Ühefaasiline VSC muundur on näidatud joonisel 1.12. Muundur koosneb neljast lülitist (IGBT) (S_1 - S_4) ja neljast paralleelsest diodist (D_1 - D_4), kus iga diod on ühendatud paralleelselt IGBT-lülitiga, et kaitsta lülitit ja tagastada vool toiteallikale, kui vool pole pingega samas faasis [15].



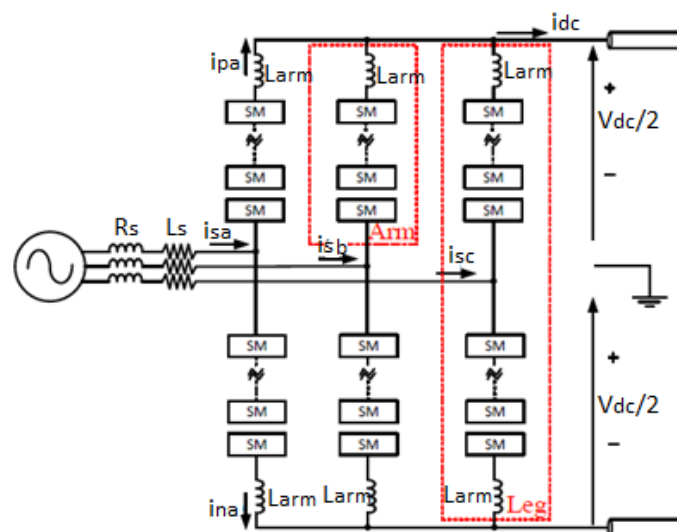
Joonis 1.12 Ühefaasiline pingemuundur [15]

Tavaliselt kasutatakse suure võimsusega rakenduste jaoks kolmefaasilisi muundureid ja pinge muunduri topoloogia on näidatud joonisel 1.13a. Kui on vaja eraldamist, nagu tavaliselt ülekanderakendustes, ühendatakse muundur delta-täht trafo kaudu, nagu on näidatud joonisel 1.13b. Trafo lekke induktiivsus võiks sel juhul toimida liidese induktiivsena. Selles allikas on deltapoolsel kolmejuhtmelistel süsteemil ainult kaks iseseisvat mõõdet ja nullvool ei saa voolata, mis muudab juhtimise lihtsamaks. Puuduseks on nõue kuluka, raske ja mahuka trafo jaoks [15].



Joonis 1.13 Kahetasemelised muundurite allikas: (a) kolmeharuline tavaline muundur ja (b) delta tähtmuunduriga liidestatud muundur [15]

Joonisel 1.14 on näha Multilevel VSC konverter skeemi, milles on üles ehitatud kolm jalga (Leg). Mõlemal jalal on kaks haru. Iga haru koosneb jällegi induktiivsusest ja kuni sadadest seeriaga ühendatud alammodulitest. Joonisel 1.14 paikneval skeemil inglise keelse tähisega „Arm“ oleva ruudu induktiivsused piiravad alalisvoolu lühise rikkevoolu ja ringlevat voolu. „Arm“ tähistab faasi poolsuse lüliti moduleid ja „leg“ kogu faasiõla lülitit. Iga alammootor sisaldab oma iseseisvat salvestuskondensaatorit. Arvestades „Arm“ voolu suunda ja alammodulite lülitussignaali, sisestatakse iga alammoduli kondensaator Arm või minnakse sellest mööda [17].



Joonis 1.14 Multilevel pingemuunduri põhistruktuur [17]

1.3 alapeatükis käsitleti kahte põhilist alalisvooluühendus edastustehnoloogiat. Jõuelektroonikas on konverteri ehitusplokk ja nende tehnoloogiad sõltuvad muunduri topoloogiast ja nende valmistamiseks kasutatud pooljuhtidest. Voolumuundur on kõrgeima võimsusega ja talub paremini rikkeid. Kuid võimsuse juhtimiseks, paindlikkuseks ja kõrgeks efektiivsuseks on pingemuundur parem. Voolumuunduril põhinevad konverterid muutuvad tänapäevase trendiga üha populaarsemaks. Pingemuunduri tehnoloogia paranemisega kaasnevad eelised mistõttu võib turuosa lähiajal suureneda just taastuenergia sektoris.

1.4 Modelleerimine

Viimastel aastakümnetel on jõuelektroonika (PE) kasvav levik ülekandevõrkudes, sealhulgas tootmise- ja salvestamise tehnoloogiate seas, suurendanud vajadust harmoonikute mõju analüüsimisele ja uurimisele, eelkõige harmoonikute kompenseerimise võimaluste vastu. Võrgu jõudluse realistlikuks hindamiseks ja harmoonikute kompenseerimise vajaduse rahuldamiseks on vaja kogu võrgu asjakohast mudelit. Mudeli koostamine aitab elektrisüsteemi ettevõtetal ennustada tulevikuks erinevaid olukordi hindamaks harmoonikute taset ja lahendada võimalikke probleeme, mis võivad võrgus esineda. Harmoonikute analüüsi korral on süsteemikomponentide õige modelleerimine otsustava tähtsusega, et tagada täpne ja usaldusväärne harmooniku moonutuste tulemuste.

Harmoonikute koormusvoolu analüüside tegemisel on väga oluline harmooniku generaatorite allikate modelleerimine ja iseloomustamine. Üldiselt harmoonikute uuringus kasutatud mudelid ja nende parameetrid sõltuvad uuringu eesmärgist, konkreetse seadme omadustest ja kirjeldavate andmete täpsuse tasemest [17]. Jõuelektroonika seadmete elektromagnetilised mudelid nõuavad kõige rohkem elektriliste elementide põhjalikku modelleerimist, mis on hädavajalik elektriseadmete nõutava täpsuse tagamiseks. Üksikute elektrikomponentide modelleerimise lähenemisviis võib erinevatel mudelitel erineda, kuna ühte seadet saab modelleerida mitmel viisil.

Harmooniliste allikate kõige levinum mudel, mida kasutatakse harmoonikute uuringute jaoks, hõlmab koormuste mittelineaarset modelleerimist vooluallika abil iga harmooniku sageduse jaoks. Selle meetodi abil saadakse võrgus arvutatud pinge moonutuse asjakohane täpsus kogu süsteemis [18].

1.4.1 Meetodid

Harmoniku mõjusid kirjeldavaid teoreetilisi meetodeid saab jaotada järgnevalt [19]:

- a) alalisvoolu sissetulek;
- b) harmoniku vooluhulk;
- c) korduv harmoniku analüüs;
- d) kogu süsteemi eksperimentaalne analoogmodelleerimine;
- e) kogu süsteemi ajadomeeni modelleerimine.

Esimesel kolmel meetodil on ühine mõju vahelduvvoolusüsteemis võrrandite esitamisele ja lahendamisele sagedusdomeenis. Mudelid b) ja c) on iteratiivsed, kuid eelkõige kasutab mudel b) Newtoni-Raphsoni algoritmi ja mudel c) Gaussi – Seideli algoritmi. Nende pakutud kombinatsioon sisaldab mõlemat tüüpi algoritme. Otsene sisestamisemeetod suudab arvestada tasakaalustamatusega, kuid mitte muundurite vahelist interaktsiooni. Harmoniku vool oskab arvestada muundurite vastastikust mõju, mis võtab arvesse tasakaalustamatus ja muid mitte-ideaalseid tingimusi. Lahendusprobleeme võib tekkida meetodite b) ja c) juures. Ülejäänud kaks mudelit d) ja e) analüüsivad kumbagi süsteemi komponenti või alamsüsteeme samaväärsete vooluahelate juures ajadomeeniga. Väikese energiatarbega analoogmudelid või ajadomeeni mudelid võivad põhimõtteliselt anda mis tahes soovitud üksikasju. [19]

Erinevad harmoniku tööriistad on: ajadomeeni simulatsioon, sagedusala simulatsioon, analüütiline analüüs ja mõõdud. Suure hulga mittelineaarsete vooluahelate korral määratletud harmoonilised teisendused näitavad, et ükski analüüsimiseks saadaval olev tööriist pole täiuslik. Ajadomeeni simulatsioon sobib põhimõtteliselt terviklikuks muundurite ja muude mittelineaarsustega süsteemi uuringuks. Kuid see nõuab kõigi seadmete väga üksikasjalikku käsitlemist ja alamsüsteeme, eriti puudutab see muundureid ja SVC seadmeid. Kokkuvõtlikult koostatakse suur süsteem, mis on jaotatud väiksemateks muundurite ja FACT- s simuleerimiseks vajalikeks aja sammudeks. Simulatsioonid saavad olema väga mahukad ja aeganõudvad, seega isegi kõige võimsamad praegu saadaval olevad arvutid võivad mitte suuta pakkuda soovitud resultate. Lisaks tuleb arvestada, et ajadomeeni simulatsioon saab teha ainult üks juht korraga. Eriti kui otsida resonantsiprobleeme, tuleb kogu vooluahel häälestada, arvestades vastastikmõju päri -, vastu- ja nulljärgnevuse vahel. Pealegi võib resonantsi harmoonikute ülesehitamine võtta üsna kaua aega, eriti kui on tegemist trafo „küllastusega“. Seetõttu ei ole otstarbekas kajastada kõiki olukordi kogu ulatuses

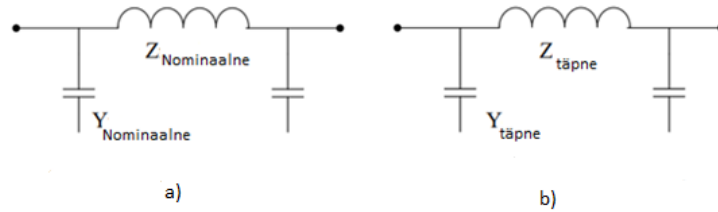
sisendparameetrite muutmisega. Selleks, et mingit nähtust vaadata ja analüüsida süsteemis, on vaja täpselt teada, mida otsida. Seega, tasub otsida sisendparameetrite kriitilist vahemikku ja keskenduda sellele [20].

Analüütiline ja sagedusdomeenide analüüsi mõistmiseks on vaja analüütilisi lahendusi seondada erinevate nähtustega. Analüütiline analüüs eeldab, et analüüsitav süsteem on pigem lihtsustatud. Isegi sagedusala lahendused vajavad lihtsustamist, see tähendab mittelineaarsete funktsioonide lineariseerimist ja väga lihtsustatud muunduri esitust. Seega piiranguks nii analüütiliste kui ka sagedusdomeenide analüüsis on see, et kasutajad ei näita nähtuste täielikku koostoimet. Samas on ilma mehhanismi mõistmata ja sagedusvaldkondade analüüsida väga keeruline mõista üldise käitumise aega [20].

Järgmine ja väga oluline analüüsivahend on reaalsed mõõtmised jaamades. Siinjuures tuleks arvestada, et kui probleemid kipuvad olema spontaansed, siis on oluline järgida nähtuste loogikat. Optimaalse lahenduse leidmiseks on vaja saada salvestisi isegi siis, kui on kalduvusi probleemile. Mõistliku arvu salvestistega saab mõõtmistulemusi korralikult analüüsida, st salvestatud parameetrite maht ja mälu käivitamiseelsete salvestuste jaoks peab olema piisav nõuetekohaseks sündmuse toimumise analüüsiks ja häire põhjuste kindlakstegemiseks [21].

1.4.2 Aseskeemid ja Nortoni ekvivalent

Ülekandeliinid ja kaablid on tavaliselt modelleeritud mitmefaasiliselt ühendatud ekvivalentse pi-vooluringiga [16]. Harmooniku analüüsi jaoks on kolmefaasiline tasakaalustatud võrk suhteliselt lühikeste ülekandeliinidega, keskendudes madala järgu harmoonikutele. Mudelit saab veelgi lihtustada ühefaasiliseks Π -ahelaks, mis on määratud positiivse jada impedantsi komponentide andmetega, nagu on näidatud joonisel 1.15a. Kõrgemate ja ajaliselt kauakestvamate harmoonikute modelleerimiseks jaotusliini parameetritega ülekande Π -vooluringi jaoks tuleks kasutada mudelit vastavalt joonisele 1.15b [18].



Joonis 1.15 Ülekandeliini (õhuliini või kaabli) ekvivalentne Π -mudel
 a) nominaalne Π -ahel, b) täpne Π -ahel [18]

a) Nominaalne Π -ahel [18]:

$$Z_{nominaalne} = (R_0 + jhX_0)l \quad (4.1)$$

$$Y_{nominaalne} = jhB_0l/2 \quad (4.2)$$

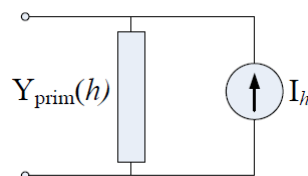
b) täpne Π -ahel [18]:

$$a = \sqrt{2Z_{Nominaalne}Y_{Nominaalne}} \quad (4.3)$$

$$Z_{täpne} = Z_{Nominaalne} \sinh(\alpha) / \alpha \quad (4.4)$$

$$Y_{täpne} = Y_{Nominaalne} \tanh\left(\frac{\alpha}{2}\right) / \alpha/2 \quad (4.5)$$

Tõenäosusliku harmooniku leviku eesmärk on uurida harmooniku allikaid kui Nortoni ekvivalent (st sõltumatu harmooniku voolu allikas paralleelselt vastuvõtu maatriks), vt joonist 1.16. Mudeli parameetrid on harmooniku voolu sisestamine, mille suurus ja faasinurk varieeruvad sõltuvalt harmoonikust ja allika impedantsist, mis sõltub ka harmooniku tüübist [18].



