



**TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL**  
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**HARMOONRESONANTSI TEKKIMISE  
PÕHJUSED JA MÕJU ELEKTRIVÕRGU  
TALITLUSELE**

**CAUSES OF HARMONIC RESONANCE AND ITS  
IMPACT ON ELECTRICAL NETWORK OPERATION**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Stanislav Šeptitski

Üliõpilaskood: 211784AAVM

Juhendaja: professor Jako Kilter

Tallinn 2023

## 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 tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina, Stanislav Šeptitski

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Harmonoonresonantsi tekkimise põhjused ja mõju elektrivõrgu talitlusele“, mille juhendaja on Jako Kilter
- 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 kaautorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi egaisikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

18.05.2023

---

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

# LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

<i>Autor:</i> Stanislav Šeptitski	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> Harmoonresonantsi tekkimise põhjused ja mõju elektrivõrgu talitlusele	
<i>Kuupäev:</i> 18.05.2023	68 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja:</i> professor Jako Kilter	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Lõputöös uuritakse harmoonresonantsi tekkimist ning selle mõju elektrivõrkude talitlusele. Kaasaegsetes elektrisüsteemides kasvab üha enam mittelineaarsete tarbijate osakaal ning sellest tulenev harmoonikute genereerimise tase. Harmoonikutest põhjustatud resonantsid rikuvad elektrienergia kvaliteeti ning ohustavad võrguga ühendatud elektriseadmeid.</p> <p>Töö käigus analüüsitakse PSCAD tarkvara abil harmoonresonantsi olemust erinevate pingeklasside ja võrgutopoloogiatega korral. Analüüsi teostamiseks vajalikud mudelid on koostatud reaalse ülekande- ja jaotusvõrgu andmete põhjal. Esimesena uuritakse harmoonresonantsi tekkimist 110 kV võrgus. Teisena vaadeldakse 35/6 kV alajaama alampinge poolel kondensaatorpatarei paigaldamisega põhjustatud harmoonresonantsi tekkimist. Viimasena uuritakse tarbija madalpinge elektripaigaldises uute kondensaatorpatareide paigaldamise mõju pingele ja voolu mittelineaarhoonutusele.</p> <p>Tulemusena on leitud, et resonantsi sageduse arvutamine lihtsustatud valemitega ei anna piisavat ülevaadet toimuvatest protsessidest ning harmoonresonantsi analüüsiks on soovitatav elektrivõrkude modelleerimistarkvara kasutus. Teiseks peamiseks järelduseks on see, et lahkähälestatud filtrid võimaldavad ennetada harmoonresonantsi tekkimist laias sagedusvahemikus ning nende omasagedus ei pea olema võrdne uuritava sõlme resonantsisagedusega. Töö tulemused võivad olla kasulikud võrguettevõtetele ja ettevõtetele, kus on paigaldatud kondensaatorpatareid või kes kaaluvad nende paigaldamist.</p>	
<i>Märksõnad:</i> harmoonresonants, harmoonikud, mittelineaarhoonutus, kondensaatorpatareid, elektri kvaliteet	

## ABSTRACT

<i>Author:</i> Stanislav Šeptitski	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Causes of harmonic resonance and its impact on electrical network operation	
<i>Date:</i> 18.05.2021	<i>68 pages</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> professor Jako Kilter	
<i>Abstract:</i> <p>This thesis investigates the occurrence of harmonic resonance and its impact on operation of electrical networks. In modern power systems the share of non-linear loads and the resultant level of harmonics generation is constantly increasing. Resonances caused by harmonics deteriorate the quality of electrical power and can damage equipment that is connected to the grid.</p> <p>The analysis is carried out with the help of PSCAD modelling software and involves different voltage classes and grid topologies. The necessary models are based on real transmission and distribution system data. In the first case study the occurrence of harmonic resonance in a 110 kV system is analysed. The second case study involves harmonic resonance caused by the installation of a capacitor bank on the low voltage side of a 35/6 kV substation. The last case study analyses the impact of placing a new capacitor bank on harmonic voltage and current distortion in consumer low voltage installations.</p> <p>As a result, it was found that simplified resonance frequency calculation does not give a sufficient understanding of occurring processes and the use of modelling software is preferable. The second main conclusion was that detuned filters prevent harmonic resonance within a wide frequency range and that the natural frequency of the filter does not have to be equal to the resonance frequency of the node in question. The findings of this thesis are useful for electrical grid operators and enterprises that have capacitor banks installed or are considering installing them.</p>	
<i>Keywords:</i> Harmonic Resonance, Harmonics, Harmonic Distortion, Capacitor Banks, Electric Power Quality	

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	<b>Harmonresonantsi tekkimise põhjused ja mõju elektrivõrgu talitlusele</b>
Lõputöö teema inglise keeles:	<b>Causes of harmonic resonance and its impact on electrical network operation</b>
Üliõpilane:	<b>Stanislav Šeptitski, 211784AAVM</b>
Eriala:	<b>Elektroenergeetika</b>
Lõputöö liik:	<b>magistritöö</b>
Lõputöö juhendaja:	<b>prof. Jako Kilter</b>
Lõputöö kaasjuhendaja: (ettevõtte, amet ja kontakt)	
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	<b>30.06.2022</b>
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>18.05.2022</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

## 1. Teema põhjendus

Kaasaegsetes elektrivõrkudes on üha rohkem jõuelektroonikal põhinevaid tarbijaid ja tootmisüksuseid. Selle tulemusena lisanduvad võrkudesse kõrgemad pinge- ja voluharmonikud, mis soodsate tingimuste korral võivad põhjustada harmoonresonantsi. Aastate jooksul on Eesti elektrivõrkudesse paigaldatud mitmeid reaktiivvõimsuse kompenseerimisseadmeid, millede paigaldamisel ei ole arvestatud tulevikus võimalike harmoonmoonutustega. Samuti tuleb arvestada, et aastate jooksul võib võrgu harmoonikute spekter muutuda ning kondensaatorpatareide juures kasutatavad lahkähälestusreaktorid ei pruugi enam oma eesmärki täita. Sellest tulenevalt on mõistlik uurida selliste nähtuste tekke põhjuseid ja välja töötada soovitused võrguettevõtjatele.

## **2. Töö eesmärk**

Töö eesmärgiks on analüüsida harmoonresonantsi tekkimise võimalusi ja selle mõju alajaamade seadmetele.

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

1. Kas Eestis esineb alajaamasid, kus võib esineda harmoonresonants ja missugust mõju see alajaama seadmetele ja elektrivõrgu tarbijatele avaldab?
2. Kas esineb juhtumeid, kus kondensaatorpatareide kaitse on korduvalt rakendunud resonantsi pärast?
3. Milliste tarbijatega kaasnevad voolu moonutused?
4. Kas jõuelektroonikal põhinevate seadmete levik suurendab resonantsi tekkimise tõenäosust tulevikus.
5. Mis on peamised põhjused harmoonresonantsi tekkeks elektrivõrkudes?
6. Missugused lahendused tuleb kasutusele võtta harmoonresonantsi nähtuse vältimiseks?

## **4. Lähteandmed**

IEEE teaduskirjandus ja muud teadusartiklid, raamatud, standardid, modelleerimis tarkvara kasutusjuhendid, seadmete tehniline dokumentatsioon, võrguskeemid ja varasemad lõputööd.

## **5. Uurimismeetodid**

Võrgu skeemide ja seadmete tehniliste dokumentatsiooni abil koostatakse mudelid võrguarvutustarkvaras PSCAD. Mudelisse lisatakse kõrgemaid harmoonikuid põhjustavad allikad ning analüüsitakse harmoonresonantsi tekkimise võimalusi ja põhjuseid ning võimalikke lahendusmeetmeid.

## **6. Graafiline osa**

Võrguskeemid, võrgumodelite graafiline kujutus, pinge ja voolu graafikud, harmoonikute diagrammid, selgitavad joonised.

## **7. Töö struktuur**

Sissejuhatus

Teoreetilised alused

Algandmed. Mudeli koostamine  
Talitluse analüüs  
Järeldused ja soovitusel  
Kokkuvõte

## **8. Kasutatud kirjanduse allikad**

- N. Eghtedarpour, M. A. Karimi ja M. Tavakoli, "Harmonic Resonance in Power Systems - A Documented Case"
- M. Mcgranaghan, S. Peele ja D. Murray, "Solving harmonic resonance problems on the medium voltage system"
- S. Santoso, H. W. Beaty, R. C Dugan, M. F McGranaghan, "Electrical Power Systems Quality"
- D. W. Hart "Power electronics"
- EVS-EN 60871 - Shunt capacitors for a.c. power systems having a rated voltage above 1000 V

## **9. Töö etapid ja ajakava**

Kirjanduse läbitöötamine. (05.12.2022 – 28.01.2022)  
Algandmete hankimine. (30.01.2022 – 10.02.2022)  
Mudeli koostamine ja analüüs. (13.02.2022 – 10.03.2022)  
Tulemuste kirjutamine. (13.03.2022 – 14.04.2022)  
Juhendajale esmaseks lugemiseks saatmine. (17.04.2022)  
Paranduste sisseviimine.  
Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine. (08.05.2022)  
Lõplik versioon valmis. (15.05.2022)



# SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE .....	4
ABSTRACT .....	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	6
EESSÕNA .....	11
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU .....	12
SISSEJUHATUS .....	13
1. HARMOONIKUTEGA SEOTUD MÕISTED JA NÄHTUSED .....	15
1.1 Paralleelresonants .....	16
1.2 Harmoonmoonutuse tekkimise põhjused elektrisüsteemides .....	20
1.3 Harmoonikute mõju elektrisüsteemile ja selle vähendamise meetodid .....	21
1.4 Mittelineaarmoonutus Eesti jaotusvõrgus .....	23
2. HARMOONRESONANTSI NÄHTUSE MODELLEERIMINE .....	29
2.1 Ülekandeliinide andmete sisestamine .....	29
2.2 Maakaabli andmete sisestamine .....	30
2.3 Mudeli parameetrite arvutamine .....	31
3. HARMOONRESONANTS ÜLEKANDEVÕRGUS .....	33
3.1 Uuritav näide .....	33
3.2 Simulatsiooni tulemuste analüüs .....	33
3.2.1 Sageduskarakteristiku sõltuvus erinevatest tingimustest .....	36
3.3 Lahenduse ettepanek .....	37
4. HARMOONRESONANTS JAOTUSVÕRKU TOITVAS ALAJAAMAS .....	41
4.1 Uuritav näide .....	41
4.2 Simulatsiooni tulemused .....	42
4.3 Lahenduse ettepanek .....	44
5. HARMOONRESONANTS TARBIJA ELEKTRIPAGALDISES .....	48
5.1 Uuritav näide .....	48
5.2 Simulatsiooni tulemused .....	51
5.3 Lahenduse ettepanek .....	52

KOKKUVÕTE .....	56
KASUTATUD KIRJANDUS .....	59
LISAD .....	61
Lisa 1. Kandemast PB110-1 .....	61
Lisa 2. Modelleeritava ülekandevõrgu skeem.....	62
Lisa 3. Ülekandevõrgu mudeli parameetrid .....	63
Lisa 4. Ülekandevõrgu PSCAD mudel.....	65
Lisa 5. 110 kV alajaama mittelineaarmoonutuse sõltuvus erinevate võrgu elementide väljalülitamisest .....	66
Lisa 6. 35/6 kV alajaama PSCAD mudel.....	67
Lisa 7. 35/6 kV alajaama mudeli parameetrid.....	68

## **EESSÕNA**

Käesoleva magistritöö teema valiku põhjuseks on, kõigepealt, autori enda huvi harmoonresonantsi ning sellega seotud nähtuste vastu. Teemaga seotud uurimustöö nõuab tugeva teoreetilise tausta ning võimaldas laiendada autori teadmisi elektri kvaliteedi tagamise valdkonnas. Valitud teema aktuaalsus on kaheldamatu, kuna arutelud jõuelektronika seadmete mõjust elektrisüsteemidele on järjest suurenemas.