Joonis 1.16 Nortoni ekvivalent harmoonikute allikate modelleerimiseks [18]

Eesmärgiks on kvantifitseerida pinge ja voolu lainekuju moonutusi erinevates elektrisüsteemi punktides. Tulemused annavad võimaluse hinnata parandusmeetmeid ja harmoonikute otsingute probleeme. Harmoonikute uuringud võivad ka kindlaks teha

ohtlike resonantstingimuste kontrollimist ja vastavuse kontrollimist harmoonikute piire. Vajaduse harmooniku uuringu järele võib tingida mõõdetud olemasolev liigne moonutus või harmoonikuid tootvate seadmete paigaldamine. Sarnaselt teistele elektrisüsteemide uuringutele uuritakse harmoonikuid järgmistes etappides [22]:

- Harmooniku seadmete määratlus ja nende mudelite määramine.
- Mudelite kindlaksmääramine teiste süsteemi komponentidega, sealhulgas välised võrgud.
- Süsteemi simuleerimine erinevate stsenaariumite jaoks.

Elektroonilised muundurid, näiteks võimsuse elektroonikaseadmed, on reguleeritava kiirusega ajamid, alalisvooluühendusega ja staatilise var kompensatoriga. Mittelineaarse seadmega võrreldes on nende muundurite harmoonikud vähem tundlikud toitepinge variatsioonidele ja moonutustele. Seetõttu kasutatakse harmooniku voolu allikmudelitena just neid seadmeid. Eelnevalt arutletule on faasi nurgad vooluallika toitepinge faasi funktsiooni nurgaks. Seega peab harmooniku modelleerimise jaoks olema rohkem kui üks allikas. Üldteada on seadmed tundlikud toitepinge tasakaalustamatusele. Suure võimsusega elektroonikaseadmete, nagu HVDC terminalid ja edastustaseme SVC-d, jaoks on vajalikud üksikasjalikud kolmefaasilised mudelid. Sellised tegurid nagu lülitusnurk, võetakse arvesse mudelis, mis sõltub harmooniku tekkimisest ja toitepinge tasakaalustamatusest. Uuringute käigus tavaliselt skaneeritakse mitmesugused võimalikud seadmete töötingimused ja filtrite jõudlus [22].

Modelleerimisel on võrgumudeli peamine raskus võrgu suuruste määramine. Võrgu esindatuse ulatus on piiratud olemasolevate andmete ja arvutusressurssidega. Seda võib teha järgnevalt [22]:

- Tööstuslike elektrisüsteemide jaoks, mis on ühendatud tugevate või spetsiaalsete kolmefaasiliste jaotusfiidritega, on üldiselt piisav kahe transformatsiooni modelleerimine koormuspunktis. Hargnemisahelad tuleks modelleerida, kui need on ühendatud võimsusteguri korrigeerimise kondensaatoritega või mootoriga. Kuigi õhuliinide mahtuvus jäetakse tavaliselt tähelepanuta, peaks kaabli mahtuvus olema modelleeritud üle 150 meetri pikkuste kaablite jaoks.
- Alamülekandel teenindatakse suuri tööstusrajatisi ja ühtlast ülekandepinget. Sellisel juhul on oluline modelleerida vähemalt osa kõrgpinge võrgust, kui rajatisel on mitu varustusalaajaama. Kui on ainult üks varustusalaajaam, siis kommunaalteenused võtavad arvesse rajatiste poolset takistust kui algus punkti.

- Jaotusfiider on tasakaalustamata ja koormusi jaotakse sageli üksikutelt faasi külgmistele. Palju kasutatakse šuntkondensaatoreid. Seega muutub kohustuslikuks kogu fiidri modelleerimine, mõnikord ka külgnevad fiidrid.

Ülaltoodud tähelepanekud ei ole reeglid vaid põhinevad üldlevinud tavale. Võib-olla parim viis määratleda vajaliku võrgu modelleerimise ulatust, on teha tundlikkuse uuring, st saada järk-järgult laiendatav võrgumudel, kuni tulemused oluliselt ei muutu. Paljudes harmooniku uuringutes, mis hõlmavad tööstusettevõtteid, on varustussüsteem esindatud kui sagedusest sõltuv takistuspunkt ühises sidestamistamises [22].

Sageduse skaneerimine on tavaliselt esimene samm harmooniku uuringus. Sageduse või takistuse skaneerimine tähendab graafiku (Thevenin) impedantsi süsteemis sõlme sõltuvust sageduses. Huvipakkuv sõlm on selline, kus harmooniku allikas on olemas. Lihtsa süsteemi jaoks saadakse see takistus impedantsiskeemilt. Formaalselt saab Thevenini impedantsi arvutada kui lisatakse ühe allikaühiku kohta sobiva sagedusega harmoonik huvipakkuvasse sõlme. Ülejäänud voolud on seatud nullile ja arvutused tehakse sõlmepingete jaoks. Need pinged on üldjuhul võrdsed nagu ülekande takistused. Arvestusi korratakse huvipakkavas harmoonilises sagedusvahemikus. Tavaliselt tehakse skaneerimine nii päri kui ka null järgnevuse võrkude jaoks [22].

1.4.3 Vaeharmonikute modelleerimine

Vaeharmonikute komponentide olemasolu suurendab raskusi moonutatud mudelite modelleerimisel ja mõõtmisel lainekuju. Selle põhjuseks on peamiselt: 1) väärtuse väga madalad väärtused harmoonikute ühenditest (umbes üks suurusjärk vähem kui harmoonikute puhul), 2) nende sageduste muutlikkus ja amplituudid, 3) lainekuju perioodilisuse varieeruvus ja 4) suur tundlikkus spektraalse lekke nähtuse suhtes [19].

Mittelineaarsete seadmete tekitatud vaeharmonikutevoolud mõjutavad rohkem lainekujusid ja pakkumise tippväärtusi pinge ja tarnitava koormuse tööpunkti järgi, kui harmooniline hoovused. Lisaks suurusele ja faasinurgale, puudutab see aspekt ka sagedust. Seega on soovitatav kujutada seadmeid nende tegeliku mittelineaarse pingevoolu karakteristiku abil, mille omadused moonutuste uuringutes asenduvad pinge asemel sõltumatute harmooniku vooluallikatega. Sõltuvalt omadustest on terviklikud mudelid interharmoniliste allikate jaoks järgmised [19]:

- Väikese võimsusega analoog-elektronilised simulaatorid, mis koosnevad skaalamudelite muunduritest ja mudeli elektrisüsteemi arvu komponenditest, näiteks kõrge Q-faktoriga drosselid, madala magnetiseerumisega voolutrafod, kondensaatorid ja väikesed 6-impulsilised türistori sillad.
- Ajadomeeni mudelid, millele saab põhimõtteliselt viidata väga üldskeemiliselt, võttes arvesse igasuguseid mitteideaal tingimusi nagu tausta moonutamine, tasakaalustamatus, magnetilise materjali küllastus ja asümmeetriad.
- Modulatsiooniteoorial põhinevad sagedusdomeenimudelid on laiendatud kaheastmelistele muunduritele, mis moodustavad väga kiiresti lahendatavad mudelid, paindlikud ja neid iseloomustavat täpsust määratakse modulatsioonifunktsioonide täpsusega.
- Eelnevalt kirjeldatud mudelite hübriid.

2. EESTI ALALISVOOLUÜHENDUSTE HARMOONIKUTE KARAKTERISTIKUTE MÕÕTMINE

Käeolevas peatükis antakse ülevaade Eesti alalisvooluühenduste harmoonikute karakteristikute mõõtmisteks kasutatavast seadmetest, mõõtmiste protsessist ja mõõteandmete analüüsi meetodikast. Antakse üldine ülevaade mõõteahelast ning erinevatest pingetrafo mõõte meetoditest. Viimases alapeatükis räägitakse, kuidas saadud mõõtmistulemusi töödeldi, analüüsimeks tulemit graafiliselt.

2.1 Alalisvooluühendused Eestis

Käesoleva lõputöö raames mõõdeti kahte Eesti alalisvooluühendust Estlink 1 ja Estlink 2. Mõlemad ühendused on ehitatud Eesti ja Soome vahele (Joonis 2.1).



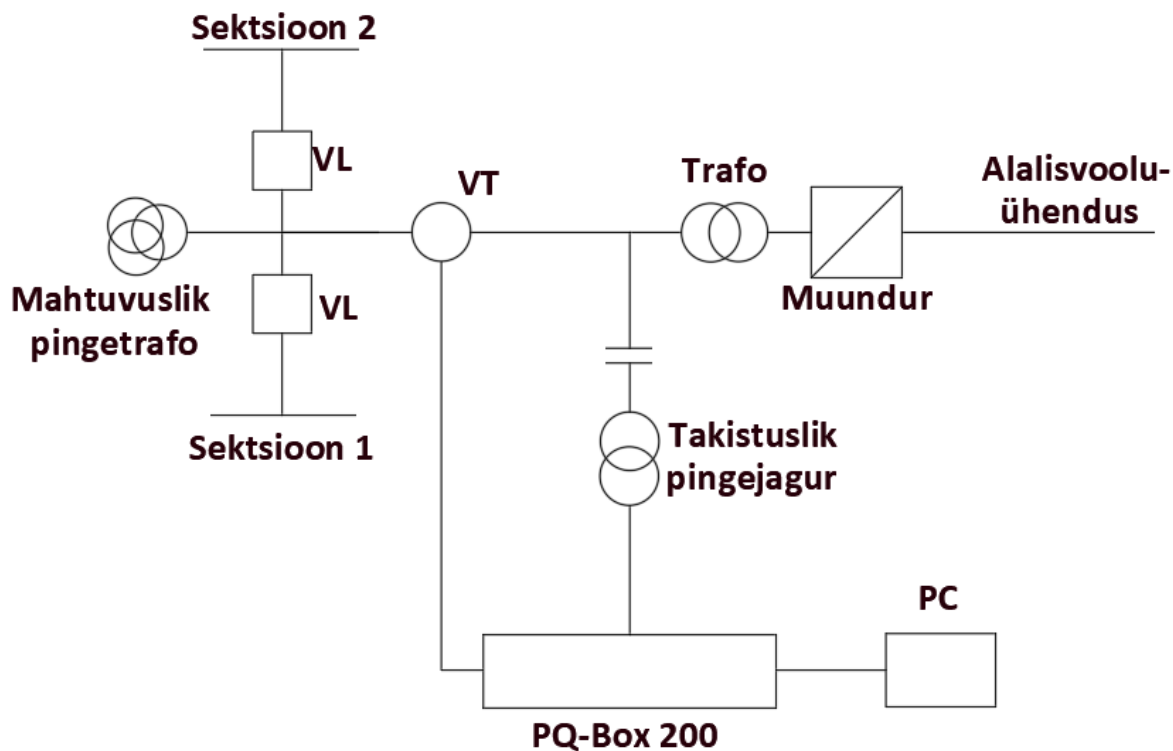
Joonis 2.1 Estlink 1 ja Estlink 2 [23]

Estlink 1 avati 4. detsembril 2006 ning on 105 kilomeetrit pikk (sealhulgas 74 kilomeetrit vee all). 350 MW alalisvoolu ühenduskaabel on ühendatud Eesti elektrisüsteemiga Harku 330 kV muundurjaamas ja Soome ülekandevõrguga Espoo 400 kV muundurjaamas Järvikyläs HVDC Light ülekandetehnoloogia abil. Estlink 1 kasutab tootegrupi ABB HVDC Light VSC- tüüpi 2 konverterjaama. Konverterjaamad on ühendatud elektrivõrku 380 MVA kolmefaasilise jõutrafo kaudu. Konverterjaamad on võimelised tarbima või genereerima kuni 125 MVAR reaktiivvõimsust, sõltumata aktiivvõimsuse ülekandest. HVDC Light konverter põhineb kuuepulsilisel pingemuunduril, millel on pooljuht ventiilid, mis koosnevad järjestikku ühendatud isoleeritud bipolaarsetest transistorite IGBT üksustest [24].

Estlink2 avati 26. märtsil 2014 , mille maksimaalvõimsus on 650 MW. Estlink 2 kogupikkus on 171 kilomeetrit, sealhulgas 145-kilomeetrit merekaablit, 12-kilomeetrit maismaakaablit Eestis ja 14 kilomeetrit õhuline Soomes. Merekaabel on ühendatud Soome põhivõrku Anttila 400 kV alajaamas Porvoos. Eestis on maakaabel ühendatud elektrivõrguga Püssi 330 kV alajaamas Ida-Virumaal. Estlink 2 kasutab LCC muundurseadet ning tegemist on 12-pulsilise sillaga.

2.2 Mõõteahel

Joonisel 2.2 on kujutatud mõõtmiste põhimõtteskeem. kokkuleppimist viidi mõõteandur estlink alajaamades juhtimishoonesse ja ühendati juhtimisrelee kappi. Käesolevas lõputöös kasutatakse harmoonikute ning nende nurga mõõtmiseks a-eberle seadet, tüübinimega PQ-Box 200. Antud seade töötati välja spetsiaalselt mobiilse töö jaoks (kaitseklass IP 65), mis on mõeldud avalikeks mõõtmisteks elektrivõrgus (paigalduskategooria CAT IV). Seade vastab kõigile rangetele mõõtmisinstrumendi nõuetele, vastavalt Standardile IEC 61000-4-30 A-klassi kohta. Seadmed on varustatud laia käivitusvõimaluste vahemikuga, mis võimaldavad kiiresti tuvastada rikkeid elektrivõrgus. Voolukatkestuse korral tagab UPS, et PQ- Box jätkab tööd. Mõõteandmeid saab eksportida COMTRADE-, XML- või CSV-failidena [25].



Joonis 2.2 Põhimõtteskeem

Tabel 2.1 PQ Box 200 karakteristikud [25]

Mälu	1 kuni 32 GB
Sisendid	4xU / 5 x I
Pingeharmonikud vastavalt IEC61000-4-30 klassile A	Kuni 50
Pingeharmonikute sagedusribad 200 Hz	2 kHz kuni 9 kHz
Voolu harmoonikud	Kuni 50
Vooluharmonikute sagedusribad 200 Hz	2 kHz kuni 9 kHz
Vooluharmoniliste faasinurk	Kuni 50
Pingete ja voolude FFT arvutamine	DC kuni 20 kHz
Ostilloskoobi pilt – proovivõtmise sagedus	40,96 Hz
Pinge ja voolu harmoonikud	DC kuni 20 kHz
Vaeharmonikute rühmad (U,I)	DC kuni 20 kHz



Joonis 2.3 PQ-Box 200 [25]

2.2.1 Mõõtetrafod

Mõõteandurid on süsteemi oluline osa elektrikvaliteedi jälgimissüsteemis, sest nad tagavad täpsema ülevaate. Pinge mõõtmiseks on kasutusel erinevat tüüpi trafod, nt mahtvuslik, induktiivne ja pingejagurid. Alates 110 kV tasemel on enamasti induktiivtüüpi pingetrafod ja 330-kV-võrgus enamasti kasutatakse mahtvuslikke tüüpi pingetrafoosi pinge kvaliteedi jälgimiseks. 330 kV tasemel on kasutusel ka induktiivset tüüpi pingetrafoot, kuid ainult ärilistel eesmärkidel nagu kommerts mõõtmine. Nende mõlema pingetrafo tüübi kasutamisel on harmooniku mõõtmisel täpsus alati olnud peamine aspekt. Seetõttu on hiljuti pingetrafood varustatud täiendava spetsiaalse väljundiga täpsete pinge harmooniku mõõtmiseks PQ Sensoriga. PQ sensorite paigaldamine pingetrafoodesse tagavad harmoonikute mõõtmise jaoks suurema täpsuse, eriti kõrgematel sagedustel [26].

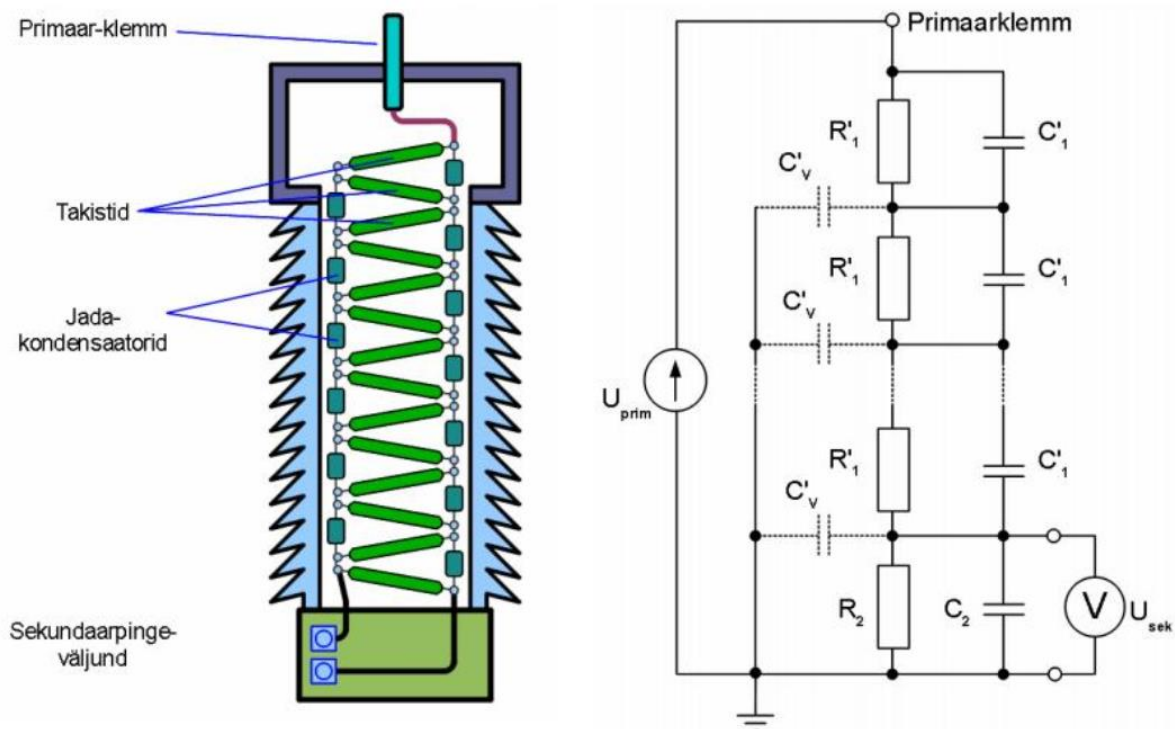
Pingetrafoosid kasutatakse vahelduvvoolu võrgus pingete mõõtmiseks, kui mõõteseadmete, releede või automaatikaseadmete vahetu ühendamine võrku on liiga kõrge pinge tõttu tehniliselt võimatu või ohtlik. Pingetrafoode primaarmähis lülitatakse (kõrge)pingeahelasse rööpselt. Pingetrafood valmistatakse valdavalt ühefaasilistena.

Sellisel juhul võivad neil kõrgepingemähise mõlemad otsad olla maast isoleeritud või siis üks ots olla maandatud [27].

Allikast [26] selgub, et mahtuvusliku pingetrafo sageduse karakteristikus ei ole mõtet harmoonikuid mõõta, sest selle viga läheks liiga suureks. Tavapäraselt on mahtuvuslikud mõõtetrafod vähem täpsed tulenevalt nende konstruktsioonist ning pingejaguri ja induktiivse elemendi omavahelisest seadistamisest. Suurema täpsuse saavutamiseks kasutatakse PQ-sensorit. Induktiivse pingetrafoga on sobilik mõõta harmoonikuid, kuid mahtuvuslik pingetrafo korral on vaja kasutusse võtta PQ-sensorit. Induktiivse pingetrafo mõõtetäpsus sõltub paljuski seadme võimekusest ja erinevatest parameetritest. Võib esile tuua, et tavapäraselt kõrgema pingega võrkudes kasutatakse mahtuvuslikku pingetrafo, sest ta on maksumuselt soodsam ja selle magnetsüdamik ei küllastu elektrivõrkudest tekkivatest nähtustest. Induktiivset mõõtetrafot mõjutab ferroresonants ka rohkem.

Pingetrafoidel saab kasutada erinevaid mõõtmismeetodid, ehk funktsiooni sageduse karakteristikut saab kindlaks teha mitteinvasiivse või invasiivse meetodiga. Allikas [26] annab ülevaate lähemalt nendest meetoditest. Invasiivne meetod eeldab, et pingetrafo pole ühendatud elektrisüsteemi primaarsele küljele. Mitteinvasiivne meetodit rakendatakse juba võetud pingetrafo korral. See on mitteinvasiivse meetodi põhiolemus, et vähemalt ühe pingetrafo puhul on teada sageduskarakteristik, kõik ülejäänud pingetrafo on ühendatud sama latipingele. Mitteinvasiivse meetodi eeliseks on nähtavad ja sarnased töötingimused kõikides realistlikku ergutust sisaldavates pingetrafoodes. See meetod sõltub olemasolevast pingemoonutusest, mis sisaldab eriti kõrge pingega võrkudes ainult mõnda paaritud harmoonikut.

Takistuslikud pingejagurid koosnevad põhimõtteliselt kahest aktiivtakistusest, mis on ühendatud liini ja maa vahel jadalülituses [28]. Mõõdetavates alajaamades viidi mõõtmised läbi alalisvooluühenduste lahtritesse paigutatud pingejagurite abil.



Joonis 2.4 Kompenseeritud takistuslik pingejagur ning selle aseskeem [28]

Kompenseeritud pingejagurites (nn RC-pingejagurid) rakendatakse pingejaguri takistitega paralleelselt lisakondensaatoreid, millega kompenseeritakse lisaks induktiivsusele ka hajutatud mahtuvust, mis esineb takistite ning teiste juhtide vahel. Selliselt saab suures osas neutraliseerida ajalise viite ning tagada laia töösagedusriba. Väikese koormamisvõime tõttu on vajalik rakendada elektroonilisi võimendeid väljundis, et välised ahelad ei mõjutaks mõõtetulemust. Antud hetkel on elektrooniliste võimendite funktsionaalsus väga hea, töökindlus kõrge ning hind suhteliselt madal [28].

Takistuslike pingejagurite üheks oluliseimaks eeliseks mahtuvuslike pingejagurite ees on alalisvoolu mõõtmise funktsionaalsus. Mahtuvuslike pingejaguritel puudusteks on piiratud töövõime madalatel sagedustel, kuna nende näivtakistus kujuneb väga suureks ning alaliskomponendid mõõtmisel jääb nende täpsus allapoole rakendatavat piiri. Takistuslikul pingejaguril sellist puudust ei esine ning need sobivad seepärast väga erinevate siirdeprotsesside mõõtmiseks. Takistuslik pingejagur on lisaks optilistele pingetajuritele üks vähestest mõõtemuunduritest, mille sageduskarakteristik on väga ühtlane alates alalisvoolukomponendist kuni kõrgete sagedusteni. See annab võimaluse rakendada takistuslikke pingejagureid põhimõtteliselt kõikides pingemõõtestsenariumides alates kiirete siirdeprotsesside mõõtmistest, pingekvaliteedi mõõtmistest kuni alaliskomponendiga siirdeprotsesside mõõtmiseni [28].

Tabel 2.2 Eelised ja puudused takistusliku pingejaguril [28]

Eelised	Puudused
Lai lineaarne sagedusriba	Tavamõõtmisteks vajalik lisaelektronika
Alaliskomponendi täpne mõõtmine	Suur eralduv võimsus

2.2.2 Katse läbiviimine

Estlink 1 mõõtmised viidi läbi 26.08.2019 kuni 28.08.2019. Eesmärgiks oli saada Estlink 1 tulemusi Eesti-Soome ning Soome-Eesti suunal. Eesmärgiga uurida, kas suuna muutus mõjutab harmoonikute kulgnemist. Minimaalseks võimsuseks võeti 0 MW ning maksimaalseks 350 MW. Võimsusel 0 kuni 70 MW uuriti ka maksimaalset ja minimaalset reaktiivvõimsust, alates 105 MW seati see 0 MVAR-le. Lisaks mõõdeti eraldi tulemusi, kui sageduse reguleerimise funktsioon on sees ja väljas.

Estlink 2 katsetused viidi läbi perioodil 29.08.2019 kuni 02.09.2019. Estlink 2 puhul vaadeldi erinevaid olukordi: uuriti kahte suunda Eesti- Soome ning Soome- Eesti, minimaalse võimusega 65 MW maksimaalvõimsusega 650 MW, andmed võeti iga 10 % võimsusastmete järel.

2.3 Mõõtmistulemuste analüüsi metoodika

Mõõtetulemustes analüüsiti mõõteandmeid erinevates tingimustes. Vaadeldi mõlema alalisvooluühenduse võimsusvoo suundi Eesti- Soome ning Soome- Eesti vahel ning reaktiivvõimsuse mõju. Estlink 1 puhul vaadeldi ka sageduse reguleerimise funktsiooni mõju. Kuna andmete maht oli väga suur, siis kasutati andmete agregeerimiseks arvutiprogrammi MATLAB. Andmete paljususe tõttu jaotati andmed võimsuste järgi ning iga harmoonikut (2-50) analüüsiti eraldi. Analüüsiti algandmeid agregeerides neid 3 sekundi ja 10 minuti andmeteks vastavalt standardile IEC 61000-4-30 [29].

IEC 61000-4-30 [29] standard näitab, kuidas toimub mõõteandmete agregeerimine, selleks et saada konkreetsemad mõõtmistulemused. Samuti näitab mõõtmisintervall igat katse tsükli alguse ja lõpu sünkroonitud kellaaega. Standard IEC 61000-4-30 määratleb põhiliselt mõõteseadmete täpsusklassid, pingekvaliteedi mõisted, andmete agregeerimisalgoritmid, mõõtmiste läbiviimise tingimused, mõõteandmete markeerimise

jpm. Antud standard ei sea piirväärtusi kvaliteedinäitajatele. Standard defineerib mõõtemetoodid toitepinge sagedusele ja väärtusele, värelusele, pingelohkudele ja muhkudele, toitekatkestustele, asümeetriale, harmoonikutele ja vaeharmonikutele, toitepingele pealdataud signaalipingetele ja kiirete pingemuutustele [30]. Vastavalt allikale [30] kirjutati matemaatiline lahenduskäik koodina välja. Esmalt sorteeriti välja mõõtmistulemustest saadud kindlad read, kus viidi läbi katsed erinevatel võimsusastmetel. Seejärel, saadi teada pinge -ja vooluharmonikute (2-50) tulemused erinevatel võimsusastmetel. Seejärel koostati vastavalt andmetele kood.

IEC 61000-4-7 [31] seadis harmooniku faasi mõõtmise suurusjärgu, mille summeerimisel säilitatakse ainult ruutkeskmine väärtus. Koos nurkade mõõtmisega, saab parema informatsiooni [30].

$$Y_{H,h} = Y_{H,h} \angle \varphi_{H,h} \quad (2.2)$$

Kus $Y_{H,h}$ on faasinormide harmoonikute väärtuste ruutkeskmine väärtus h ja $\varphi_{H,h}$ faasinurk. Agregeeritud harmooniku faasi $Y_{agg,h}$ saab määratleda [30] :

$$Y_{agg,h} = Y_{agg,h} \angle \varphi_{agg,h} \quad (2.3)$$

$Y_{agg,h}$ on ühendatud harmooniku faasiga, mis kajastab IEC 61000-4-30 [29] liitumisintervallis 3 s, 1 min, 10 min või 2 h andmeid [26]. Käesolevas lõputöös kasutati täpsemaid 3 sekundilise intervalliga andmeid, millest koostati vastavalt ka 10 min intervalliga ülevaatlikumad andmed. Ennekõike eesmärgiga, et saada võrrelda nendest tekkivaid erinevusi.

$$Y_{agg,h} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{H,h,i}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

Kus $Y_{agg,h}$ harmooniku faasi summeeritakse ruutkeskmise väärtuse juures harmoonikut h . Y võib asendada I (vool) või U (pinge). Sümbol n on harmoonikute arv agregeeritud faasoriil: $n=15$ 3 sekundi agregatsiooni korral intervall [30].