Autor tänab käesoleva magistritöö juhendajat Jako Kilter'it, kes aitas viia töö valmis olekuni ning abistas igal etapil.

## LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

THD – harmoonmoonutustegur (*total harmonic distortion*)

TDD – nõudlusmoonutustegur (*total demand distortion*)

PSCAD – *Power Systems Computer Aided Design*

SVL – seksioneeriv võimsuslülit

KP – kondensaatorpatarei

FACTS – paindlikud vahelduvvooluülekanandesüsteemid (*flexible alternating current transmission systems*)

EMTDC – *Electromagnetic Transients including DC*

RLC – takistus, induktiivsus, mahtuvus

$\cos \varphi$  – võimsustegur

$h$  - harmooniku järk

$I_{KP1}$  – kondensaatorpatarei vool, A

$I_{KP1, nimi}$  – kondensaatorpatarei nimivool, A

$q$  – resonantsi kvaliteeditegur

$S_k$  – lühisvõimsus, MVA

$S_c$  – kondensaatorpatarei näivvõimsus, Mvar

$THD_U$  – pinge harmoonmoonutustegur, %

$THD_I$  – voolu harmoonmoonutustegur, %

$U_{KP}$  – kondensaatorpatarei pinge, V

$U_{lattid}$  – alajaama lattide pinge, V

$\omega_0$  - resonantsi nurksagedus, rad/s

## SISSEJUHATUS

Tänapäeval on järjest suurenenas muundurpõhiste tootmisüksuste ja mitmesuguste muunduritel põhinevate tarbijate liitumine elektrijaotusvõrkudega. Seetõttu tuleb neis võrkudes järjest enam tähelepanu pöörata harmoonikute tasemetele ja levimisele võrgus. Üheks oluliseks uurimisküsimuseks on harmoonikutest põhjustatud resonantsid, sest nende tulemusena võivad voolud või pinged tõusta üle lubatud piirnormide ja see seab ohtu võrguga ühendatud elektriseadmed. Harmoonikuid põhjustavad enamik tarbijaid. Elamu- ja ärikliendid kasutavad üha enam jõuelektronikal põhinevaid ja teisi tööstuslike seadmeid, mille mõju elektrisüsteemile võib olla oluline. Nende hulka võivad kuuluda sagedusmuundurid, alalisvooluajamid, protsessialaldid, induktsioonahjud, keevitusseadmed, kaarahjud jne. Standardid ja võrgueeskirjad kohustavad piirama harmoonikute genereerimist, kuid harmoonikute genereerimise tase võib siiski olla märkimisväärne ja see muutub eriti oluliseks, kui võrgus tekivad resonantstingimused, mis suurendavad kadusid ja halvendavad pingekvaliteeti. Resonantstingimuste olemasolul võib olla raske piirata harmoonikuid vastuvõetaval tasemel kasutades tavapäraseid meetodeid tarbija elektripaigaldistes. Resonantsi tingimused toitevates sõlmedes võivad põhjustada tarbija harmoonikute filtrite ja võimsusteguri parendusseadmete ülekoormumist.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli välja selgitada peamised põhjused harmooniresonantsi tekkeks elektrivõrkudes ja leida lahendused harmooniresonantsi nähtuse vältimiseks. Üheks oluliseks lõputöö väljundiks on töötada välja soovitused võrguettevõtetele ja ettevõtetele, kus on paigaldatud kondensaatorpatareid reaktiivenergia kompenseerimiseks. Elektrivõrkudes esinevate pinge- ja vooluharmoonikutega seotud nähtuste teoreetiline käsitus on praeguseks ajaks teadlaste poolt välja töötatud. Vaatamata sellele puudub teaduskirjanduses praktiliste näidete detailne käsitus, kus oleks esitatud reaalsete lähteandmete alusel tehtud arvutused või simulatsioonid. Sellest tulenevalt on käesoleva lõputöö üheks eesmärgiks analüüsida ja selgitada harmooniresonantsi nähtust reaalsete näidete põhjal. Eesmärgiks on analüüsida harmooniresonantsi tekkimist erinevate pingeklasside ja võrgutopoloogiatega korral.

Käesolev lõputöö on jaotatud viide peatükki. Esimeses peatükis esitatakse ülevaatlilikult töö sisu mõistmiseks vajalik temaatika teoreetiline taust, kasutades teaduskirjandust. Teises peatükis käsitletakse PSCAD tarkvara, kuna see on peamine tööriist, mida töö käigus kasutati analüüside tegemisel. PSCAD võimaldab lähteandmete alusel luua võrgu täpse mudeli. Modelleerimiseks kasutatakse tegelike ülekande- ja jaotusvõrkude skeeme, seadmete nimiandmeid, koormuste andmeid jne. Kolmandas peatükis

vaadeldakse harmoonresonantsi tekkimist 110 kV võrgus. Analüüsi teostamiseks vajalik mudel on koostatud reaalse ülekandevõrgu andmete põhjal. Analüüs keskendub ühele alajaamale, millel on kolm tootvat 110 kV liini, üks tarbijaliin, neli jaotustrafot ja üks kondensaatorpatareid, mis on ühendatud ülempinge poole lattidega. Neljandas peatükis uuritakse harmoonresonantsi tekkimist 35/6 kV alajaama alampinge poolel. Alajaam toidab kaabelvõrku ja selle mõlemasse sektsiooni on paigaldatud kondensaatorpatareid reaktiivenergia kompenseerimiseks. Viiendas peatükis uuritakse harmoonresonantsi tekkimist tarbija madalpinge elektripaigaldises. Mudel on koostatud Tallinna Tehnikaülikooli energeetikamajas teostatud varasemate pingekvaliteedi mõõtmiste alusel. Hoones esineb märkimisväärse osakaaluga mittelineaarset koormust. Analüüsi käigus uuritakse jaotusseadme mõlemasse sektsiooni teoreetiliste kondensaatorpatareide paigaldamisest tulenevat harmoonikute võimendamist.

Magistritöö tulemused annavad hea ülevaate harmoonresonantsi põhjustest ja seda mõjutavatest teguritest ning on hea juhendmaterjal, mida võrguettevõtjatel ja teistel asjast huvitunutel on kindlasti mõistlik lugeda.

# 1. HARMOONIKUTEGA SEOTUD MÕISTED JA NÄHTUSED

Iga mittesiinuselise perioodilise suuruse  $f(t)$  võib jaotada siinulisteks komponentideks Fourier' rea kaudu järgmiselt [1]:

$$f(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \sin(h\omega_0 t + \theta_n), \quad (1.1)$$

kus  $a_0$  -  $f(t)$  keskmine suurus. Elektrialelates see on pinge või voolu alaliskomponent.

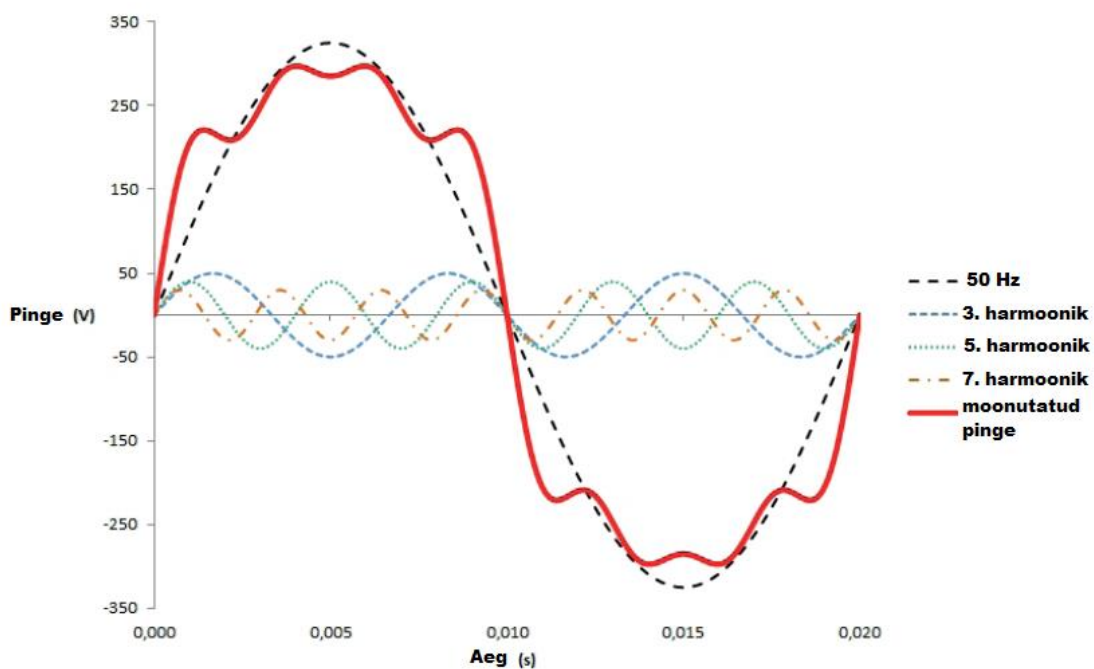
$C_h$  - amplituudväärtus

$\omega_0$  - põhisagedus

$\theta_n$  - siinuselise komponenti faasinihe.

$h$  - harmooniline järk.

Tegur  $C_1$  on põhisagedusega  $\omega_0$  komponendi amplituud. Tegurid  $C_2, C_3, C_4 \dots C_h$  on harmoonikute sagedustega  $\omega_2, \omega_3, \omega_4 \dots \omega_h$ , amplituudid. Joonisel 1.1 on näidatud, kuidas mittesiinuline pinge koosneb põhiharmonikust ning kolmandast, viiendast ja seitsmendast harmoonikust.



Joonis 1.1 Moonutatud siinuse jaotamine harmoonikuteks [2].

Kuna resulteeriv lainekuju pole enam siinuline, siis selle ruutkeskmine väärtus ei ole  $\sqrt{2}$  võrra väiksem amplituudväärtusest. Mittesiinuselise funktsiooni  $f(t)$  ruutkeskmise ehk efektiivväärtuse saab leida järgmiselt:

$$F_{RMS} = \sqrt{a_0^2 + \sum_{h=1}^{\infty} \left(\frac{C_h}{\sqrt{2}}\right)^2} \quad (1.2)$$

Mittelineaarmoonutus või harmoonmoonutustegur (ingl *total harmonic distortion, THD*) on mõiste, mida kasutatakse lainekuju mittesiinuselise omaduse iseloomustamiseks. Mittelineaarmoonutus avaldub järgmiselt:

$$F_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h \neq 1} F_{h,RMS}^2}}{F_{1,RMS}}, \quad (1.3)$$

kus  $F_{h,RMS}$  –  $h$  järkuga harmooniku efektiivväärtus va. põhiharmoonik  
 $F_{1,RMS}$  – põhiharmooniku efektiivväärtus.

Voolu moonutuse kujutamine harmoonmoonutusteguriga on tihti eksitav. Väikese voolu korral võib harmoonikute suhteline osakaal voolus ja seega ka harmoonmoonutustegur olla suur. Voolu harmoonikute peegeldamiseks on otstarbekam kasutada nõudlusmoonutustegurit (ingl *total demand distortion, TDD*), kus põhikomponendi asemel on kasutatud voolu maksimaalset väärtust [3]:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h \neq 1} I_{h,RMS}^2}}{I_{max}}, \quad (1.4)$$

kus  $I_{h,RMS}$  –  $h$  järkuga vooluharmooniku efektiivväärtus va. põhiharmoonik  
 $I_{max}$  – koormusvoolu maksimaalne väärtus.

## 1.1 Paralleelresonants

Kõikidel ahelatel, mis sisaldavad nii mahtuvust kui ka induktiivsust, on üks või mitu loomulikku resonantssagedust. Kui üks nendest sagedustest langeb kokku mittelineaarsete koormuste poolt toodetud harmoonikutega, võib tekkida resonants [4]. Resonantsil pinges ja voolus domineerib resonantssagedus ning need võivad olla tugevalt moonutatud. Seega elektrisüsteemi reaktsioon iga harmooniku sagedusel määrab tegeliku mittelineaarse koormuse mõju pingekvaliteedile.