Agregeeritud faasinurga $\varphi_{agg,h}$ on [30] :

$$\varphi_{agg,h} = \arg \left(\sum_{i=1}^n Y_{H,h,i} \right) \quad (2.5)$$

Vastavalt eelnimetatud valemitele (2.2 ... 2.5), koostati arvutiprogrammis MATLAB vastavad koodid. Esmalt leiti ruutkeskmistatud väärtused ning seejärel agregeeriti 3 sekundi andmed ning siis 10 min andmed. Saadud tulemustest võeti keskmine väärtus ning koostati vastavad graafikud. Edasiselt määrati pinge ja voolu faasori suurus, kasutades ruutkeskmistatud väärtusi nii 3 sekundi kui ka 10 min andmetele. Järgnevalt arvutati nendele kaasnevatele nurga väärtused. 3 sekundi andmete puhul leiti ka 95% protsentiil. Sealhulgas leiti faasori keskmete miinimumi ning maksimumi väärtused. Lõpp tulemusena koostati arvutiprogrammis MATLAB pinge ja voolu faasori nurga graafikud. Lisaks saadi veel THD väärtused Estlink 1 ning Estlink 2 jaoks, seda erinevatel olukordadel.

2.4 Karakteristlikute harmoonikute visualiseerimine

Karakteristlikute harmoonikute (2-50 järk) täielik visualiseerimine lugejale arusaadavas vormis on keeruline ülesanne. Kõigis võimalikes viisides moodulgraafikute visualiseerimine ei ole protseduuriliselt produktiivne. Autor kasutab oma töös kahte tüüpi graafikuid. Üks on pealtvaates maatriksi kontuurjoonis ja teine külgsuunas värvikaardil põhineva valgustusega pinnaplaan. Need aga ei anna 100% täiuslikku ülevaadet, sest näiteks külgsuuna puhul, kui vaadata peatükis 3 toodud jooniseid, jääb tihti mõni harmooniku teise harmooniku varju ja nii ei näe detailselt kõigi 49 harmooniku graafilisi jooniseid. Sellest tulenevalt esitab lõputöö autor harmoonikute mõõtetulemuste visualiseerimiseks mõlemad graafikud. Lisaks pealt vaates maatriksi kontuurjoonise kujul ja külgsuunas värvikaardil põhineva valgustusega pinnaplaanina mõõtmistulemuste esitamise graafikutele on olemas ka teisi tulemuste visualiseerimise võimalusi, mida tulevikus harmoonikute uurimiseks saaks kasutada.

Kõik joonis graafikud antud alapeatükis, nii maatriksi kontuurjoonise kujul esitatud graafikud kui külgsuunas värvikaardil põhineva valgustusega pinnaplaanina visualiseerivad mõõtetulemust kõigide harmoonikute skaalal, kuid väljendavad seda erinevalt. Antud joonised on võetud Estlink 1 vooluharmoonikute näitest. Joonised 2.5 ja 2.6 väljendavad harmoonikuid pealtvaates. Joonisel 2.5 on mõõtetulemuste visualiseering graafilisem ja vähem arvuline, siis joonisel 2.6 on visualiseering arvulisem. Joonis 2.7 näitab külgsuunas harmoonikute tulemusi, kus kollane näitab kõrgemaid mõõteväärtusi kui sinine. Probleemsed harmoonikud, näiteks H3, H5, H7, H9 ja H11 mõned tulemused teatud võimsuspunktis jäävad eelmise võimsuspunkti varju. Vaatamata sellele leiab lõputöö autor, et joonis 2.7 visualiseerib lõpptulemusi paremini. Tulevaste uurimustööde autoritel on võimalik ise otsustada, milliseid mõõtegraafikute esitlusvormid annavad parema ülevaate. Käesoleva lõputöö autor valis eelkirjeldatud graafikute kujul harmoonikute uurimise, mida vaadeldakse lähemalt kolmandas peatükis „Tulemuste analüüs“.

3. TULEMUSTE ANALÜÜS

Antud peatükis antakse ülevaade katsete tulemustest. Lisades tuuakse välja probleemsed harmoonikud erinevatel võimsusastmetel ja THD tulemused, mis on olulised harmoonikute tekke prognoosimisel tulevikus. Joonistel, kus on kõik harmoonikud koos, on näha, et harmoonikute liikumine toimub H2-st kuni H50-ni paremalt vasakule. Põhjuseks on, et autori hinnangul annab see parema ülevaate harmoonikute kulgnemisest. Probleemsete harmoonikute nurgagraafikul on näha, mis nurka jäid teatud probleemsed harmoonikud ning mis oli nende voolu -ja pingeväärtused.

Lähemalt antakse ülevaade tulemustest alapeatükis 3.3, kus autor järeldab harmoonikute ülekannet Eesti-Soome ning Soome-Eesti suunal ning annab omapoolse hinnangu saadud tulemustest. Lisaks Estlink 1 puhul vaadeldakse, kas sageduse reguleerimise funktsiooni kasutamine muudab tulemusi erinevatel suundadel.

3.1 Estlink 1

Estlink 1 puhul on uuritud andmeid, kui sageduse funktsioon on sees ning väljas. Sellest tulenevalt on tulnud andmeid töödelda kaks korda rohkem kui Estlink 2-s, sest Estlink 2 puhul pole võimalik sagedust reguleerida. THD arvutus viiakse läbi valemiga 1.1 ning 1.2, mida on käsitletud esimeses peatükis. Antud voolu ning pinge tulemused on avaldatud Lisa 1-s. Seal on vaadatud eraldi 3 sekundi ning 10 min andmeid, et näha nende erinevusi. Lisaks on eraldi veerud 2 - 40 harmoonikutele ja 2- 50 harmoonikutele. Selleks, et vaadata nende erinevusi. Täpsustuseks nurga mõõtmine kestis k.a kuni 40-nda harmoonikuni. Lõputöö koostaja on võtnud 3 sekundi andmed veerust H2-H50 ning teinud vastavad graafikud. Antud tulemused annavad eelduse, et teha modelleerimisi tulevikus erinevatel võimsusastmetel.

Lõputöös esitatud graafikutes tuuakse eraldi välja võimsused, mis on märgitud numbritega, veerus nimega võimsuste mõõtetulemused. Need on toodud tabelis 3.1 ja 3.2. Tulemused on nähtavad THD- graafikutel, maatriksi kontuurjoonise, värvikaardil põhineva valgustusega pinnaplaan ja nurgagraafikutel. Alapeatükkides 3.1.1 ning 3.1.2 antakse voolu ning pinge tulemused.

3.1.1 Vooluharmonikud

Antud peatükis vaadeldakse vooluharmonikuid ning võimsusvoo suunda Eesti-Soome vahel. Samuti tuuakse välja graafikud, kui sageduse funktsioon on sees ning väljas, mida hiljem analüüsitatakse. Esiteks kui sageduse funktsioon on sees, teiseks väljas ja seejärel mõlemal suunal eraldi. Lõpuks antakse hinnang vastavalt graafikutele.

Joonisel 3.1 on näha voolu THD tulemust Eesti-Soome suunal, kui sageduse funktsioon on sees. Jooniselt on näha, et lineaarne sirge tõuseb kui võimsuste väärtused vähenevad. Madalate võimsuste puhul alates 52,5 MW kuni 14 MW puhul on näha, et kui reaktiivenergia on viidud nulli lähedale, siis voolu väärtused on kõrgemal kui reaktiivenergia on viidud maksimumini või miinimumini. Kõige kõrgem voolu väärtus esines 17,5 MW 21 MVAR puhul kui vool oli 0,163 A juures. Kõik väärtused asuvad normipiires, sest mitte ühegi väärtus ei ületa 1% piirmäära.

Joonis 3.1 Estlink 1, sageduse funktsioon on sees, voolu THD tulemused, Eesti-Soome suunal

Jooniselt 3.2 ja 3.3 on näha, et kui sageduse funktsioon on sees Eesti-Soome vahel, siis kõige kõrgemad väärtused esinevad madalate harmoonikute puhul. Täpsemalt probleemsed harmoonikud on H5, H7 ja H11. H15 kuni H30. Nende puhul pole

märkimisväärseid voolu tõuse, kuid alates H31 voolu väärtus tõuseb taas, kuid jääb ikka pea neli korda väiksema väärtuse juurde, kui oli H11. Kõrgemad väärtused esinevad madalate võimsuste korral. H11 puhul kõige kõrgem väärtus esineb, kui võimsus oli 17,5 MW 21 MVAR ja voolu väärtus 4,1 A. Ülejäänud kõrged H11 väärtused esinevad siis, kui reaktiivenergia oli nullis või nulli lähedal. Kõige madalamad H11 väärtused tekkisid siis, kui reaktiivenergia oli seatud maksimumi peale. Vaatamata sellele, et mõned voolu harmoonikute väärtused on normist kõrgemad (nt H11), siis on ajutine tõus normaalne. Muud väärtused on püsinud normi piires.

Joonis 3.2 Estlink 1, sageduse funktsioon on sees, voolu moodul, Eesti-Soome suunal, maatriksi kontuurjoonis

Joonis 3.3 Estlink 1, sageduse funktsioon on sees, voolu moodul, Eesti-Soome suunal, värvikaardil põhineva valgustusega pinnaplaan

Lisaks on vaadeldud teatud probleemseid harmoonikuid Lisas 1.1, milleks olid H3, H5, H7 ning H11. Kõige kõrgem vooluväärtused esinesid H11 puhul, kui võimsus on 35 MW ja 17,5 MW ja reaktiivenergia on seatud 0 MVAR lähedale. H5 vooluharmoonikute korral esines kõige kõrgemad väärtused võimsustel 52,5, 35 ja 17,7 MW, kui reaktiivvõimus on seatud miinimumi peale.

Joonisel 3.4 antakse ülevaade probleemsetest harmoonikutest. Joonisel on näha, et H5 asub põhiliselt teises veerus ning H3 ja H7 kolmandas veerus. Selgelt nähtub, et H11 väärtused on kõige kõrgemad ning enamus H11 väärtustest asuvad neljandas veerus.

Joonis 3.4 Estlink 1, sageduse funktsioon on sees, voolu moodul ning nurga graafilised tulemused, Eesti-Soome suunal

Joonisel 3.5 on näha voolu THD väärtused Soome-Eesti suunal, kui sageduse funktsioon on sees. Mõlemal suunal, kui sageduse funktsioon on sees, siis lineaarne sirge on tõusu suunas ehk voolu väärtused tõusevad, kui võimsus langeb. Jooniselt 3.5 on näha, et kui reaktiivenergia on seatud 0 väärtusele, siis voolu väärtused on kõrgemad kui reaktiivenergia on seotud maksimumini, kui ka miinimumini. Väärtuste vahed on harmooniku tulemuste puhul lausa kaks korda suuremad. Autor täheldab, et mõlemal suunal on kõige kõrgem voolu väärtus 17,5 MW puhul, kui reaktiivenergia on seatud nullile või nulli lähedale. Enamus väärtused on normi piiris.

Joonis 3.5 Estlink 1, sageduse funktsioon on sees, pingeline THD tulemused, Soome-Eesti suunal

Jooniselt 3.6 ja 3.7 on näha 3 sekundi andmeid H2 kuni H50 voolu harmoonikute tulemust Soome-Eesti suunal kui sageduse funktsioon on sees. Nähtub, et on näha, et kõige probleemsem harmoonik on H11. Kõige kõrgema voolu väärtusega harmoonikud olid madalad harmoonikud. H13 kuni H35 olid harmoonikud normi piires, siis ainult H35 väärtus ületab veidi lubatud ehk täpsemalt 1.1 A, kui võimsus oli 105 MW. Lõpu harmoonikutest paistab silma H47 oma kõrge voolu väärtusega, milleks oli 1,2 A samal võimsus astmel nagu H35. H11 kõige kõrgemad väärtused esinevad madalatel võimsustel, milleks olid 35 MW 80 MVAR, 17,5 MW 80 MVAR ja 0 MW 0 MVAR. Lisaks H11 on kõrge vooluväärtusega ka H3, H5 ning H7. Ajutiselt kõrged väärtused harmoonikutes on normaalsed ning lühiajaliselt ei mõjuta märkimisväärselt võrku.

Lisa 1.2-s on näha viis erinevat H3,H5, H7,H11 ja H47 harmooniku moodulit. Kõik peale ühe H47 on madalat järku harmoonikud, mis on tekitanud kõige suuremaid voolu väärtuseid võrku. Kõrgemate harmoonikute puhul on näha, et H47 kõrged väärtused esinevad, kui võimsus on kõrge, muudel olukordadel on olid kõrged harmoonikud normi piires.

Joonisel 3.8 on näha kõiki probleemseid harmooniku tulemusi nurga graafikul. Selgelt on näha, et enamused H3, H7 ja H11 asuvad kolmandas veerus ning H3 enamused voolu väärtused asuvad teises veerus. Kõrgemate harmoonikute puhul H35 ning H37 on näha et need väärtused asuvad kõigis veergudes. Jooniselt on selgelt näha, et kõrgemad harmoonikud ei ületa 2 A ning enamused madalad probleemsed harmoonikud on 1-3 A vahele.