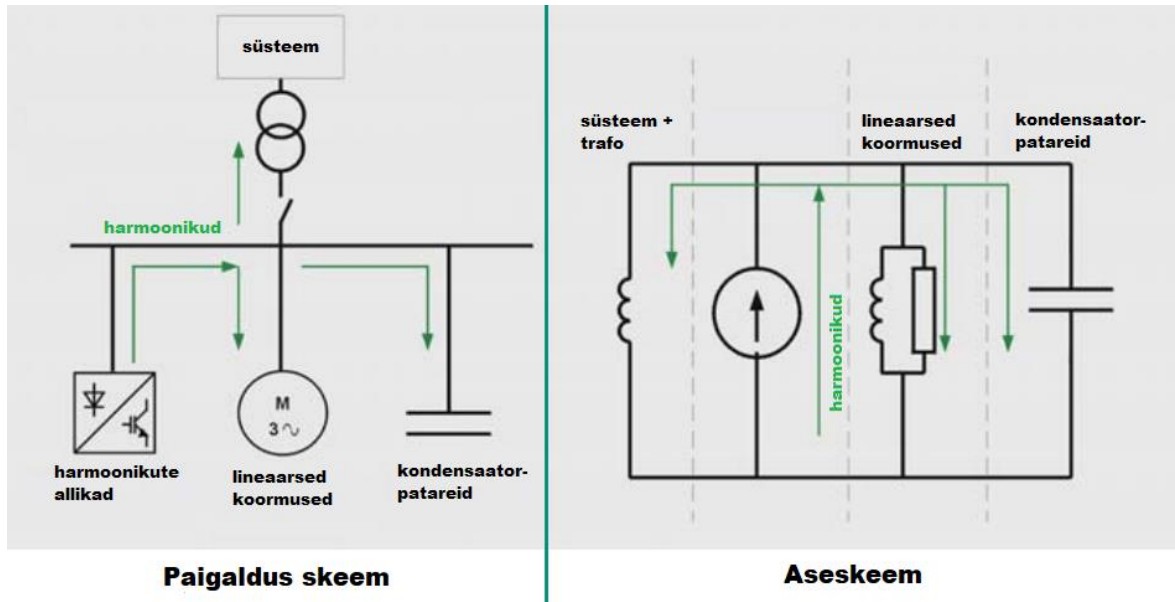
Joonisel 1.2 on näidatud, kuidas elektrisüsteemi osad moodustavad paralleelresonantsi ahela. Mittelineaarsed koormused põhjustavad mittelineaarse koormusvoolu kulgemist, mida teoreetilises käsitluses vaadeldakse voolu harmoonikute emiteerimisena. Mittelineaarne koormus muutub aseskeemil voolu harmoonikute allikaks.

Aseskeemil rööpühenduses mahtuvusega rööpühenduses induktiivsust moodustab peamiselt toitva võrgu sisetakistus, mille suurima osa moodustab tavaliselt jõutrafo reaktiivtakistus. Mahtuvuse moodustavad reaktiivenergia kompenseerimiseks ning



pinge reguleerimiseks kasutatavad kondensaatorpatareid. Resonantsi tingimuseks on induktiivse ja mahtuvusliku takistuse võrdsus:

$$X_L = X_C \rightarrow \omega L = \frac{1}{\omega C}. \quad (1.5)$$



Joonis 1.2 Paralleelresonantsi tekkimine elektrisüsteemis [5].

Resonantsisagedusel, juhul kui aktiivtakistus puudub, läheneb rööbiti ühendatud mahtuvuse  $C$  ja induktiivsuse  $L$  resulteeriv impedants lõpmatusale. Resonantsi nurksagedus  $\omega_0$  on:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.6)$$

Resonantsisageduse harmoonilist järku  $h$  saab leida kolmefaasilise lühisvõimsuse  $S_k$  ja kondensaatorpatareid reaktiivvõimsuse  $S_C$  kaudu järgmiselt [6]:

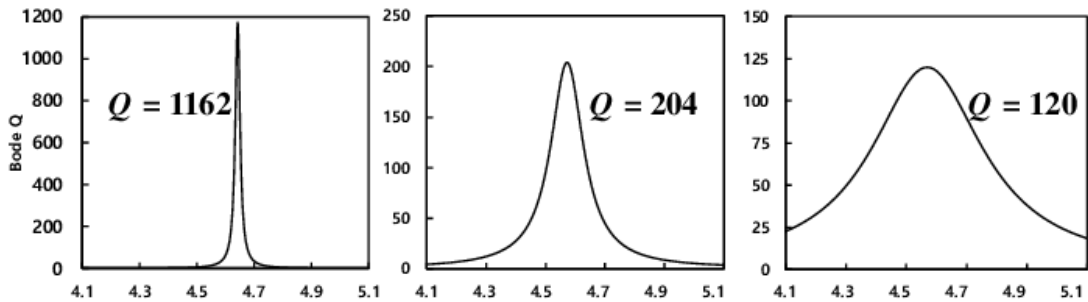
$$h = \sqrt{\frac{S_k}{S_C}} \quad (1.7)$$

Juhul kui mingi mittelineaarse koormuse poolt emiteeritud harmooniku sagedus võrdub võrgu resonantsagedusega, põhjustab see suure pingelangu kondensaatorpatareis ning pinge selles sõlmes on samuti tugevalt suurenenud ning moonutatud [3].

Aktiivtakistuse  $R$  olemasolul jadamisi induktiivsusega on impedants resonantsagedusel  $Z_p$  ligikaudu [3]:

$$Z_p \approx \frac{X_L^2}{R} = \frac{X_C^2}{R} = qX_L = qX_C. \quad (1.8)$$

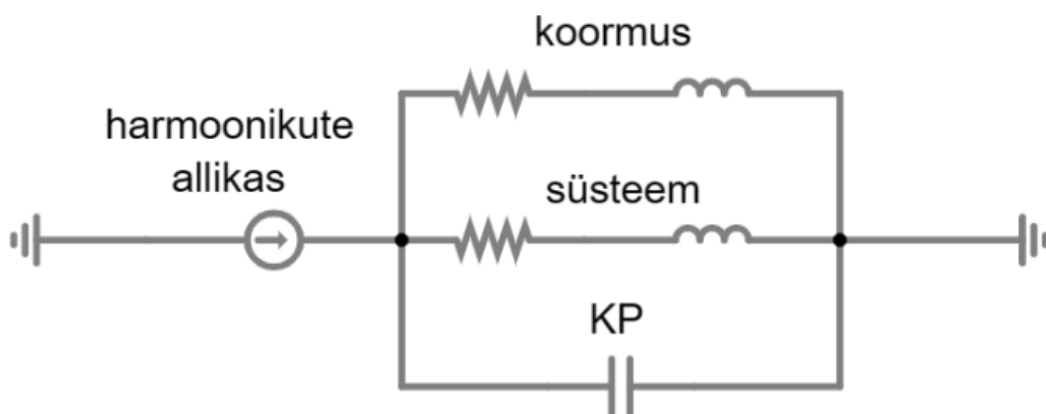
Kus  $q$  on resonantsi kvaliteeditegur, mis muutub suurtes piirides olenevalt harmoonikute allika asukohast võrgus. Joonisel 1.3 on näidatud, kuidas süsteemi sageduskarakteristik ja impedants resonantssagedusel muutuvad kvaliteediteguri vähendamisel. Kvaliteediteguri suurenemisel suureneb impedants resonantssagedusel ja seega ka harmoonikute võimendamine sellel sagedusel.



Joonis 1.3 Sageduskarakteristiku sõltuvus kvaliteeditegurist [7].

Aktiivtakistust sisaldavad ülekandeliinid ja vähemal määral ka trafode mähised. Olukordades, kus kondensaatorpatareid on ühendatud jaotusvõrgu toitvate alajaamade lattidega, on resonantsi kvaliteeditegur suurem, kuna sel juhul on aktiivtakistuse osakaal väiksem sellepärast, et trafod kujutavad endast peamiselt induktiivse iseloomuga reaktiivtakistust.

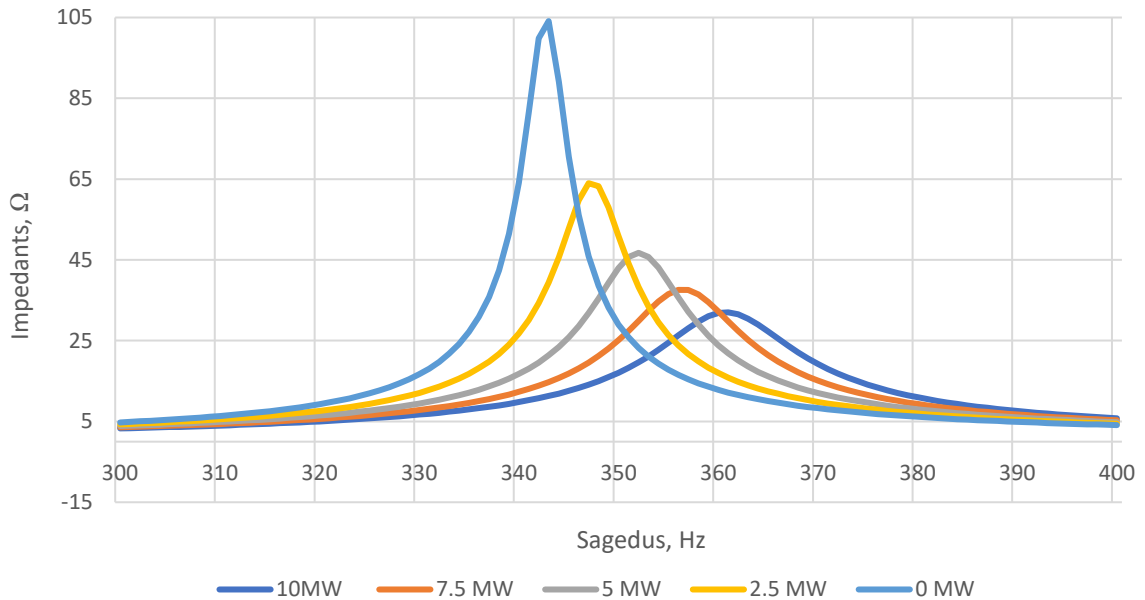
Kvaliteeditegurit mõjutab ka võrgu aktiivkoormus. Juhul, kui koormust kujutada aseskeemil jadamisi takistusena ja induktiivsusest, siis harmoonikute allika poolt vaadatuna moodustab koormus täiendava haru, mis on süsteemi haruga ja kondensaatorpatareiga rööbiti, nagu näidatud joonisel 1.4.



Joonis 1.4 Koormuse lisamine paralleelresonantsi aseskeemi.

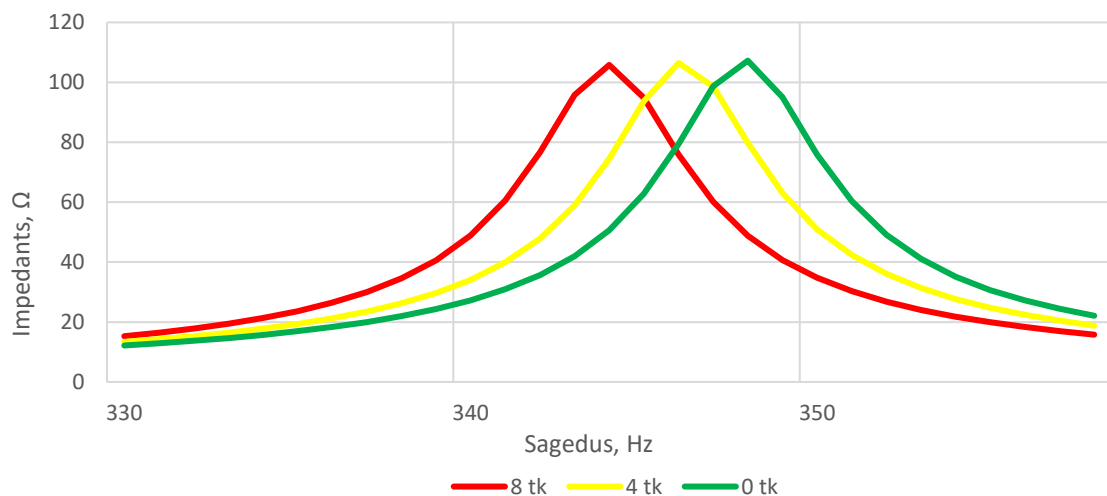
Koormuse aktiivtakistus suurendab resulteeriva aktiivtakistuse osakaalu ning seega vähendab kvaliteeditegurit. Joonisel 1.5 on näidatud, kuidas sageduskarakteristik sõltub koormuse muutmisest vahemikus 0 kuni 10 MW konstantsel võimsusteguril  $\cos \varphi = 0.9$ .

Koormuse vähendamisel muutub resonantssagedus väiksemaks. Samal ajal impedants resonantssagedusel suureneb, kuna koormus on enamasti aktiivse iseloomuga, st omab summutavat toimet ja vähendab resonantsi kvaliteeditegurit.



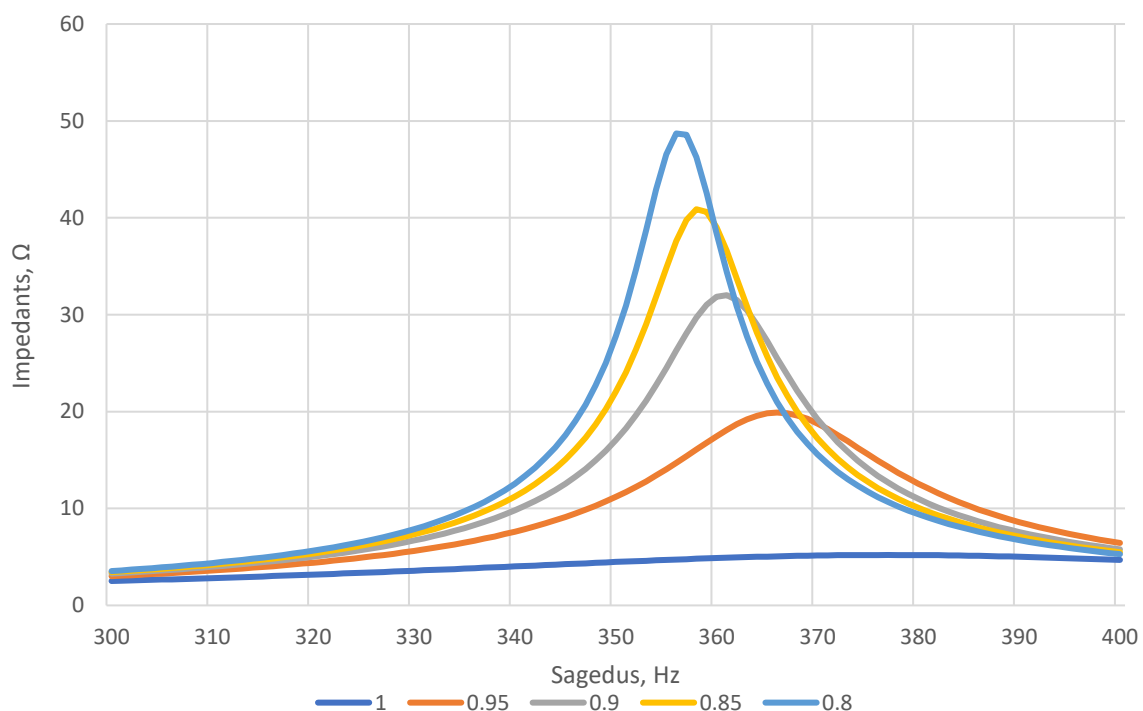
Joonis 1.5 Sageduskarakteristiku sõltuvus AJ koormusest.  $\cos \phi = 0.9$ .

Joonisel 1.6 on toodud sageduskarakteristiku sõltuvus tühijooksul kaablite arvust. Tühijooksul kaablid kujutavad endast kondensaatorpatareiga rööbiti lülitatud mahtuvust ning sellega suurendavad alajaama lattidega ühendatud summaarset mahtuvust. Järelikult peab tühijooksul kaablite arvu suurendamine vähendama resonantssagedust ning sageduskarakteristiku kuju peab jääma samaks, kuna need on peamiselt mahtuvusliku iseloomuga ning aktiivtakistuse osakaal nendes on väike.



Joonis 1.6. Sageduskarakteristiku sõltuvus tühijooksul kaablite arvust. Kaablite keskmine pikkus on 5 km.

Joonisel 1.7 on näha, kuidas sageduskarakteristik sõltub koormuse võimsusteguri muutusest konstantse 10 MVA näivvõimsuse juures. Võimsusteguri vähendamisega väheneb koormuse aktiivtakistuse osakaal ning sellega kvaliteeditegur suureneb.



Joonis 1.7. Sageduskarakteristiku sõltuvus koormuse võimsustegurist,  $S = 10$  MVA.

## 1.2 Harmoonmoonutuse tekkimise põhjused elektrisüsteemides

Erinevalt lineaarsetest koormustest muutub mittelineaarse koormuse impedants rakendatud pinge hetkväärtusega, põhjustades mittesiinuselise voolutarbimise. Teisisõnu: selline koormus ei oma vahelduva perioodi jooksul pidevat voolu ja pinge suhet. Mõned näited mittelineaarsetest koormustest, mis on võimelised emiteerima harmoonikuid: juhitavad ajamid, alaldid, inverterid, kaarahjud, keevitusseadmed, lahenduslambid, telerid, mikrolaine- ja induktsioonahjud, printerid, akulaadijad jne [1]. Kõik need seadmed võivad sisaldada pooljuhtseadmeid nagu diodid, türistorid, transistorid, mis perioodiliselt lülitavad koormust sisse/välja. Koormuse poolest emiteeritud voolu harmoonikud põhjustavad toitva sõlme lattidel pingelangu, mis on samuti mittesiinuline. Sel viisil põhjustavad üks või mitu mittelineaarset tarbijat harmoonikute tekkimist ka teistel sama sõlmega ühendatud tarbijatel.

Muundurites on laialt levinud 6-pulsilised ja 12-pulsilised kolmefaasilised alaldid (diod- või türistoralaldid) [8]. Niisugused muundurid genereerivad harmoonikuid järguga

$$h = kp \pm 1, \quad (1.9)$$

kus  $p$  – muunduri faaside arv

$k$  – 1, 2, 3 jne.

Seega 6-pulsilised muundurid genereerivad harmoonikuid järguga  $h = 5, 7, 11, 13$  jne ja 12-pulsilised muundurid harmoonikuid järguga  $h = 11, 13, 23, 25$  jne.

Seoses taastuenergia laia levikuga osutuvad elektrivõrku toitvad inverterid, mida kasutatakse päikese- ja tuuleelektrijaamades, uuteks võimalikeks harmoonikute allikateks ja harmooniresonantsi tekkimise põhjuseks [9]. Tavaliselt omistatakse need harmoonikud inverteri impulsi laiusmodulatsiooni juhtseadmele ja neid käsitletakse kas toitva elektrivõrgu põhiseduse või modulatsiooni kandesignaali harmoonikutena.

Harmoonikuid tekitavad ka küllastuvad seadmed nagu trafod ja muud elektromagnetilised seadmed, millel on terassüdamik [3]. Sagedusmuundurid, tsüklokonverterid, keevitusseadmed ja induktsioonahjud tekitavad lisaks vaheharmoonikuid, mille sagedus põhiharmooniku suhtes ei ole täisarvkordne.

### **1.3 Harmoonikute mõju elektrisüsteemile ja selle vähendamise meetodid.**

Harmoonikute mõju elektrisüsteemile on alati kahjulik ning nende tase püütakse viia miinimumi. Harmoonikud tekitavad lisakadusid elektriseadmetes ning tekitavad häiringuid elektroonika- ja telekommunikatsiooniseadmetes. Vaheharmoonikud põhjustavad pinget värelust ning häireid madalsageduslikes kaugjuhtimisüsteemides. Vooluharmoonikud põhjustavad lisakadusid liinides ja trafodes. Kolmega jagatavad voolu harmoonikud (3, 6, 9 jne.) liituvad neutraalipunktis, mis tekitab nulljärgnevus komponendi [1], [4]. See suurendab koormusvoolu asümmeetriat ja võib põhjustada ülekoormuse probleeme neutraalis ja PEN juhtmetes. Pingeharmoonikud põhjustavad lisakadusid kondensaatorpatareides ning elektrimootorite mähistes ja magnetsüdamikes. Harmoonikute kahjulik mõju on oluliselt võimendatud harmooniresonantsi tekkimisel. Resonants võib põhjustada tundlike elektrooniliste koormuste liigvoolukaitse rakendamist ja suuri voole kondensaatorpatareides. Raskematel juhtudel tekivad kondensaatorites kuuldav müra ja need võivad deformeeruda [4].

Harmoonikute taseme piiramiseks on välja töötatud mitmed standardid. Standard EVS-EN 50160 [10] sätestab pingekvaliteedi nõuded ning määrab lubatavad pingeharmoonikute piirid (tabel 1.1). Standardisarjas IEC 61000-3 on toodud nõuded vooluharmoonikutele madalpinge elektripaigaldistes [11]. Standardis IEC 61000-3-6 [12] on toodud pingeharmoonikute lubatavad väärtused madal- ja kõrgepingevõrkudes.

Standard IEEE 519-2022 [13] sätestab IEC standarditega võrreldes ping- ja vooluharmonikutele rangemad nõuded nii madal-, kesk- kui ka kõrgepingevõrkudes.

Tabel 1.1 EVS-EN 50160 standardis määratud ping- ja vooluharmonikute piirid [10].

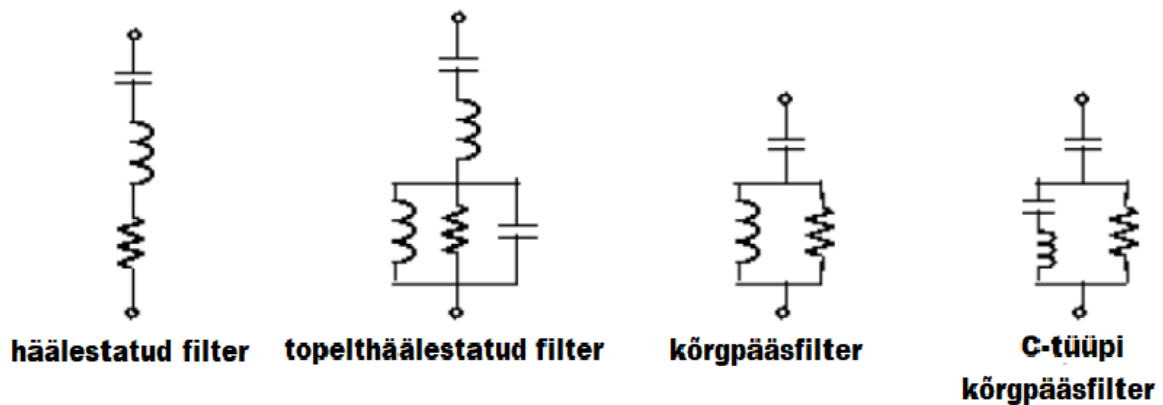
Paarituurvalised harmoonikud				Paarisarvulised	
Kolmega mittejagatavad		Kolmega jagatavad			
Järk, h	Suhteline ping- , %	Järk, h	Suhteline ping- , %	Järk, h	Suhteline ping- , %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	12	0,5	6 - 24	0,5
13	3	15	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Fingrid Oy kehtestab oma nõuded pingeharmonikutele, mis on sarnased eelmainitud IEC 61000-3-6 standardiga (tabel 1.2). Fingridi nõue voolu mittelineaarhoonutusele on 6%.

Tabel 1.2 Maksimaalne ping- ja vooluharmonikute 110 kV võrgus protsendites nimipingest. Fingrid [14].