Joonis 3.8 Estlink 1, sageduse funktsioon on sees, pingemoodul ning nurga graafilised tulemused, Soome-Eesti suunal

Eelnevalt on vaadeldud mõlemaid suundi, kui sageduse funktsioon on sees. Lõputöö autor on uurinud veel Estlink 1 puhul olukorda, kui sageduse funktsioon on väljas. Nüüd käsitletakse, kui sageduse funktsioon on väljas ning lõpuks alapeatükis 3.3 antakse mõlemast funktsioonist hinnang.

Joonisel 3.9 on näha voolu THD tulemus Eesti-Soome suunal, kui sageduse funktsioon on väljas Eesti-Soome suunal. Lineaarsirge on tõusul, kui võimsused on madalad. Kõige väiksem voolu väärtus esineb kui võimsus oli seatud 70 MW ja reaktiivenergia 120 MVAR. Kui reaktiivenergia oli seatud nullile, siis esinesid kõrgemad voolu väärtused. 0 MW puhul, kui reaktiivenergia oli 0 MVAR, siis voolu THD väärtus oli teistest väärtustest pea kaks korda kõrgem. Kõik väärtused jäävad 1% normi piiresse.

Joonis 3.9 Estlink 1, sageduse funktsioon on väljas, voolu THD tulemused, Eesti-Soome suunal

Joonisel 3.10 ja 3.11 on näha Eesti-Soome suunal voolu harmoonikute väärtused, kui sageduse funktsioon on väljas. Siin torkab silma kõige rohkem madalad harmoonikud, milleks on H3, H5, H7, H9 ja H11. Kõige kõrgemad harmooniku väärtused esinesid H11 puhul, kui vool oli 4 A ja võimsus oli 52.5 MW, reaktiivenergia 0 MVAR. Pärast madaladaid harmoonikuid olid ülejäänud harmoonikud, v.a H35 ning H47, normi piires. H35 ning H47 kõrged väärtused esinevad, kui võimsus on seatud 113,6 MW-le.

Autor on käsitletud eraldi viite harmoonikut Lisas 1.3. Lisas 1.3 on näha H11 kõrgeid vooluväärtusi, mis esinevad madalal võimsusel. Sama olukord, kus madalal võimsusel on kõrgemad väärtused, esinevad H3 ning H47 puhul. H5 on märgatavalt kõrgema väärtusega kui H7 ning H47 harmoonik on kõikides võimsusastmetel normi piires, v.a ühel korral, kui võimsusel 113,6 MW.

Joonisel 3.12 on näha Eesti-Soome suuna probleemsete harmoonikute ühist nurga graafikut, kui sageduse funktsioon on väljas. Jooniselt on näha, et enamused H3 ja H7 voolu väärtused asuvad kolmandas veerus ning enamused H5 väärtused teises veerus. H11 puhul on selgelt näha, et harmooniku väärtused on kõige kõrgemad ja enamused asuvad neljandas veerus ning osad väärtused ka kolmandas veerus. H13, H35 ning H37 enamused väärtused jäid alla 1 A.

Joonis 3.12 Estlink 1, sageduse funktsioon on väljas, voolu moodul ning nurga graafilised tulemused, Eesti-Soome suunal

Joonisel 3.13 on näha voolu THD väärtused kui sageduse funktsioon on väljas Soome-Eesti suunal. Nagu Eesti-Soome suunal on Soome-Eesti suunal THD voolu väärtuste lineaarne sirge tõusul, kui võimsusväärtused langevad. Kui reaktiivenergia on seatud nullile, siis voolu väärtused on mitmes kohas peaaegu kaks korda suuremad, võrreldes miinimumi ning maksimumi suhtes. Kõik väärtused on normi piires.

Joonis 3.13 Estlink 1, sageduse funktsioon on väljas, voolu THD tulemused, Soome-Eesti suunal

Joonisel 3.14 ja 3.15 on näha 3 sekundi voolu harmoonikute tulemust Soome-Eesti suunal, kui sageduse funktsioon on väljas. Joonistelt on näha, et kõige kõrgemad väärtused esinevad H11 korral 3,9 A, kui võimsus oli 17,5 MW ning reaktiivenergia on seatud nullile. Lisaks madalate harmoonikutele, olid kõrged väärtused H3, H5, H7 ning H9. Ülejäänud harmoonikute puhul on jäänud voolu harmoonikud normi piiresse, v.a H47, kui võimsus oli kõige kõrgem ehk 350 MW.

Lisas 1.4 on märgata, et madalate harmoonikute puhul vooluharmoniku väärtused pigem tõusevad, kui võimsus langeb. Kõige järsemat tõusu näeb H5 puhul, kus kõrgeima võimsuse korral oli vooluharmoniku väärtus kõige madalamal, tõuseb lineaarne. H47 harmooniku kõrgeima võimsuse korral vooluharmoniku väärtus ületab 1% lubatusest, kuid teistel võimsusastmetel oli H47 normi piires.

Joonisel 3.16 on näha kõiki probleemseid voolu harmoonikuid Soome-Eesti suunal, kui sageduse funktsioon on väljas. Jooniselt on näha, et H3 ja H7 väärtused jäävad kolmandasse veergu ning enamuse H5 harmooniku väärtused teise veergu. Kui suuremat probleemi valmistav harmoonik H11 asub nii kolmandas kui ka neljandas veerus, siis on näha, et viiel erineval võimsus režiimi korral vooluharmoniku väärtus ületab 3 A. Lisaks märgib autor, et probleemsed harmoonikud asuvad 150° - 330° vahel. Enamus H13 harmooniku väärtused jäävad esimesse veergu ning olid alla 1 A. Kõrgemad harmoonikud H35 ja H37 väärtused paiknevad igas veerus ning ei ületanud 1A.

Joonis 3.16 Estlink 1, sageduse funktsioon on väljas, voolu moodul ning nurga graafilised tulemused, Soome-Eesti suunal.

3.1.2 Pingeharmonikud

Antud peatükis käsitletakse Estlink 1-s pingeharmonikuid. Vastavad võimsuste tabelid on kajastatud tabelites 3.1...3.4 , tähelepanu on pööratud problemaatilisematele harmoonikutele ja välja toodud THD graafikud. Joonisel 3.17 on pinge THD väärtused Eesti-Soome suunal, kui sageduse funktsioon on sees. Jooniselt on näha, et lineaarne sirge langeb, kui võimsused on väiksemad. Kõige kõrgem väärtus esineb, kui võimsus on 280 MW. Kõige väiksem on väärtus, kui võimsus oli 35 MW ning reaktiivenergia seatud miinimumile -116 MVAR. Kõik väärtused asuvad normipiires, ehk ei ületa 1%.

Joonis 3.17 Estlink 1, sageduse funktsioon on sees, pinge THD tulemused, Eesti-Soome suunal

Joonisel 3.18 ning 3.19 on näha 3 sekundi pingeharmoniku andmeid Eesti-Soome suunal, kui sageduse funktsioon on sees. Jooniselt on näha, et kõige rohkem mõjutavad võrku kuus harmoonikut. Probleemseim on H7, mis ületab 1000 V piiri. H7 puhul kõrged pingeväärtused tekivad, kui võimsus on maksimumi peal või selle lähedal. Võimsuse 349, 315, 280 MW puhul ületab H7 ajutiselt normi piiri. Teiste võimsuste puhul jääb H7 770 ja 998 V vahele. Kõrgemate harmoonikute puhul jääb silma kaks harmoonikut: H33 ja H47.

Lisa 1.5-s on probleemsed madalad harmoonikud, mille väärtused olid märgatavalt erinevad teistest. Lisa 5 joonistes on näha, et H3, H5 ning H11 väärtused jäävad ligilähedale, üksnes H11 harmooniku puhul langeb lineaarne sirge. Eesti-Soome suunal on H7 kõige problemaatilisem kui võimsus kõrge.

Joonis 3.20 Estlink 1, sageduse funktsioon on sees, pingemoodul ning nurga graafilised tulemused, Eesti-Soome suunal

Joonisel 3.21 on näha pingemooduli THD väärtused, kui sageduse funktsioon on sees Soome-Eesti suunal. Joonisel 3.21 on näha, et lineaarne sirge langeb, kui võimsus väheneb. Autor märkas, kui reaktiivenergia oli seatud miinimumile, siis voolu väärtused olid kõige kõrgemad võrreldes, kui reaktiivenergia oli seatud maksimumile või nulli lähedale. THD pingemooduli väärtused joonisel on normipiires.

Joonis 3.21 Estlink 1, sageduse funktsioon on sees, pinge THD tulemused, Soome-Eesti suunal

Joonisel 3.22 ja 3.23 on näha pinge harmoonikute tulemust vastupidisel suunal, ehk Soome-Eesti suunal. Graafikult nähtub, et kõik pinge harmoonikud on normi piires, sest isegi kõige kõrgema pingeväärtuse tekitanud harmooniku väärtus oli alla 900 V. Järjekordselt, kõige kõrgem pinge harmoonik on H7, kui võimsus ning reaktiivenergia oli seatud nullile. Madalate harmoonikute puhul on veel H3 ning H5 pinge väärtused kõrgemal teistest harmoonikutest, v.a H7. Kõrgemate harmoonikute puhul paistab silma H35 ja H47, mille pinge ületab 400 V. Jooniselt nähtub, et kõik pingeharmonikud asuvad normi piires, ehk ei ületa 1% nõuet.

Lisa 1.6-s näidatakse Soome-Eesti suunal kõige problemaatilisemaid harmoonikuid harmoonikuid. Enamus olid järjekordselt madalad, lisandus H35 oma kõrge väärtusega. H35 puhul on näha, et enamus väärtused jäid alla 500 V. H5 väärtus kõikus kõige rohkem ning tema lineaarne sirge langes järsult. H7 harmoonik on stabiilses tõusus kui võimus väheneb. Autor selgitab, et kõik harmoonikud jäävad alla 1%, mis tähendab, et kõik tulemused on normi piires.

Joonisel 3.24 on näha kõiki tavalisi problemaatilisi harmoonikuid. Jooniselt on näha, et kõige kõrgema väärtusega pingeharmonikud asusid neljandas veerus. H3 ja H11 harmoonikud asusid esimeses veerus. Autor märkas, et kõige ühtlasemad harmoonikud, mis olid kõige lähemal üksteisele ühel pingeväärtusel, olid H3 ja H7 ja kõige kaootilisemad harmoonikud oli H5 ning H35. Eelnevalt on mainitud, et kõik harmoonikud jäid 1% sisse ning mitte ükski harmoonik ei ületanud 1000 V.

Joonis 3.24 Estlink 1, sageduse funktsioon on sees, pinge moodul ning nurga graafilised tulemused, Soome-Eesti suunal

Joonisel 3.25 on pinge THD tulemuste graafik, kui sageduse funktsioon on väljas, Eesti-Soome suunal. Jooniselt on näha, et lineaarne sirge langeb , mis tähendab, et pinge

väärtused on kõrgemad, kui võimsus on kõrgem. Kuid võrreldes eelnevate pinge THD graafikutega, kui sageduse funktsioon oli sees, siis kui on väljas, siis pinge väärtused väga ei erine üksteisest mitte väga erinevad, ehk nende vahed üksteisest on lähemal. THD graafikul on pinge väärtused normi piires.

Joonis 3.25 Estlink 1, sageduse funktsioon on väljas, pinge THD tulemused, Eesti-Soome suunal

Jooniselt 3.26 ja 3.27 on näha Eesti-Soome suunal pinge harmoonikute kulgnemist, kui sageduse funktsioon on välja lülitatud. Graafikult on näha, et järjekordselt H7 väärtus on kõige kõrgem ning ületab ajutiselt 1% normi määra. Kui võimsus 245 MW siis H7 pinge harmooniku väärtus on kõige kõrgem ehk 1,1 kV. Peale H7 on ületanud üle 400 V neli harmoonikut: H3, H5, H11 ja H35. Muude harmoonikute pinge väärtused jäävad madalamaks.

Lisas 1.7 on neli madalat probleemset harmoonikut. Lisa 1.7-s on näha, et H7 on kõige suurema probleemiga harmoonik, mille pinge ulatub ühel võimsusastmel üle 1100 V. H7 kõrgemad väärtused esinevad, kui võimsusaste on kõrge. Joonisel nähtub, et lineaarne sirge on languses ehk pinge väärtused langevad, kui võimsus väheneb. Sama olukord ka H11-ga ning autor täheldab, kui reaktiivenergia H11 puhul seatud maksimumi peale, siis on pinge väärtused madalad. H3 ja H5 harmooniku lineaarne sirge on tõusul, lisaks kui reaktiivenergia on maksimumi peal, siis väärtused on madalad nagu H11 harmooniku korral.

Joonisel 3.28 on näha, et H3 ning enamuse H11 pinge väärtused jäävad esimesse veergu ning H5 ning H7 jäävad neljandasse veergu. H7 mõned pingeharmoniku väärtused ületasid 1 kV piiri. H35 kõrgemate väärtuste puhul jääb rohkem kolmandasse veergu. Ülejäänud harmoonikud ei mõjuta võrku negatiivselt.

Joonis 3.28 Estlink 1, sageduse funktsioon on väljas, pinge moodul ning nurga graafilised tulemused, Eesti-Soome suunal

Joonisel 3.29 on näha, et lineaarne sirge langeb Soome-Eesti suunal, kui sageduse funktsioon on väljas. Sama olukord toimus vastupidisel suunal ning ka siis, kui sageduse funktsioon oli sees. Kõige kõrgem on väärtus, kui võimsus oli kõige kõrgem ehk 350 MW.

Alates 70 MW-st kuni 0 MW-le esinevad kõige kõrgemad väärtused, kui reaktiivenergia on seatud miinimumi peale. Sama olukord on ka vastupidisel suunal. Väärtused joonisel 3.36 on normipiires ehk ei ületa 1% nõuet.