Kolmega mittejagatav		Kolmega jagatav		Paarisarvulised harmoonikud	
Järk, h	Suhteline ping- , %	Järk, h	Suhteline ping- , %	Järk, h	Suhteline ping- , %
5	3,0	3	3	2	1,0=
7	2,5	9	1,3	4	0,7
11	1,7	15	0,5	6	0,5
13	1,7	21	0,5	>6	0,3
17	1,5	>21	0,3		
19	1,5				
23	0,8				
25	0,8				
>25	0,8				
Ping- ja vooluharmonikute mittelineaarhoonutus <3 %					

Üheks võimaluseks vähendada ping- ja vooluharmonikute hoonutusi on passiivfiltrite kasutamine. Joonisel 1.8 on toodud mõned passiivfiltrite topoloogiad.



Joonis 1.8 Passivfiltride topoloogiad.

Kõige lihtsama ehitusega on ühele sagedusele häälestatud filter (ingl *single-tuned filter*). Igal filtril on oma resonantssagedus. Kui filtri resonantsisagedus ei ole põhiharmooniku suhtes täisarvukordne, nimetatakse seda lahkäälestatud filtriks (ingl *detuned filter*) [5], [8], [15]). Õigesti valitud induktiivsusega reaktorit nimetatakse lahkäälestusreaktoriks ning koos kondensaatorpatareiga moodustab see lahkäälestusega filtri. Reaktori reaktiivtakistuse  $X_L$  põhisagedusel võib leida järgmise valemiga: [15]

$$X_L = \frac{X_c}{h^2}, \quad (1.10)$$

kus:  $X_c$  – kondensaatorpatarei reaktiivtakistus võrgusagedusel

$h$  - filtri harmooniline järk.

Reaktori induktiivsus saab leida järgmise valemiga:

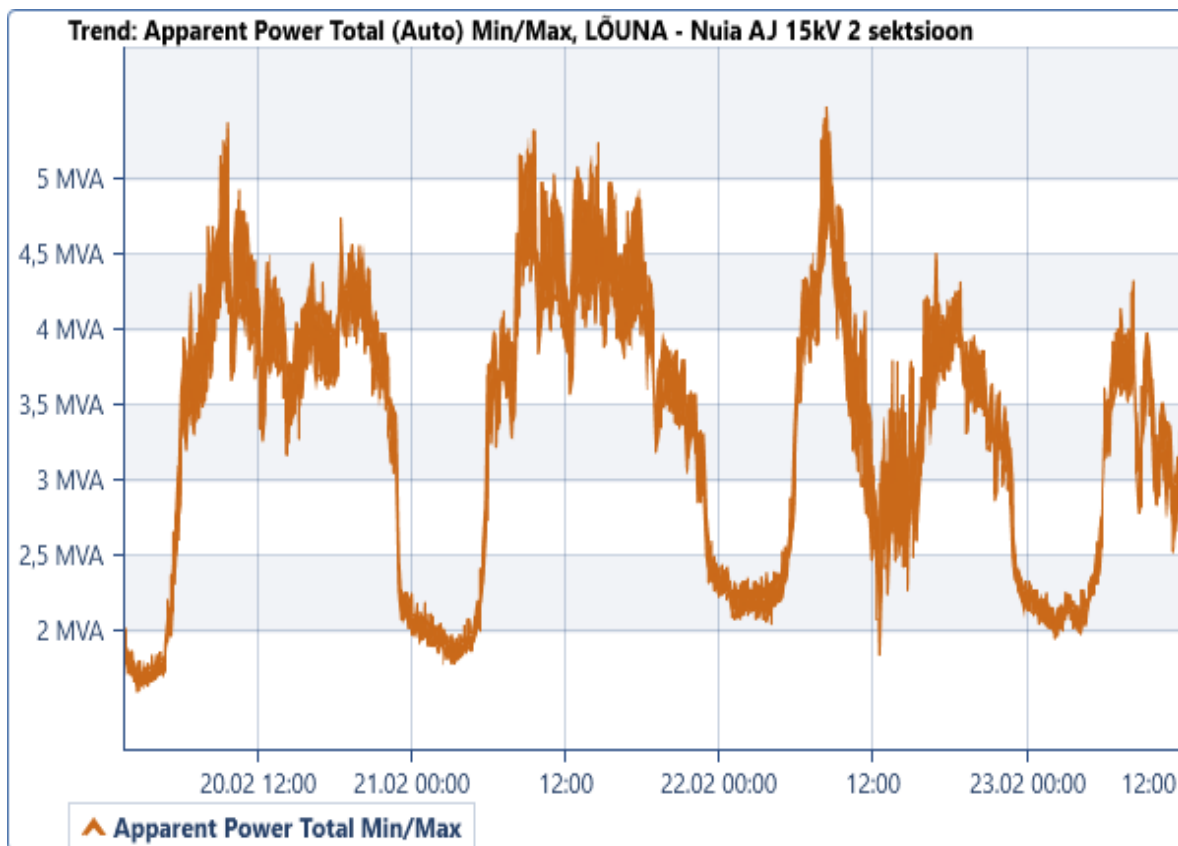
$$L = \frac{X_L}{2\pi f}. \quad (1.11)$$

Lahkhäälestusreaktori lisamine tekitab jadaühenduses mahtuvusega ja induktiivsusega täiendava haru, mille impedants resonantssagedusel läheneb nullile. See muudab sageduskarakteristikut ning elimineerib selles suure impedantsiga resonantspunkti ja ühtlasi välistab paralleelresonantsi tekkimise võimaluse sellel sagedusel. Juhul, kui toivas võrgus esinevad sellel sagedusel pingeharmoonikud, tekib jadaresonants. Selle vältimiseks on mõistlik kasutada häälestatud filtrite asemel lahkäälestatud filtrit. Harmoonikute paremaks filtreerimiseks võib kasutada passiivset C-tüüpi või aktiivfiltrit.

## 1.4 Mittelineaarhoonutus Eesti jaotusvõrgus

Eesti jaotusvõrgus märgatavad pikaajalised mittelineaarhoonutused üldjuhul puuduvad. Pingekvaliteedi tagamiseks lähtutakse EVS-EN 50160 standardis kehtestatud pingeharmoonikute piirväärtustest. Jaotusvõrkudes esineva harmoonhoonutuse olemuse illustreerimiseks on toodud Nuia alajaama ühe sektsiooni

mittelineaarmoonutuse ja üksikute harmoonikute salvestatud andmed kolme päeva jooksul. Joonisel 1.9 on näha, et veebruaris muutub sektsiooni näivvõimsus vahemikus 2 kuni 5 MVA ööpäeva jooksul. Joonistel 1.10 ja 1.11 on näidatud sektsiooni sisendvoolu ja pinge mittelineaarmoonutuse muutus samal perioodil.

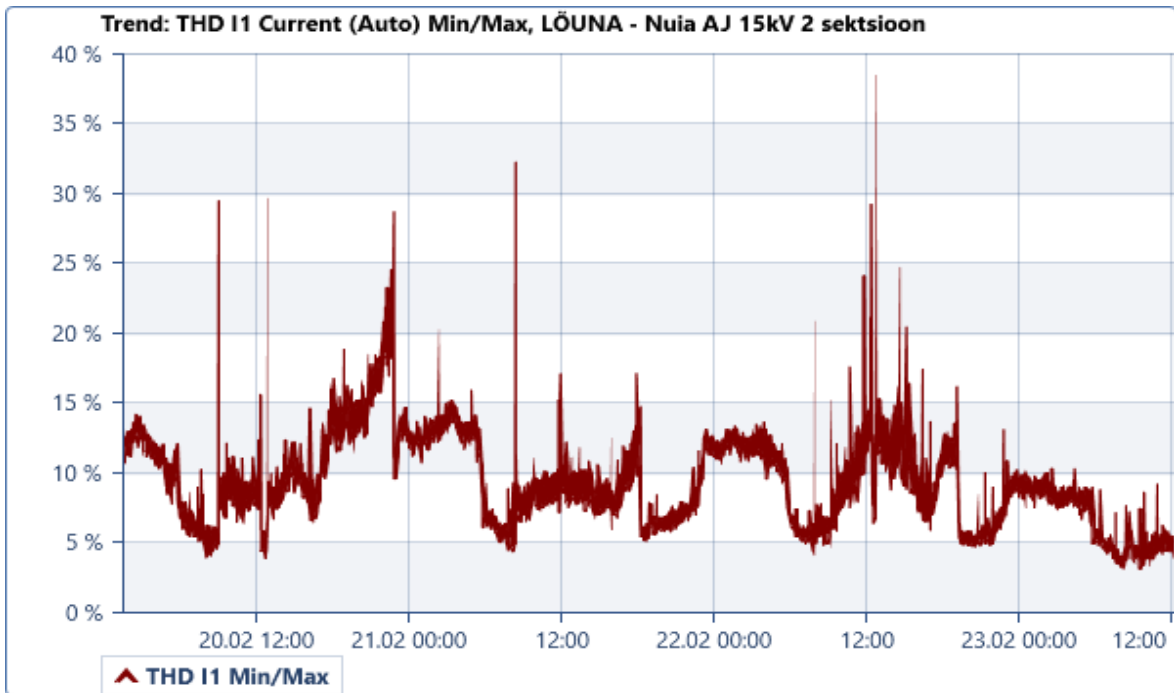


Joonis 1.9 Nuia AJ teise sektsiooni näivvõimsus.

Võrreldes jooniseid 1.9, 1.10 ja 1.11 on näha, et varahommikul hakkab koormus järsult kasvama, kuid pinge ja eriti voolu mittelineaarmoonutus väheneb. Võimalikuks põhjuseks on see, et hommikul suurendab paljude kütteelementidega elektriseadmete (elektripliidid, veekeetjad, kohvikannud jne.) võrku lülitamine lineaarse koormuse osakaalu ning mittelineaarmoonutus, mis on suhteline väärtus, sellega väheneb.

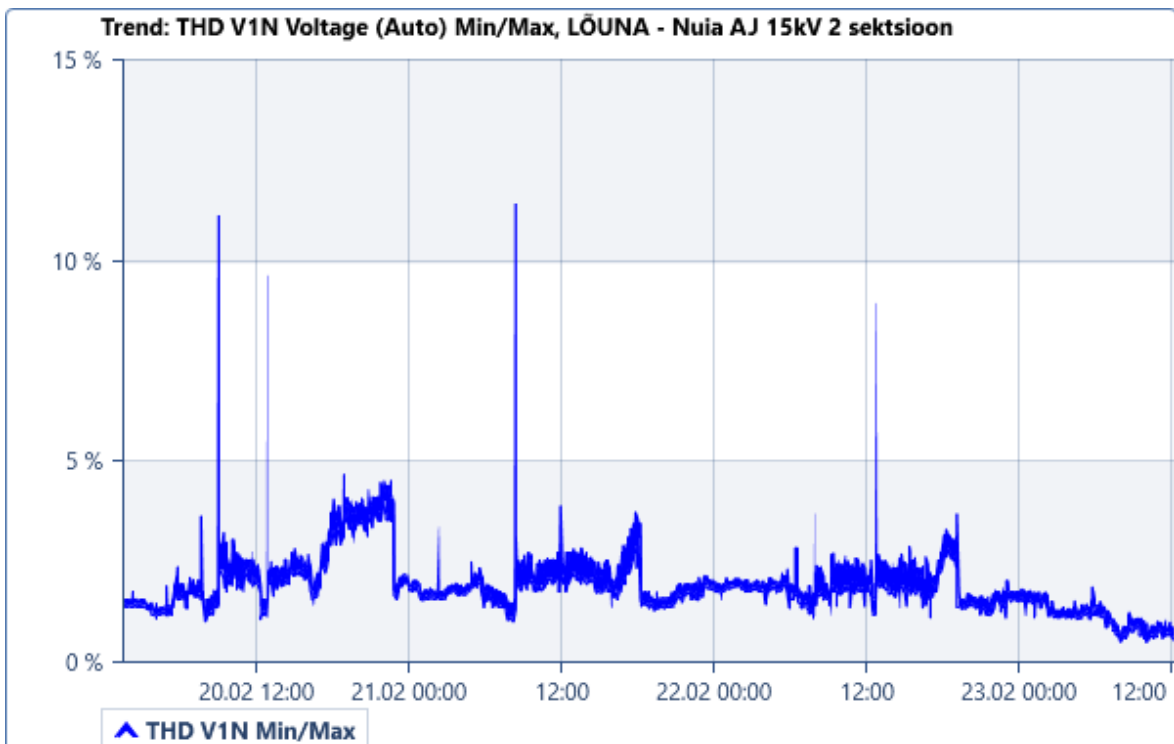
Pinge ja voolu mittelineaarmoonutuse graafikutel (joonis 1.10 ja joonis 1.11) on näha lühiajalised ja järsud moonutuse piigid. Nende põhjuseks võib olla suure võimsusega elektripaigaldiste pingestamine ja väljalülitamine. Nagu on näha joonisel 1.10, ulatub teise sektsiooni voolu mittelineaarmoonutus vaadeldaval ajavahemikul hetkeliselt 40%-ni. Joonisel 1.11 on näha, et teise sektsiooni pinge mittelineaarmoonutus võib hetkeliselt ulatuda üle 10%-ni vaadeldava perioodi jooksul. Suure tõenäosusega on see seotud elektriseadmete pingestamisega. Märkatavat käivitusvoolu võivad tekitada võimsad asünkroonmootorid või näiteks suure tootmishase valgustuse sisselülitamine.