Joonis 3.29 Estlink 1, sageduse funktsioon on väljas, pinge THD tulemused, Soome-Eesti suunal

Joonisel 3.30 ja 3.31 on näha 3 sekundi pinge harmoonikute tulemust, kui sageduse funktsioon on Soome-Eesti suunal väljas. Nagu eelnevatel pinge graafikutel Estlink 1-s, siis ka sellel graafikul, kõige kõrgem pingeharmoniku väärtus esineb H7. Kõrgeim väärtus H7 on, kui võimsus 70 MW ja reaktiivenergia on nulli lähedal. Eelnimetatud võimsuspunktis on pinge (1023 V) ületanud 1% normi piiri. Sama olukord jätkub H7 puhul, ent kõik kõrged väärtused esinesid siis, kui reaktiivenergia seatud nulli lähedale. Peale H7 harmooniku, kui võimsus on kõrgemal võimsusastmel, siis on H3, H5 ning H35 väärtused kõrgemal kui 400 V v.a H3, mille tulemused on kõrged siis, kui reaktiivenergia on seatud maksimumile. Peale H7 (ühel võimsuspunktil), jäid kõik muud harmoonikud normi piiresse.

Joonis 3.32 Estlink 1, sageduse funktsioon on väljas, pinge moodul ning nurga graafilised tulemused, Soome-Eesti suunal

Jooniselt 3.32 on näha H7 kõrge pinge väärtusega harmoonik, kus teatud võimsusastmel ületab 1 kV piiri. Nii H7 kui ka H5 väärtused paiknevad neljandas veerus. H3 ja enamuse H5 väärtustest jäävad esimesse veergu. H35 enamuse pingeharmonikud jäävad 0° kuni 180° vaheleaga H37 puhul aga vastu pidi ehk 180° kuni 360°(0°) vahele.

3.2 Estlink 2

Estlink 2 puhul ei ole võimalik reguleerida sagedust, seetõttu on andmed, mida võrrelda vähem. Järgnevas alapeatükis analüüsitatakse jätkuvalt mõlema suuna voolu ja pingeharmonikuid. Alapeatükis 3.2.1 on näha vooluharmonikute tulemusi ning 3.2.2 on näha pingeharmoniku tulemusi. Teatud probleemseid Estlink 2 harmoonikuid saab näha Lisa 2-s.

Tabel 3.3 Estlink 2

3.2.1 Vooluharmonikud

Siin alapeatükis vaadeldakse vooluharmonikuid ning antakse mõlema suuna graafikute lõpus ülevaade. Esmalt vaadeldakse Eesti-Soome vahelist suunda. Joonisel 3.33 on näha vooluharmoniku THD graafikut Eesti-Soome suunal. Joonisel on näha, et kui võimsus langeb, siis hakkab tõusma voolu THD väärtused. Alguses on tõus aeglane, kuid kui võimsus langetatakse 195 MW-lt 130 MW-le, siis väärtus hüppeliselt tõuseb. Väärtused asuvad normipiires.



Joonis 3.33 Estlink 2, voolu THD tulemused, Eesti-Soome suunal

Joonisel 3.34 ja 3.35 on vaadeldud 3 sekundi Eesti-Soome vooluharmoniku tulemusi. Joonistel on näha, kuidas erinevatel võimsusastmetel harmooniku väärtused tõusevad või langevad. Esimesel jooniselt on selgelt näha pealtvaates, millised harmoonikud on kõrgema väärtusega. Teisel joonisel on näha külgvaadet. Ülevaatlukuma pildi saamiseks on autor pannud lõputöösse mõlemad joonised. Joonistel on näha, et kõige kõrgem väärtus esineb H7 puhul, kui võimsus on keeratud maksimumi peale. H7 puhul on autor täheldanud, kui võimsus on 453,26 MW ning järgmisel hetkel 329 MW, siis nende väärtuste vahed on 5 A ehk märgatavalt erinevad. Väga kõrged väärtused esinevad ka H37-l, kui võimsus on madalal režiimil. Kokkuvõtlikult on kõige kõrgema vooluharmoniku väärtusega: H3, H7, H11, H13, H37.

Joonis 3.36 annab probleemsete harmoonikute hea ülevaate. Samuti nähtub, millised harmooniku väärtused on kõrgemad. Joonisel paistab eriti silma H3 ja H7 kõrged väärtused. Lisaks on näha, et enamuse H3 väärtused jäävad 30° - 30° vahele ning H7 väärtused teise veergu. H5 enamuse väärtused asuvad kolmandas veerus ning üksikud ka esimeses veerus. H11 harmooniku nurga graafikult on näha, et väärtused jäävad 90° - 180° vahele.

Joonis 3.36 Estlink 2, voolu moodul ning nurga graafilised tulemused, Eesti-Soome suunal

Joonis 3.37 Estlink 2, voolu THD tulemused, Soome-Eesti

Joonisel 3.37 on näha THD vooluharmoniku väärtused Soome-Eesti suunal. Autor täheldab, kui võimsus on madalamal režiimil, siis THD väärtused tõusevad. Mõlemale suunale on sarnane, et kõrgematel võimsusastmel olid väärtused üpris sarnase, alles madalatel võimsustel hakkavad väärtused kiiremini kasvama. Jooniselt nähtub, et voolu tulemused asuvad normipiires.

Joonistel 3.38 ja 3.39 on näha 3 sekundi kõik voolu harmoonikute tulemused H2 kuni H50. Selgelt on märgata, et kõige kõrgem väärtus esineb H7 puhul, kui võimsus on kõrgemal režiimil. Lisaks on märgata, et kõrgemad voolu väärtused esinevad madalatel harmoonikutel, kui võimsus on kõrgel, kõrgematel harmoonikutel on vastupidi. Teisel joonisel on näha külgvaadet antud suunal ning on selgelt näha, kuidas H7 erineb teistest väärtustest.

Lisa 2.2-s on näidatud igat probleemset harmoonikut eraldi. Selgelt on näha, et H7 puhul esineb kõrgeim väärtus 12,7 A, kui võimsus on maksimumi peal. Lisaks on näha probleemsete harmoonikute nurga graafikuid, mis näitab, millisesse veergu mingi vooluväärtus sattunud.

Joonis 3.40 Estlink 2, voolu moodul ning nurga graafilised tulemused, Soome-Eesti suunal

Joonis 3.40 annab ülevaatliku pildi probleemsetest harmoonikutest nurga graafiku kujul. Joonis annab parema ettekujutuse valitud harmoonikutest. Nimelt kõrgemad H7 väärtused esinesid esimeses veerus ning kolmel võimsuse katse korral H7 väärtus ületab 10A piiri.

3.2.2 Pingeharmonikud

Antud alapeatükis vaadeldakse pingeharmonikuid mõlemal suunal ja graafikute lõpus antakse tulemustest ülevaade. Alapeatüki esimesel joonisel 3.41 on näha pinge THD väärtused. Kui voolu väärtused on ühtlasel tõusul, siis pinge puhul väärtused erinevad üksteisest märgatavalt. Kui võimuse väärtused langevad, siis pinge THD väärtused tõusevad.

Joonis 3.41 Estlink 2, pinge THD tulemused, Eesti-Soome suunal

Joonisel 3.42 ja 3.43 on näha Eesti-Soome suunal 3 sekundi pinge harmooniku tulemusi. Selgelt eristub, et kõrgemate harmoonikute väärtused esinevad, kui võimsused on madalamal režiimil. Kõige kõrgemad väärtused esinevad madalate harmoonikute puhul, nagu näiteks H3, H5, H7.

H3 väärtused on kõige kõrgemad pealtvaatel ja külgvaatel toodud. Autor täheldab, et H3 pingeväärtused erinevatel võimsustel erinevad üksteisest vähe. Kõige madalam H3 väärtus esineb 668 V 130 MW ja kõrgem 752 V 195 MW, kõigest pea 100 V vahega.

Lisa 2.3 on autori poolt valitud probleemsed harmoonikud. Lisas 11 saab näha detailsemalt valitud üksikuid harmoonikuid. Eelnevalt on käsitletud, et H3 pingeharmoniku väärtused on stabiilses languses, kõige kõrgemad muutused esinevad H35 puhul, kui kõrgema võimsuse korral oli pinge väärtused madalad ning hiljem tõusis see rohkem kui 400 V, kui võimsus astmed vähendati.

Joonisel 3.44 on näha kõiki harmoonikuid nurga graafiku kujul. Jooniselt on näha, et kõrged H3 pinge väärtused esinevad teises veerus ning näiteks H5 puhul rohkem väärtusi esinevad neljandas veerus. Lisaks on märgata H35 erisust teistest harmoonikutest erinevate väärtuste osas, erinevatel võimsuse režiimidel.

Joonis 3.44 Estlink 2, pinge moodul ning nurga graafilised tulemused, Eesti-Soome suunal

Joonis 3.45 Estlink 2, pinged THD tulemused, Soome-Eesti suunal

Joonisel 3.45 on näha THD pinged graafikut, võrreldes Eesti-Soome suunaga, siis antud suunal pinged THD langeb kui võimsust langetati. Joonisel 3.46 ja 3.47 on näha Soome-Eesti 3 sekundi harmooniku sekundi pinged harmooniku tulemusi ning sama olukord on ka siin, kus kõrgemate harmoonikute puhul kõrgemad pingeväärtused esinevad madalate harmoonikute korral. Kui eelmisel suunal oli kõige kõrgem harmoonik H3, siis sellel suunal on kõige kõrgem H7 ja seejärel H3. H7 kõrgeim väärtus 881 V esineb, kui võimsus on maksimaalsel režiimil.

Lisa 2.4 on näidatud üksikult teatud harmoonikuid. Kui võrrelda H3 ning H7, siis on näha huvitavat liikumist võimsusastmetel. H3 kõrgeim väärtus esineb madalal võimsusel, aga H7 puhul on vastupidi. Mõlema harmooniku lineaarne tõus on järsk ja mõlema harmooniku väärtused esinevad kolmandas ning neljandas veerus. Kõrgemate harmoonikute puhul on H35 puhul kõige kõrgem pingeväärtus 129 MW-l, kui pinge ulatus peaaegu 400 V.

Joonis 3.48 Estlink 2, pinge moodul ning nurga graafilised tulemused, Soome-Eesti suunal

Joonisel 3.48 Soome-Eesti suunal on märgata, et täpselt pooltes harmoonikutes lineaarsirge tõuseb ning teistes langeb. Nurkade puhul on H17, H29 ja H31 mõned harmoonikud esimeses ja teises veerus, ülejäänutes jäävad harmoonikud 180° - 360° (0°) vahele. Kui panna kõik nurgad kokku nähtub, et madalamatel harmoonikutel on pinge suurem, kui kõrgematel harmoonikutel.

3.3 Järeldused Estlinkidest

Alapeatükis 3.3 käsitletakse Estlink 1 ja Estlink 2 voolu -ja pingeharmoniku tulemusi. Estlink 1-s võrreldakse mõlemaid suundi ning autor annab oma hinnangu kui sageduse funktsioon on sees ja väljas. Estlink 2 puhul võrdleb autor erinevaid suundi.

3.3.1 Vooluharmonikud

Estlink 1 puhul kui sageduse funktsioon on sees, autor uuris mõlemaid suundi ning avastanud, et mõlemal suunal kõige kõrgem harmooniku väärtus oli H11. Nende kõrgemad vooluväärtused on tekkinud mõlemal suunal madala võimsusastme korral. Eesti-Soome suunal kõige kõrgem, kui võimsus on 17,5 MW 0 MVAR ja Soome-Eesti suunas, kui võimsus on 17,5 MW 80 MVAR. Autor juhib tähelepanu, et Eesti-Soome suunal H11 puhul on esinenud kõrged väärtused, kui reaktiivenergia seatud 0 lähedale. Mõlemal suunal madalate harmoonikute puhul tõusevad vooluväärtused, kui võimsus langeb. Kõige rohkem valmistab probleeme H3, H5, H7, H9 ja H11. Kõrgemate harmoonikute osas on Soome-Eesti suunal probleemsed H47 ja H35 harmoonik. Eesti-Soome suunal on probleemne H33, H47 aga H35 asub normipiires. Ülejäänud harmoonikud jäävad alla 1% normipiiri.

Vooluharmonikutes ei esinenud eriti probleeme. Vastavalt standardile EVS 50160 [3] on lubatud mõningates kõrgemaid tulemusi, seda saab lugeda ajutiselt normaalseks. Kirjanduses on leitud, et voolu moonutuste kujutamine THD- väärtustega on tihti eksitav. Väikese voolu korral võib harmoonikute suhteline osakaal voolus ja seega ka THD olla kõrgem, kuid ohtlikku mõju elektrivarustusele see ei avalda [1].

Vooluharmonikute puhul, kui sageduse funktsioon on väljas, võib järeldada, et H11 funktsiooni sees korral on kõige problemaatilisem harmoonik. Lisaks on ka H3 ja H5 väga probleemsed võrgule. Neil on üksteisele väga sarnased vooluväärtused. Kui vaadelda kõrgemaid harmoonikuid, siis on näha, et Eesti-Soome suunal, kui võimsus oli 105 MW, siis H35 ja H47 on üle 1%. Soome-Eesti suunal on kõrgemate harmoonikute puhul kõige problemaatilisem H47, kui võimsus on maksimumi peal.