Joonis 1.10 Nuia AJ teise sektsiooni voolu mittelineaarsoonutus.

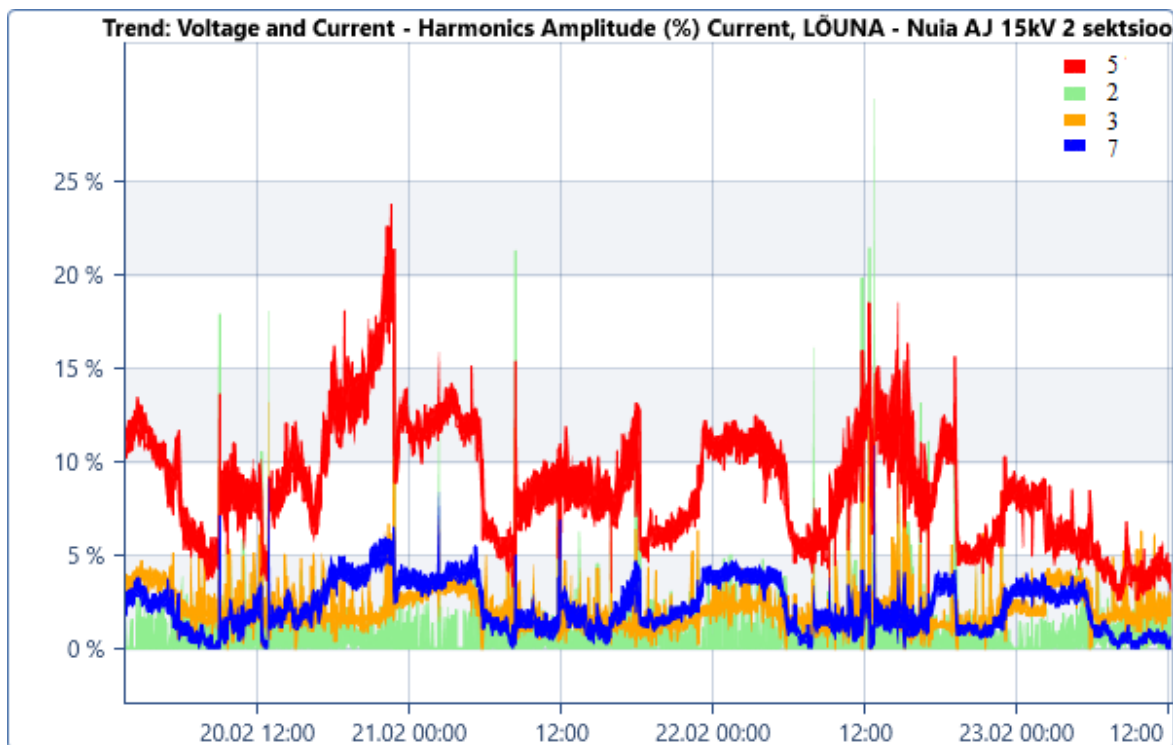
Elektri kvaliteedi tagamisel pööratakse tavaliselt tähelepanu pinge mittelineaarsoonutusele, kuna see mõjutab kõiki vaadeldava sõlmega ühendatud tarbijaid.



Joonis 1.11 Nuia AJ teise sektsiooni pinge mittelineaarsoonutus.

Jaotusvõrgus toimuvate protsesside mõistmiseks harmoonsoonutuse seisukohast tasub analüüsida voolu mittelineaarsoonutust, kuna see iseloomustab võrgu koormust.

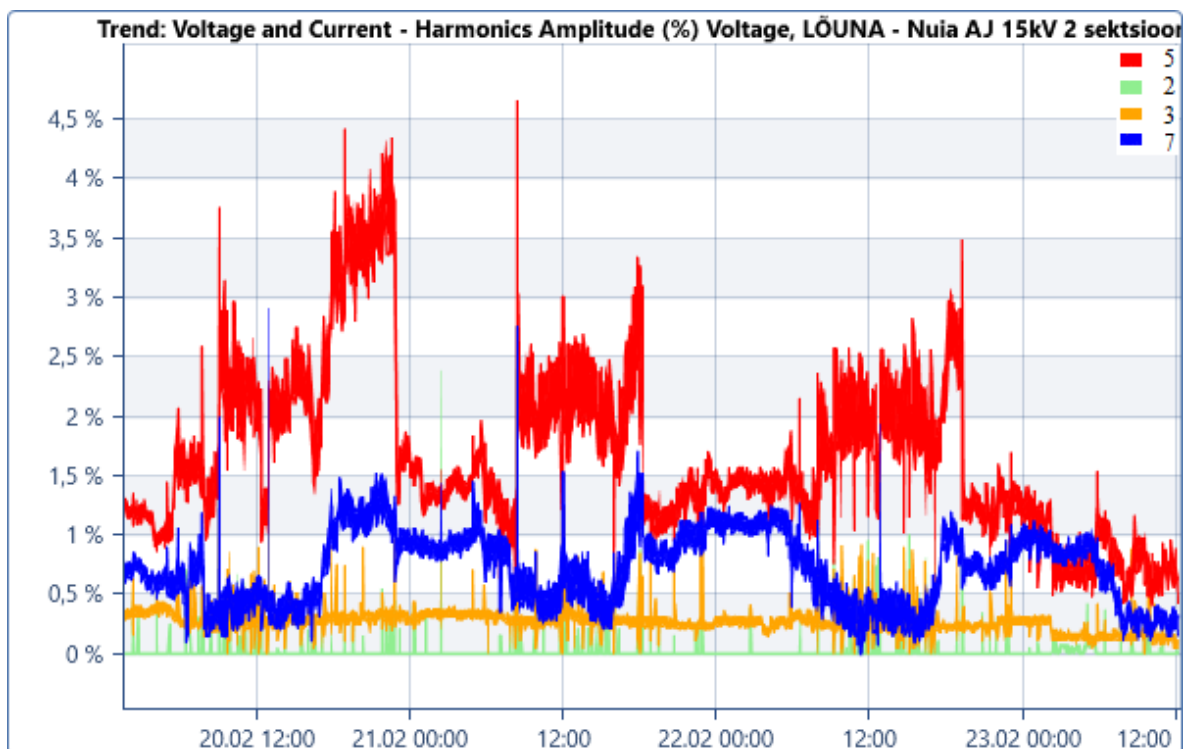
Joonisel 1.12 on toodud üksikute vooluharmonikute muutus vaadeldaval perioodil. On näha, et iga päev umbes kell 9:00 tõuseb teise harmooniku tase hetkeks keskmiselt 20%-ni. Samal ajal viienda harmooniku tase suureneb järsult umbes 5% võrra ning püsib sellel tasemel öhtuni. Teise harmooniku suur hetkeline osakaal on tavaliselt seotud magnetsüdamikega seadmete pingestamisega. Samu muutusi on näha pinge mittelineaarhoonutuse graafikul (joonis 1.13). Voolu ja pinge mittelineaarhoonutuse graafikute võrdlemisel saab välja selgitada, kas pingeharmonikud on seotud toitva võrguga või tulenevad vaadeldava alajaama koormusest.



Joonis 1.12 Nuia AJ teise sektsiooni voolu harmoonikute tase muutus aja jooksul.

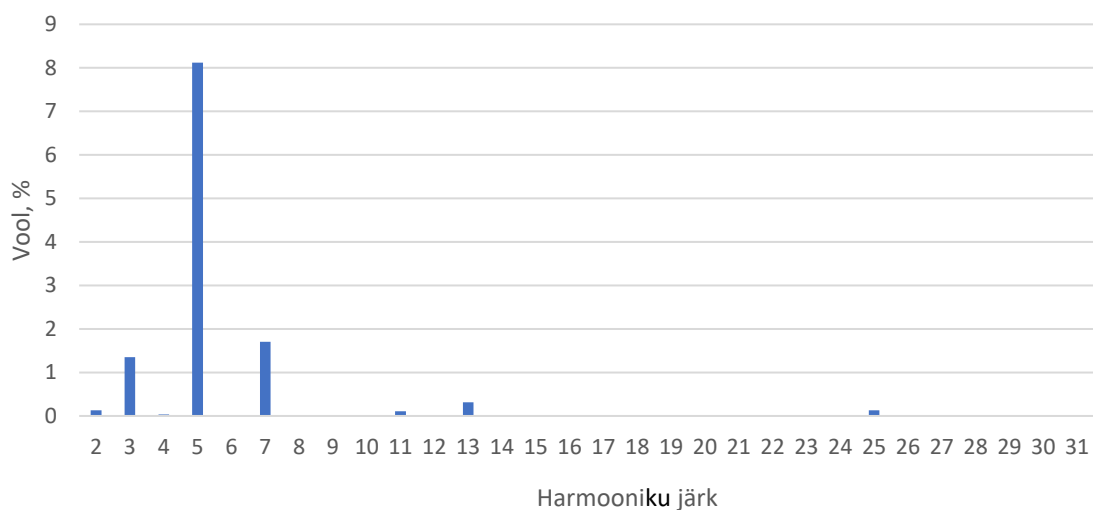
Ööpäeva jooksul toimuva mittelineaarhoonutuse muutuse analüüsimisel peab arvestama maksimaalsete väärtustega. Ent samas kestavad seadmete lülitamisega seotud lühiajalised siirdeprotsessid mitu vahelduvvoolu perioodi ning ei mõjuta võrgu üldist pingekvaliteedi. Andmete analüüsimisel peab oskama eristada selliseid siirdeprotsesse ja lühiajalisi tippe mittelineaarhoonutuses. Lühiajalised mittelineaarhoonutuse tipud kestavad kauem kui siirdeprotsessid ning võivad põhjustada harmooniresonantsi tekkimist juhul, kui samal ajal toimub võrgu konfiguratsioonis muutus või kondensaatortarai pingestamine või astmete lülitus.

Teiseks viisiks analüüsida harmoonhoonutuse taset jaotusvõrgus on vaadelda üksikute harmoonikute keskmistatud väärtusi teatud perioodi jooksul. Sellel viisil saab andmetest välja filtreerida lühiajalised siirdeprotsessid, et saada parem ettekujutus harmoonhoonutuse spektrist uuritavas jaotusvõrgu segmendis.



Joonis 1.13 Nuija AJ teise sektsiooni pinge harmoonikute tase muutus aja jooksul.

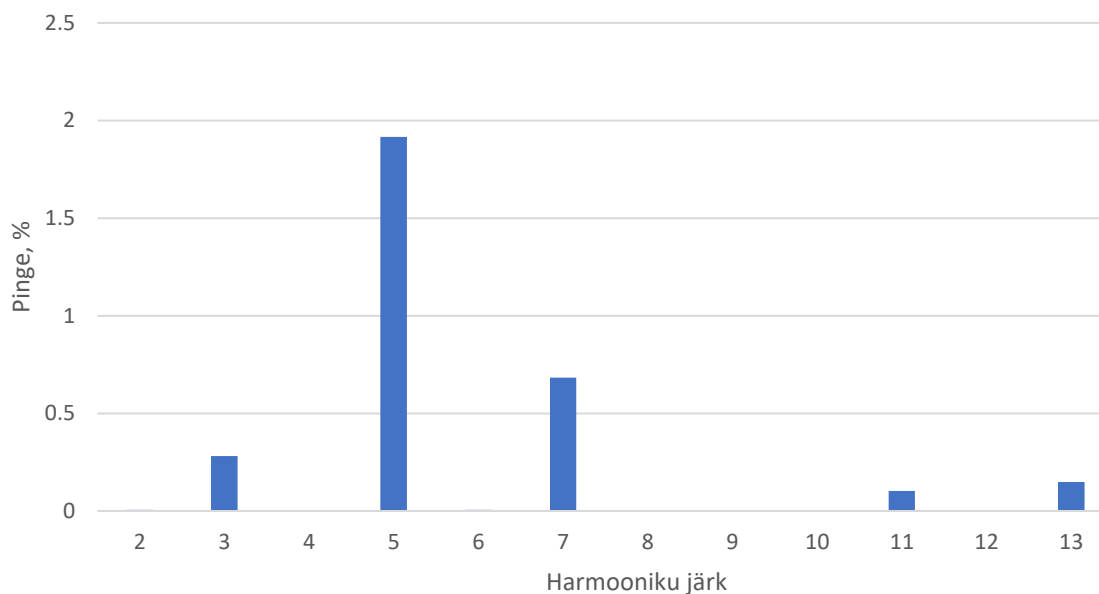
Nagu on näha joonisel 1.14, on vaadeldava alajaama sektsiooni pinges teise harmooniku osakaal kaduvväike, kui arvestada keskmistatud väärtust, vaatamata sellele, et teise harmooniku maksimaalne väärtus on ülejäänud harmoonikutest kõige suurem.



Joonis 1.14 Nuija AJ teise sektsiooni voolu harmoonikute keskmine tase.

Pingekvaliteedi jälgimisel tuleb pöörata tähelepanu nii pinge mittelineaarhoonutusele kui ka üksikute harmoonikute tasemele. Eelistatavaks on olukord, kus üksikute harmoonikute tase on sarnane. Vastasel juhul võib ühe harmooniku domineerimine viia standardites sätestatud lubatud piirväärtuste ületamiseni, vaatamata sellele, et üldine pingelineaarhoonutus on normide piires. Antud juhul on domineerivaks viies

harmonik, mille keskmine tase on umbes 2% (joonis 1.15) ning maksimaalne väärtus ületab vaadeldaval ajavahemikul lühiajaliselt 4%. Standardi EVS-EN 50160 järgi on viienda harmooniku piirväärtus 6% (tabel 1.1). Pinge THD lubatud piirväärtus on 8% ning antud alajaama sektsioonis ei ületa selle maksimumväärtus 4%, kui mitte arvestada lühiajalisi transiente. Antud näites on viienda harmooniku tase piirilähedane, vaatamata sellele, et pinge THD on suhteliselt väike. Seega tuleb võimalike probleemide käsitlemisel pöörata kõigepealt tähelepanu just viiendale harmoonikule.



Joonis 1.15 Nuia AJ teise sektsiooni pinge harmoonikute keskmine tase.

Kolmega jagatavad harmoonikud koosnevad üldjuhul ainult nulljärgnevuskomponendist ning kulgevad  $Y_n/D$  trafode kolmnurkmähistes [4]. Ülaltoodud graafikutest ja histogrammidest on näha, et vaatamata sellele on jaotusvõrgu pinge kolmanda harmooniku tase märkimisväärne. See näitab, et harmooniresonantsi tekkimise põhjuste analüüsimisel peab arvestama kolmega jagatavate harmoonikutega (eriti kolmandaga) ka kesk- ja kõrgepinge võrkude puhul.

## 2. HARMOONRESONANTSI NÄHTUSE MODELLEERIMINE

PSCAD (ingl *Power Systems Computer Aided Design*) on võimas ja paindlik graafiline kasutajaliides mis tugineb EMTDC elektromagnetiliste siirdeprotsesside simuleerimise tarkvarale. PSCAD võimaldab kasutajal skemaatiliselt konstrueerida vooluahelaid, käivitada simulatsiooni, analüüsida tulemusi ja hallata andmeid täielikult integreeritud graafilises keskkonnas. Kaasatud on ka reaajas graafikud, juhtnupud ja arvestid, mis võimaldavad kasutajal simulatsiooni käigus süsteemi parameetreid muuta.

PSCAD on komplektis eelprogrammeeritud ja testitud simulatsioonimudelite koguga, mis ulatub lihtsatest passiivsetest elementidest ja juhtimisfunktsioonidest kuni keerukamate mudeliteni nagu elektrimasinad, FACTS-seadmed, ülekandeliinid ja kaablid. Kui nõutavat mudelit pole, pakub PSCAD kasutajale võimalusi mudelite loomiseks. Näiteks saab kohandatud mudeleid konstrueerida, ühendades olemasolevad mudelid mooduliks või konstrueerides paindlikus keskkonnas elementaarseid mudeleid nullist alates.

### 2.1 Ülekandeliinide andmete sisestamine

Õhuliinide ja maakaablite segmentide modelleerimiseks sisestatakse voolujuhitavate osade ja isolatsiooni omadused, maandustakistuse andmed ning ülekandemastide ja juhtmete geomeetrilised andmed. Ülekandeliinid modelleeriti kandemastide ja tootjakataloogist kättesaadavate juhtmete andmete alusel [16]. Eeldatakse, et kõikides liinides kasutatakse PB110-1 tüüpi kandemasti, mille mõõtmed on toodud lisas 1. Joonisel 2.1 on näidatud, kuidas toimub kandemasti geomeetriliste andmete sisestamine.

Tower: 3H5  
Conductors: HAWK      Tower Centre 0.0 [m]      →      Ground\_Wires: 1/2\_HighStrengthSteel

Circuit #	Cond. #	Connection Phasing #	X (from tower centre)	Y (at tower)	GW. #	Connection Phasing #	X (from tower centre)	Y (at tower)
	1	1	-2 [m]	13.5 [m]	1	Eliminated	0 [m]	22.5 [m]
	2	2	3.5 [m]	13.5 [m]				
	3	3	2 [m]	16.5 [m]				

Joonis 2.1 Kandemasti geomeetriliste andmete sisestamine.

Eeldatakse, et tegemist on ideaalse faasijuhtmete transponeerimisega ning ülekandeliinid on absoluutselt sümmeetrilised. Kandemasti maanduse takistuse andmed on vajalikud peamiselt ülekandeliini nulljärgnevustakistuse arvutamiseks. Pinna eritakistuseks on võetud  $100 \Omega \cdot m$ . Ülekandeliini juhtmete rippeks on võetud 6 m. Juhtmete tüüp on valitud Eleringi projekteerimisnõuetes toodud standardsete konfiguratsioonide alusel [17], mis on toodud tabelis 2.1.

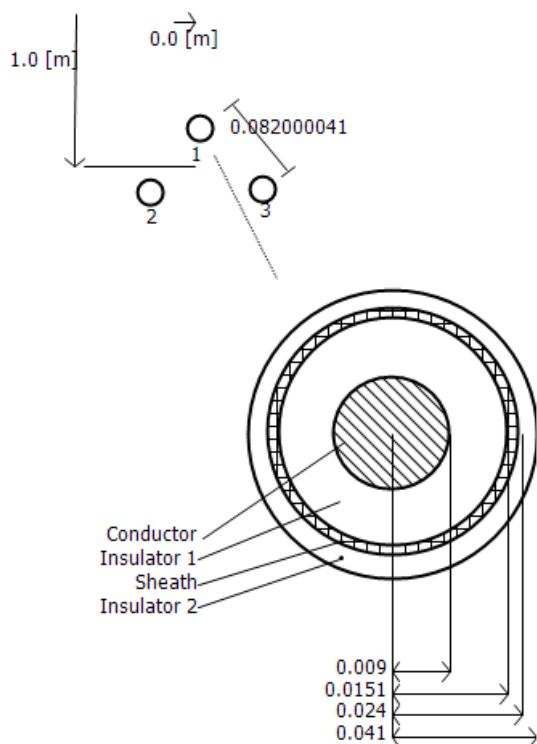
Tabel 2.1. Ülekandeliini standartsete juhtmete valiku konfiguratsioon.

$U_n$ , kV	juhtmeid faasis, tk	juhtmete mark
330	3x	ACSR 402
110	2x; 1x	242-AL1/39-ST1A
110	1x	152-AL1/25-ST1A

Kõikide liinide juhtmetüüp on 242-AL1/39-ST1A terasalumiiniumjuhe, mille alumiiniumtraatide summaarne ristlõike pindala on 242 mm<sup>2</sup> ning terastraatide summaarne ristlõike pindala 39 mm<sup>2</sup>. Sellele vastab Prysmian Group juhe ACSR 242/39 HAWK. PSCAD mudelisse on kantud tootja kataloogist võetud juhtme traatide arv ning nende mõõtmed. Juhtmete arv faasis on üks.

## 2.2 Maakaabli andmete sisestamine

Maakaabli andmed on võetud tootja kataloogidest [16], [18]. Joonisel 2.2 on näidatud, kuidas maakaabli volujuhitava osa, isolatsiooni ja varju geomeetriselised andmed sisestatakse PSCAD mudelisse. Isolatsiooni ja juhtme andmed saab sisestada mahtuvusena ja takistusena kilomeetri kohta või isolatsiooni dielektrilise läbitavusena ja juhtme eritakistusena.



Joonis 2.2 Maakaabli andmete sisestamine PSCAD mudelisse.

Kuna käesolevas töös käsitletakse harmoonikuid, siis on eriti tähtis, et ülekandeliini mudel võtab arvesse sageduse muutust. Ülekandeliinide modelleerimisel kasutab PSCAD sagedusest sõltuvat mudelit, mis on põhimõtteliselt hajutatud RLC liikuva laine mudel, mis hõlmab kõigi parameetrite sagedussõltuvust.

## 2.3 Mudeli parameetrite arvutamine

Toitvate sõlmede latid on ühendatud ideaalse pingeliikuga, mille sisetakistus on absoluutselt induktiivne ning selle induktiivsus henrides on arvatud sõlme kolmefaasilise lühistakistuse valemi 1.11 kaudu. Näiteks Paide alajaama 330 kV lattide kolmefaasilise lühisele vastav induktiivsus on:

$$L_{Paide,330} = \frac{21,93}{2\pi \cdot 50} \approx 6,98 \text{ mH}.$$

Reaktiivenergia kompenseerimise ja pingetuhtimise seadmed on modelleeritud kondensaatorina, millega on vajaduse korral jadamisi ühendatud reaktor, mis on modelleeritud induktiivpoolina. Kondensaatorpatarei ühe faasi mahtuvus leitakse järgmise valemiga:

$$C = \frac{S_c}{U^2 2\pi f} \quad (2.1)$$

Viljandi 110 kV 30 MVA kondensaatorpatarei ühe faasi mahtuvus on:

$$C = \frac{30}{110^2 \cdot 2\pi \cdot 50} \approx 7,22 \mu F.$$

Trafode ja autotrafode modelleerimiseks on kasutatud seadmete nimivõimsuse, lühispinge ning vase- ja terasekao andmeid.