Autor märkas, et kõige rohkem elektrisüsteemile valmistasid probleeme seitse harmoonikut, kui sageduse funktsioon oli sees ning väljas. Nendeks olid: H3, H5, H7, H9, H11, H35 ja H47. Mõlemal funktsioonil on H11 kõige problemaatilisem, mis mitmes võimsuspunktides ületas 1% normipiiri. Lisaks on märgata H11 vooluharmoniku puhul, et Eesti-Soome suunal esinesid kõrgemad voolu väärtused kui vastupidisel suunal. THD graafikud kõikides olukordades on lineaarne sirge tõusu suunas, kui võimsus langeb. Autor märkas, et enamuse H3 ja H7 harmoonikud asuvad kolmandas veerus kõikidel funktsioonidel. H5 puhul on näha, et Eesti-Soome suunal mõlemal olukorral asuvad vooluharmoniku väärtused esimesel veerus kuid Soome-Eesti suunal esineb mõned vooluharmoniku väärtused ka teises veerus. Madalate harmoonikute puhul esinesid kõige kõrgemad väärtused, kui sageduse funktsioon on väljas Eesti-Soome suunal. Ülejäänud olukordadel kõik madalad harmoonikud v.a H11 jäid alla 3 A. Kõrgemate harmoonikute puhul on näha, et Soome-Eesti suunal esinesid tavapäraselt kõrgemad vooluväärtused, kuid enamuse vooluharmonikud jäid alla 1 A.

Estlink 2 puhul, Eesti-Soome suunal on kõige problemaatilisem H7. Kui vaadata ka teisi harmoonikuid, siis võrgule on probleeme valmistanud H3, H5, H7, H11 ja H13 harmoonikud. Problemaatiline harmoonik antud suunal on ka H37. Seda põhjusel, et H37 voolu tippväärtused on kõrgemal, kui kõikidel teistel madalatel harmoonikutel, v.a H7. Kõrged voolu väärtused esinevad H37, kui võimsus on madal. Kui võimsus on kõrge, siis voolu väärtused on madalad, aga alates 326,3 MW-st hüppeliselt voolu väärtused tõusevad. Sarnane olukord on H47 ja H49, kus H47 on teatud võimsuspunktis üle 4 A. Soome-Eesti puhul on samuti H7 kõige problemaatilisem harmoonik, mille tipp 12,7 A. Vastupidisel suunal on H7 tippväärtus 8,6 A. Soome-Eesti suunal on H3 ja H5 omavahel sarnased, sest nende kõrged voolu väärtused esinevad, kui kui võimsus on maksimumi peal. Madalad voolu väärtused erinevad kõikidel madalatel harmoonikutel, kui võimsus on madalal. Keskmistel harmoonikutel H23 ja H25 on üllatavalt kõrged väärtused. Vaadates H35, H37, H47 ja H49, siis nendel harmoonikutel olid kõrged voolu väärtused madalatel võimsusastemetel.

3.3.2 Pingeharmonikud

Estlink 1 korral kui sageduse funktsioon on sees, on vooluharmonikute korral kõige probleemsem harmoonik H11, siis pingeharmonikute korral H7. Kõige kõrgem pingeväärtus on Soome-Eesti suunal toimunud kõrge võimsuse korral 280 MW aga Eesti-Soome suunal on enamuse H7 pingeväärtused kõrgemad erinevatel võimsuspunktides kui

vastupidisel suunal. Eesti-Soome suunal H5 kõrgemad väärtused esinevad madala võimsuse korral. Soome-Eesti suunal, aga vastupidi. Kui vaadelda H3, siis on näha, et Eesti-Soome suunal on ta erinevatel võimsuspunktides vägagi stabiilne, aga vastupidisel suunal ebastabiilne. Kõrgemad harmoonikud ei paistnud väga silma kõrgete pingeväärtuste osas Eesti-Soome suunal, v.a H33 ja H47, aga Soome-Eesti suunal oli märgata palju rohkem kõrgemaid harmoonikuid.

Soome-Eesti suunal poolte graafikute puhul lineaarsirge pigem langeb kui tõuseb. Kõige kõrgema väärtusega harmoonikud on madalad harmoonikud, erandina H35, mis on märgatavalt kõrgema väärtusega kui vastupidisel suunal. Suuna muutuste korral on pingetulemused erinevamad kui voolu harmoonikute puhul. Pingeväärtused Soome-Eesti suunal on madalate harmoonikute puhul (H5 enamusi võimsusi) kõrgemad kui Eesti-Soome suunal. Autor täheldab, et kahe- ja enamakordsed erinevused suundade vahel esinenud kõrgemate võimsusastmetel korral.

Eesti –Soome suunal sageduse funktsioon väljas puhul enamusi harmoonikute puhul pingetõuseb, kui võimsus väheneb. Erilist tähelepanu väärivad harmoonikud H35 ja H37, nende puhul ühel pingel tõuseb, teises langeb. Seega teatud võimsusastmetel on pingeharmoniku väärtused madalad, aga teistel võimsusastmetel on väärtused kõrged. Kõige kõrgem pingetõus esineb harmoonikutel H5, H7 ning H11. Kui sageduse funktsioon väljas, siis pingetõus erinevatel suundadel on sarnased, märkimisväärset erinevust kahe suuna vahe ei täheldatud, v.a. kõrgetel võimsusastmetel on kahe suuna vahel H5 ja H37 märgatav pingetõus erinevused suuremad. Tulemustest saab järeldada, et pingetõus puhul mõjutab sageduse reguleerimine kahe suuna vahelisi tulemusi. Sageduse funktsioon väljas mõjutab pingetõus väärtusi märgatavalt vähem, kui sageduse funktsioon on sees.

Enamusi nurgagraafikud on kolmandas ning neljandas veerus. Kui vaadata kõiki nurki koos, siis joonistuvad selgelt välja madalamad harmoonikud H5, H7 ja H11, mis on teistest harmoonikutest kaugemal. Selline tulemus nähtub moodulgraafikul. Kui sageduse funktsioon on sees, siis nähtub THD – graafikute puhul, et kui langeb võimsus, siis langeb ka lineaarsirge. Väärtuste osas ei esine ühtegi ebaühtlast tulemust.

Mõlemal suunal kõige kõrgemad pingeharmoniku väärtused on H7 harmooniku korral, eelkõige Eesti-Soome suunal. On näha, et mitmed pingeharmoniku väärtused H7 harmooniku korral ületavad 1 kV. Autor on täheldanud, et Eesti-Soome suunal esinevad

kõrged pingeharmoniku väärtused H7 korral, kui reaktiivenergia seatud maksimumi peale. Väiksed väärtused, kui reaktiivenergia oli seatud 0 lähedale. Samuti on kõrged pingeharmoniku väärtused mõlemal suunal H11, aga Eesti-Soome suunal on need keskmiselt natukene kõrgemad. Kõrgemate harmoonikute puhul on märgata, et kõik harmoonikud olid alla 400 V, ainult H35 on mõlemal suunal teistest kõrgemal.

Mõlemal olukorral kui sageduse funktsioon on sees ning väljas oli kõige problemaatilisem harmoonik H7, kus mõlemal suunal mitmed pinge väärtused erinevatel võimsuspunktides hakkas 800 V-st. Kõige rohkem kõrgemaid väärtusi esinesid Eesti-Soome suunal. Autor märkas, et teiseks probleemseks harmoonikuks on H3 ja H5. Kui sageduse funktsioon on sees, siis harmoonik H5 esines kõrgemad pingeharmoniku väärtused aga vastupidine olukord esines, kui sagedusefunktsioon on väljas, siis H3 väärtus oli kõrgem kui H5.. Lisaks on näha, et mõlemal suunal ning erineval funktsioonide korral H3 asub esimeses veerus ning H5 ja H7 asuvad neljandas veerus. H11 pingeharmoniku väärtused olid sarnased üksteisele, asudes enamasti esimesel veerus ning keskmised väärtused on 400 V. THD graafik oli kõikides olukordades languses. Kõrgemate harmoonikute puhul valmistas kõige rohkem probleeme H35, kuid mitte ühesgi olukorras pinge väärtus ei ületanud üle 500 V ning kui sageduse funktsioon on väljas siis esinesid kõrgemad H35 pingeharmoniku väärtused kui sagedus funktsioon on sees.

Estlink 2 puhul on Eesti-Soome suunal kõige kõrgemad harmooniku pingeväärtused tekkinud H3. Autor osundab, et harmoonik H3 on antud suunal erinevatel võimsuspunktidel stabiilne. Probleemsed harmoonikud on veel H5 ja H7. Neid võrreldes on erinevatel võimsusastmetel H7 stabiilsem kui H5. Soome-Eesti suunal on kõige problemaatilisem harmoonik H7, kui võimsus maksimumi peal ja seejärel tasapisi langeb. H3 võrreldes H7-ga on vastupidine olukord, kus võimsusastme maksimumi väärtuse korral on pingeharmonikud madalad, aga seejärel hakkavad tõusma. Mõlemal suunal H23, H25, H35, H37, H47 ja H49 on kõrged pinge harmooniku väärtused, kui võimsusastmed on madalad.

Soome-Eesti suunal THD- väärtused vähenevad, kui võimsus langeb. Eesti-Soome suunal on vastupidine olukord. Estlink 2-s, peale ühe THD pinge tõusis. Estlink 1-s, peale ühe, THD pinge tulemused on languses. Tulemustest selgub, et Soome-Eesti suunal on pingeharmonikud märgatavamalt ebastabiilsemad, kui Eesti-Soome suunal. Siinjuures on oluline märkida, et töö autor on analüüsinud tulemusi lähtuvalt graafikutest.

Autor ei täheldanud pingegraafikutes erinevate suundade puhul märkimisväärset muutust. Pea kõigi väärtused on olnud sarnased. Üksnes madalamate harmoonikute puhul on erinevate suundade erinevuste vahe kõrgem, aga sedagi mitte üle kahe korra. Kõrgetes harmoonikutest H37 vahe erinevatel suundadel, on üle kahe korra.

KOKKUVÕTE

Järjest uute elektriseadmete turule tulekuga on üha enam hakatud pöörama tähelepanu elektrikvaliteedile, mis omakorda tingib vajaduse uurida harmoonikute teket ja summutamise võimalusi. Seda enam, et Euroopa Liidus on püstitatud eesmärk järkjärguliseks taastuenergiale üleminekuks. Parema elektrivarustuse ja Venemaa elektrivarustusest sõltumatuse saamiseks on Eesti ja Soome vahele rajatud alalisvoolu ühendused läbi kaablite ESTLINK-1 ja ESTLINK-1, mille harmoonikute uurimiseks viidi käesoleva lõputöö raames läbi mõõtmised. Selle tulemused on aluseks harmoonikute modelleerimiseks, mis võimaldab analüüsida harmoonikute teket ülekandevõrgus ning nende mõju elektrisüsteemi seadmetele.

Lõputöö eesmärgiks oli uurida Estlink 1 ning Estlink 2 alalisvooluühenduste harmoonikute karakteristikuid. Selleks teostati mõõtmised erinevatel võimsusastmetel ning erinevatel võimsusvoo suundadel (Eestist-Soome kui Soomest-Eestisse). Lisaks uuriti Estlink 1 puhul sageduse reguleerimisfunktsiooni mõju harmoonikute karakteristikutele. Mõõtmised viidi läbi 2019. aasta suve lõpus, mille raames paigaldati kvaliteedimõõteseadmed eelnimetatud objektide mõõteahelatesse.

Töö esimeses peatükis anti teoreetiline ülevaade harmoonikutest, nende mõjust seadmetele ja nende kompenseerimise võimalustest. Kirjeldati alalisvooluühendustes kasutatavaid erinevaid muunduriseadmeid. Täpsemalt uuriti vool- ja pingemuunduritel põhinevaid konverteriseadmeid. Peale selle kirjeldati harmoonikute modelleerimist, selle vajalikkust ning väljakutseid. Selgitati peamisi probleemkohti harmoonikute modelleerimisel. Kirjeldati erinevaid modelleerimise mudeleid ja autori arvates parimaks kasutatavaks mudeliks on ajadomeeni simulatsiooni.

Töö teises peatükis käsitleti täpsemalt alalisvooluühendusi Eesti ja Soome vahel. Tutvustati lähemalt nende mõõtmisteks kasutatud mõõteskeemi ja mõõtmisseadet. Mõõtmistöde läbiviimiseks kasutati a-eberle seadet, mis võimaldab lisaks harmoonikute moodulile mõõta ka nende nurka, mis on tähtis informatsioon nende modelleerimiseks. Eraldi vaadeldi Estlink 1 ning Estlink 2 mõõtmiste läbiviimist. Kirjeldati standardi IEC 61000-4-30 põhinevat matemaatilist käiku suuremahuliste algandmete analüüsimiseks. Autor andis ülevaate erinevatest võimalustest mõõtmistulemuste graafiliseks esitamiseks.

Töö kolmandas osas vaadeldi konkreetsemalt saadud mõõtmistulemusi, tuues välja erinevaid mõõtmistulemuste graafikuid. Eraldi on vaadeldud pinge- ja vooluharmonikuid ja THD-d. Tähelepanu pöörati agregeeritud 3 sekundi andmetele. Kolmandas osas vaadeldakse eraldi pinge -ja vooluharmonikutest ning THD-st. Tuuakse esile 3 sekundi H2-H50 harmoonikute THD-d, mis on oluline modelleerimiseks ning analüüsiti harmoonikuid, mille suurused olid erinevates tööpunktidest kõige silmapaistvamad.

Enamus vooluharmonikud on normi piires, mõned lubatust kõrgemad ehk üle 1% normipiiri. Kuna katse kestus ainult 10 minutit, siis tegemist lühiajalise muutusega, mis omakorda ei mõjuta võrku pikemas perspektiivis. Suuremad probleemid on vooluharmonikute Eesti-Soome suunal, kus esinesid kõrgemad voolu väärtused. Tähelepanu väärrib veel, et kui sageduse funktsioon on väljas, siis madalamate vooluharmonikute väärtused on kõrgemad, kui sageduse funktsioon on sees.

Analüüsi tulemusena on autor pannud tähele, et kui jälgida pingete kõikumist, siis madalamatel harmoonikutel on kõigis graafikutes pingeharmonikute väärtused märgatavalt kõrgemal. Estlink 1 sageduse reguleerimise funktsiooni väljasoleku korral on märgata rohkem pingeharmonikute väärtuste „hüppamist“ erinevatel võimsus astmetel. Autori hinnangul on kõige suurema „Hüppega“ pingeharmonik Soome – Eesti suunal 70 MW – 120 MVAR, kui sageduse funktsioon on väljas. Nimetatud võimsusastmel on harmoonikute graafikud ebaühtlased. Pingeharmonikute puhul sageduse funktsioon sees või väljas mõjutab tulemust vähe, pigem on olulisem mõjutada võimsusvoo suund. Estlink 2 probleemsete pingeharmonikute graafikutes Lisas 2-s nähtub, et enamusel lineaarnesirge tõuseb, kui võimsus väheneb. See viitab sellele, et pingeharmonikute väärtused Estlink 2-s on tavaliselt kõrged, kui võimsus on madalal režiimil kuid see kehtib ainult kõrgematel harmoonikutel. Viimati nimetatu kehtib ainult kõrgemate harmoonikute puhul, sest Soome – Eesti suunal on madalamatel pingeharmonikutel pingeväärtused pigem väiksemad, kui võimsus madal. Kokkuvõtvalt võib väita Estlink 2 puhul, et suuna muutus mõjutab pingeharmonikute käiku.

Autori hinnangul võivad mõõtmistulemuste põhjal analüüsitud andmetest nähtuvalt võrgus pigem tekitada probleeme vooluharmonikud, kui pingeharmonikud. Autor järeldab seda sellest, et vooluharmonikud on erinevatel võimsuspunktidest normist kõrgemal. Lõputöö eesmärgiks ei olnud vaadata mõõtmistulemuste vastavust standardile, vaid eesmärgiks on seatud vaadelda erinevatel võimsusastmetel harmoonikute tulemusi.

Antud lõputöö puhul saab anda hinnangu alalisvooluühendustele Estlink 1 ja Estlink 2 harmooniku karakteristikutele. Lõputöö jaoks teostatud mõõtetulemused ja nende andmete põhjal saab parema ülevaate voolu moodulist, nurga tulemustest ja THD-st. Antud lõputöö jaoks viidi katsed läbi 10 minuti jooksul. Selleks, et saada parem ülevaade harmoonikute tekkimisest elektrivõrgus, tuleb autori hinnangul teostada mõõtmisi pikema aja jooksul. Sellest tulenevalt puudub oluline teave põhivõrgus esinevate harmoonikute nurgast, mis on eeltingimuseks modelleerimiseks. Antud lõputöö annab alusandmed teadlastele ning elektrivõrguettevõtetele teostada modelleerimist.

SUMMARY

With the advent of new electrical equipment on the market, more and more attention has been paid to the quality of electricity, which in turn necessitates the study of the formation of harmonics and the possibilities of attenuation. As the European Union has set itself the goal of a gradual transition to renewable energy. In order to obtain a better electricity supply and independence from the Russian electricity supply, direct current connections have been established between Estonia and Finland through the cables ESTLINK-1 and ESTLINK-2, the harmonics of which were measured in the framework of this dissertation. The results are the basis for harmonic modeling, which makes it possible to analyze the formation of harmonics in the transmission network and their impact on the electrical system equipment.

The aim of the thesis was to study the harmonic characteristics of Estlink 1 and Estlink 2 DC connections. For this purpose, measurements were performed at different power levels and in different power flow directions (from Estonia-Finland as well as from Finland-Estonia). In addition, the effect of the frequency control function on harmonic characteristics was studied for Estlink 1. The measurements were carried out at the end of the summer of 2019, during which quality measuring devices were installed in the measuring circuits of the aforementioned objects.

The first chapter provides a theoretical overview of harmonics, their effect on equipment and the possibilities of their compensation. Various converter devices used in DC connections have been described. Converters based on current and voltage converters were studied in more detail. In addition, the modeling of harmonics, its necessity and challenges were described. The main problem areas in harmonic modeling were explained. Different modeling models were described and the author believes that the best model used is time domain simulation.

The second chapter dealt in more detail with the direct current connections between Estonia and Finland. The measuring scheme and measuring device used for their measurements were introduced in more detail. A-eberle device was used to perform the measurement work, which allows to measure not only the harmonics module but also their angle, which is important information for modeling them. Estlink 1 and Estlink 2 measurements were observed separately. A mathematical procedure based on IEC 61000-

4-30 for the analysis of large-scale raw data was described. The author gave an overview of different possibilities for graphical presentation of measurement results.

In the third part of the work, the obtained measurement results were examined more specifically, pointing out different graphs of the measurement results. Voltage and current harmonics and THD have been considered separately. Attention was paid to the aggregated 3 second data. In the third part, separate voltage and current harmonics and THD are considered. The THDs of the 3-second H2-H50 harmonics, which are important for modeling, are highlighted and the harmonics with the most prominent values at different operating points were analyzed.

Most current harmonics are within the norm, some higher than allowed, ie more than 1% of the norm. As the test lasted only 10 minutes, this is a short-term change, which in turn does not affect the network in the long run. The biggest problems are with the current harmonics in the Estonian-Finnish direction, where higher current values occurred. It is also worth noting that when the frequency function is off, the values of the lower current harmonics are higher when the frequency function is on.

As a result of the analysis, the author has noticed that if we observe the voltage fluctuations, the lower harmonics have significantly higher values of the voltage harmonics in all graphs. When the Estlink 1 frequency control function is off, more voltage harmonic values "jump" at different power levels can be noticed. According to the author, the voltage harmonic with the largest "jump" in the direction of Finland - Estonia is 70 MW - 120 MVAR, when the frequency function is off. At this power level, the graphs of the harmonics are uneven. For voltage harmonics, the frequency function on or off has little effect on the result, rather it is more important to influence the direction of the power flow. The graphs in the Appendix of Estlink 2 problem voltage harmonics show that most of the linear line increases as the power decreases. This suggests that the values of voltage harmonics in Estlink 2 are usually high when the power is in low mode, but this only applies to higher harmonics. The latter applies only to higher harmonics, because in the Finnish - Estonian direction, lower voltage harmonics have lower voltage values than low power. In summary, in the case of Estlink 2 it can be stated that the change of direction affects the course of voltage harmonics.

According to the author, it can be seen from the data analyzed on the basis of the measurement results that current harmonics rather than voltage harmonics can cause problems in the network. The author concludes from this that current harmonics are higher than normal at different power points. The aim of the dissertation was not to look at the

compliance of the measurement results with the standard, but the aim is to look at the results of harmonics at different power levels.

In this dissertation, the harmonic characteristics of the DC links Estlink 1 and Estlink 2 can be estimated. The measurement results performed for the thesis and their data provide a better overview of the current modulus, angle results and THD. For this thesis, the experiments were performed in 10 minutes. In order to get a better overview of the formation of harmonics in the electricity network, the author estimates that measurements should be performed over a longer period of time. It is known that Elering does not have a device for measuring the angle of harmonics. As a result, there is no information on the harmonic angle in the transmission network, which is a prerequisite for modeling. This dissertation provides basic data for researchers and power grid companies to perform modeling.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt ja J. Kilter, „Jaotusvõrgud“, Tallinn: TTÜ, 2007.
- [2] M. A Masoum ja E. F. Fuchs, „Power Quality in Power Systems and Electrical Machines“, Second edition, 2015.
- [3] Eesti standard, EVS-EN 50160:2010 Avalike elektrivõrkude pingetunnussuured, Eesti standardikeskus, 2011.
- [4] J.C. Das, „Power System Harmonics and Passive Filter Designs“, 2015.
- [5] F. C. De La Rosa, „Harmonics and power systems“, USA, 2006.
- [6] MIGRATE, „D5.1 Critical PQ phenomena and sources of PQ disturbances in PE rich power systems“ 11.05.2017. [Võrgumaterjal] Saadaval: https://www.h2020-migrate.eu/Resources/Persistent/f337837c7a68765f3d38a310427e67d1c0f44cce/MIGRATE_D5-1_V1_TUT.pdf [Kasutatud 11.05.2020]
- [7] G. J. Wakileh, „Power Systems Harmonics“, Springer, 2001.
- [8] Energiatalgud, „Elektrienergia kvaliteed Elering AS 110 kV võrgus,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://energiatalgud.ee/img_auth.php/c/cd/Elering_AS_Elektrienergia_kvaliteet_Elering_AS_110_kV_v%C3%B5rgus.pdf [Kasutatud 07.04.2020]
- [9] Eesti standard, EVS-EN 61000-4-7: 2002/A1:2009 Elektromagnetiline ühilduvus, Eesti standardikeskus, 2009.
- [10] M. B. Marz, „Interharmonics: What they are, where they come from and what they do“, Waukesha, WI, 2016. [Võrgumaterjal] Saadaval: <https://ccaps.umn.edu/documents/CPE-Conferences/MIPSYCON-Papers/2016/Interharmonics.pdf> [Kasutatud 11.05.2020]
- [11] A. F. Zobia, S. H. E. Abdel Aleem, „Power Quality in future electrical power systems“, UK, 2017.
- [12] S. Heier, „Grid integration of wind energy conversion systems“, Kassel University, Germany, 1998.
- [13] Dr Radnya A Mukhedkar, „Introduction to HVDC“, ALSTOM. [Võrgumaterjal] Saadaval: https://sari-energy.org/oldsite/PageFiles/What_We_Do/activities/HVDC_Training/Presentations/Day_7/LCC_vs_VSC_ALSTOM.pdf [Kasutatud 11.05.2020]
- [14] V. K. Sood, „HVDC and facts controllers“, Kluwer Academic, USA, 2004.

- [15] J. Arrillaga, "High voltage direct current transmission", University of Canterbury, New Zealand, 1983.
- [16] J. Arrillaga, N.R. Watson, "Power system harmonics." Chichester John Wiley & Sons 2003.
- [17] MIGRATE, "D5.2 Simulation models for power-quality studies on power-electronics rich power network" 30.06.2017. [Võrgumaterjal] Saadaval: https://www.h2020-migrate.eu/Resources/Persistent/c2f6060f90c4ce8a3856eb06e22750c5bb3d1f19/Migrate_D_5_2_draft_v4_ReducedSize.pdf [Kasutatud 11.05.2020]
- [18] MIGRATE, "D5.3 Propagation of PQ disturbances through the power networks" 26.06.2018. [Võrgumaterjal] Saadaval: <https://www.h2020migrate.eu/Resources/Persistent/95f2a60ed5ea3a179bac541b5fe9daf74e13cc75/D5.3%20%20Propagation%20of%20PQ%20disturbances%20through%20the%20power%20networks.pdf> [Kasutatud 11.05.2020]
- [19] A. Testa, M. F. Akram, R. Burch, G. Carpinelli, G. Chang, V. Dinavahi, C. Hatziaioniu, W. M. Grady, E. Gunther, M. Halpin, P. Lehn, Y. Liu, R. Langella, M. Lowenstein, A. Medina, T. Ortmeyer, S. Ranade, P. Ribeiro, N. Watson, J. Wikston, and W. Xu "Interharmonics: Theory and Modeling", 2007. [Võrgumaterjal] Saadaval: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4302786> [Kasutatud 02.09.2020]
- [20] Pål Otto Eide, Roger Fredheim, Jan Spånberg, Bernt Bergdahl, Lars-Erik Juhlin, "Simulation of harmonic problems in the Kristiansand HVDC station".
- [21] B. Peterson, J. Rens, G. Botha, A. M. Blanco, J. Meyer, J. Desmet, "Impact of Aggregation Interval on Harmonic Phase Angle Measurements", IEE 9th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), Bologna, Italy, 2018.
- [22] S. J. Ranade, W. Xu, "An overview of harmonics modeling and simulation".
- [23] Elering, "Estlink 1 vs Estlink 2", [Võrgumaterjal] Saadaval: <http://estlink2.elering.ee/estlink-1-vs-estlink-2/> [Kasutatud 11.05.2020]
- [24] L. Ronström, M.L. Hoffstein, R. Pajo, M. Lahtinen, "The Estlink HVDC Light Transmission System", Tallinn, 2007.
- [25] "Extremely robust power grid analyzers: PQ-Box 100 and PQ-Box 200", a-eberlee Brošüür. [Võrgumaterjal] Saadaval: http://www.livingston-products.com/products/pdf/161214_1_en.pdf [Kasutatud 11.05.2020]
- [26] J. Meyer, R. Stiegler, J. Kilter, "Accuracy of Voltage Instrument Transformers for Harmonic Measurements in Elering's kV Transmission Network", PQ 2016, Estonia.

- [27] Ü.Treufeldt, Kõrgepingeseadmed, Tallinn, 2018.
- [28] L.Kütt, „Mittetavapärased mõõtemuundurid (NCIT) ning tehnilised tingimused nende rakendamiseks Eesti elektrivõrguettevõtetes“, TTÜ, Tallinn, 2012.
- [29] IEC, IEC 61000-4-30 Elektromagnetiline ühilduvus (EMC). Osa 4-30. Katsetamis- ja mõõtmistehnikad. Elektrikvaliteedi mõõtmise meetodid, IEC 2008.
- [30] B. Peterson, J. Rens, G. Botha, A. M. Blanco, J. Meyer, J. Desmet, „Impact of Aggregation Interval on Harmonic Phase Angle Measurements“, IEE 9th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), Bologna, Italy, 2018.
- [31] IEC 61000 4-7, Elektromagnetiline ühilduvus (EMC). Osa 4-7: Testimine ja mõõtmistehnikad - harmooniliste ja harmooniliste ühendite mõõtmised ja seadmed elektrivarustuse jaoks sellega ühendatud süsteemid ja seadmed, IEC 2009.