Juhtudel, kus koormus on modelleeritud jadamisi takisti ja induktiivpoolina, on koormuse takistus ja induktiivsus arvatud koormuse näivtakistuse ja võimsusteguri alusel. Koormuse näivtakistus on arvatud järgmise valemi abil:

$$Z = \frac{U^2}{S} \quad (2.2)$$

Aktiivtakistus:

$$R = Z \cdot \cos \varphi \quad (2.3)$$

Koormuse induktiivsus:

$$L = \frac{Z \cdot \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2}}{2\pi f} \quad (2.4)$$

Näiteks arvutati alajaama ühe 115/16,5 kV trafo 20 MVA võimsusega koormuse mudeli parameetrid järgmiselt:

$$Z = \frac{16,5^2}{20} \approx 12,25 \Omega;$$

$$R = 11,25 \cdot 0,9 \approx 5,93 \Omega;$$

$$L = \frac{11,25 \cdot \sqrt{1 - 0,9^2}}{2\pi \cdot 50} \approx 1,89 \text{ mH}.$$

Koormuse modelleerimine takistina ja induktiivpoolina tehti ainult lihtsate seoste väljaselgitamiseks. Edaspidises analüüsis kasutatakse koormuse modelleerimiseks PSCADi andmekogus oleva fikseeritud kolmefaasilise koormuse plokki. Selle põhjuseks on asjaolu, et autori arvates sobib see paremini tänapäeva olmeelektripaigaldistes laialt kasutatavate toiteplokkide modelleerimiseks, kuna need moodustavad olulise osa elektrivõrgu koormusest. Olmeelektroonikaseadmete ja valgustusseadmete toitemuundurid reguleerivad väljundpinget ja sellega tarbivad sama võimsust sõltumata koormusest tulenevatest pingelangudest jaotusvõrgus. Samuti kasutatakse tööstuses ja hooneautomaatikas kasutatavate mootorite juhtimiseks sagedusmuundureid, mida mudelis on otstarbekam näidata fikseeritud koormusena. Ka otse võrku lülitatud asünkroonmootorid võivad tarbida suurema voolu pinge langemisel, kuna pinge langemisel suureneb libistus, juhul kui mehhaaniline koormus on konstantne [19].



## **3. HARMOONRESONANTS ÜLEKANDEVÕRGUS**

Ülekandevõrk kujutab endast reeglina ring- või silmusvõrku, mis võib olla väga laiaulatuslik. Analüüs piirdub uuritava alajaama ning sellega ühendatud kolme toitva sõlmega.

### **3.1 Uuritav näide**

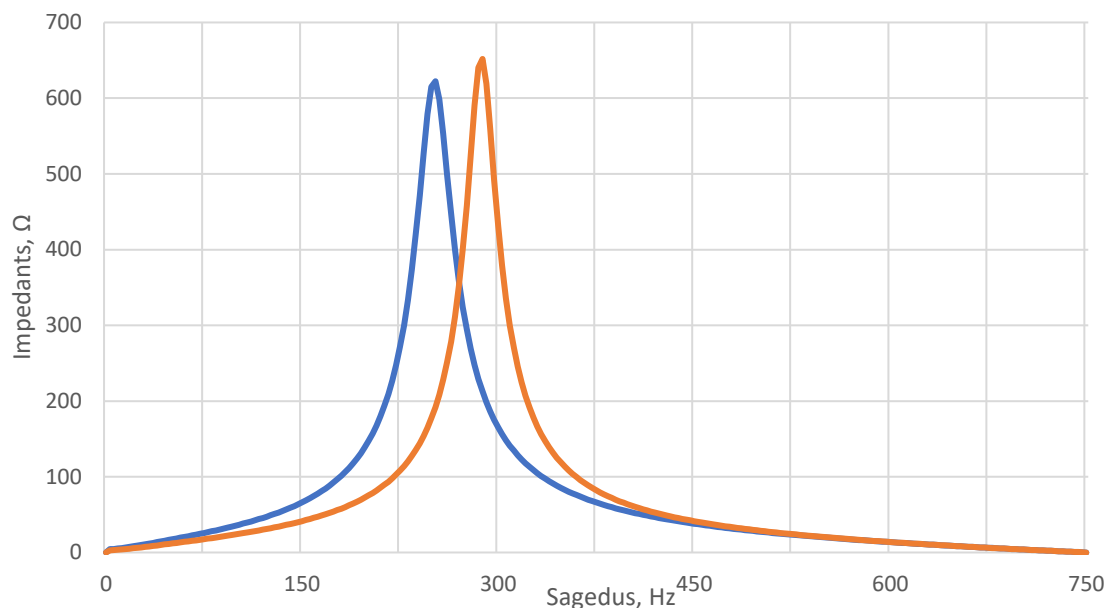
Harmonresonantsi uurimiseks koostatud mudel koosneb neljast sõlmest: Viljandi, Tartu, Sindi ja Paide. Modelleeritud on:

- sõlmesid ühendavad 110 kV liinid
- uuritava Viljandi alajaama tarbijaliinid ning trafod
- toitvate Tartu, Sindi ja Paide alajaamade 330/110 kV trafod ja autotrafod
- reaktiivenergiakompenseerimis- ja pingajuhtimisseadmed

Uuritava ülekandevõrgu skeem on toodud lisas 2. Ülekandevõrgu PSCAD mudel on toodud lisas 4 ning mudeli parameetrid lisas 3. Selleks, et uurida, kuidas harmonresonants mõjutab elektri kvaliteeti 110 kV alajaamas, tuleb simuleerida realistliku moonutuse tasemega stsenaarium. Mittelineaarsete tarbijate modelleerimiseks on alajaama 110 kV lattidega ühendatud voluharmonikute allikas. Allikas emiteerib viienda, seitsmenda, üheteistkümnenda ja kolmeteistkümnenda harmoonikuid, kuna need on elektrivõrkudes tavaliselt domineerivad [15], [20]. Paarisarvulised harmoonikud kaasnevad voolu positiivse ja negatiivse poolperioodide asümmeetriaga, mis võib esineda näiteks kaarahjude puhul [15], [21] või trafode pingestamise hetkel. Üldjuhul on paarisarvuliste harmoonikute tase paaritarvulistest väiksem ning samuti on väiksemad nende lubatud piirid. Kõikide emiteeritud harmoonikute efektiivväärtus mudelis on 5 A. Väärtus valiti katselisel meetodil selline, et pinge mittelineaarmoonutus alajama ülempinge lattidel ning voolu mittelineaarmoonutus liinides oleks normide piires. Referentsiks võeti Fingridi nõuded pingekvaliteedile, kuna need on avalikest allikatest kättesaadavad. Eesti ülekandevõrkudes on nõuded pingekvaliteedile samad mis Soome ülekandevõrgus.

### **3.2 Simulatsiooni tulemuste analüüs**

Algtingimustel on alajaamas alampingepoolsed kondensaatorpatareid väljas ning 110 kV kondensaatorpatarei sees. Kõik võrgus olevad liinid on sees. Sageduskarakteristik, mis on mõõdetud alajaama kõrgepinge lattidel, on toodud joonisel 3.1. On selgelt näha resonantsipunkt sagedusel 290 Hz, mis on kuuenda harmooniku lähedal ning ei lange emiteeritud harmoonikutega. Samuti on näha, et sagedusel 750 Hz läheneb takistus nullile, kuna see on kondensaatorpatarei ja käivitusreaktori resonantssagedus.



Joonis 3.1. Viljandi sageduskarakteristik muutmine ülekandeliini väljalülitamisel.

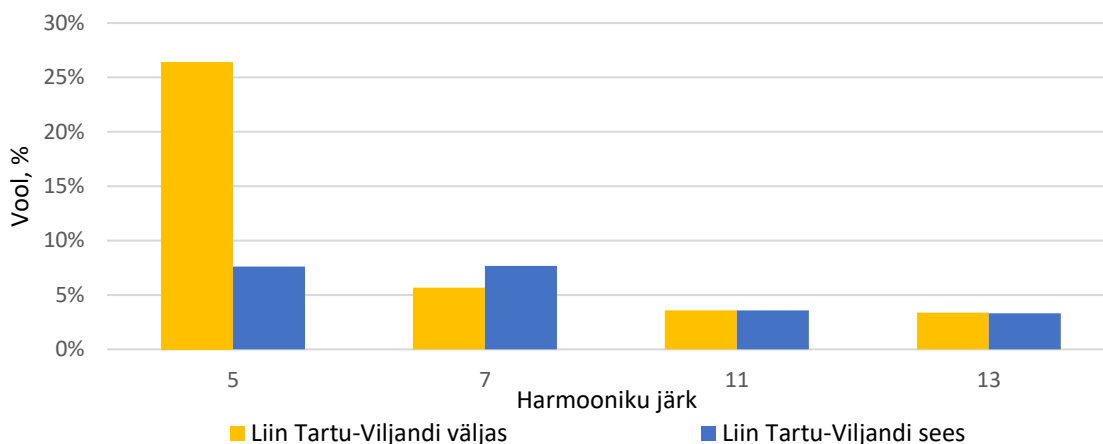
Nagu on näha tabelis 3.1, on pinge mittelineaarMoonutus alajaama 110 kV lattidel antud katses 1,62%, mis on lubatud maksimaalsest väärtusest väiksem.

Tabel 3.1 Harmonmoonutuse näitajate muutmine ülekandeliini väljalülitamisel.

	Liin Tartu-Viljandi sees	Liin Tartu-Viljandi väljas
<b>THD<sub>U</sub>, %</b>	1,62	4,76
<b>THD<sub>I</sub> KP1, %</b>	11,88	27,46
<b>THD<sub>I</sub> Viljandi-Paide, %</b>	3,81	8,86
<b>THD<sub>I</sub> Viljandi-Sindi, %</b>	3,96	8,85
<b>THD<sub>I</sub> Viljandi-Reinu, %</b>	0,63	1,99
<b>I KP1, A</b>	152	154
<b>I<sub>KP1</sub>/I<sub>KP1, nimi</sub></b>	1,01	1,01
<b>U<sub>latted</sub>, kV</b>	114,4	112,4
<b>U<sub>KP</sub>, kV</b>	114,9	112,8

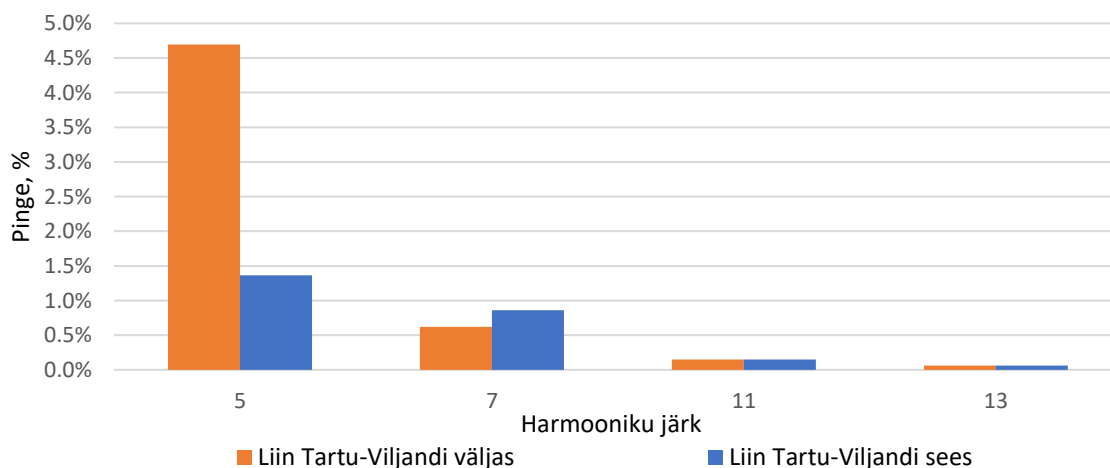
Sisendliinidel (Paide, Sindi, Tartu) on voolu THD 3,81–4,46%. Harmoonikute allikas on ühendatud otse 110 kV lattidega ning väljuvate liinide ja trafode koormused on mudelis täiesti lineaarsed. Vaatamata sellele, nagu on näha tabelist 3.1, esinevad väljuvas liinis Viljandi-Reinu vooluharmoonikud. Emiteeritud harmoonikud on põhjustanud alajaama pinge moonutust, mis omakorda mõjutab kõiki alajaama lattidega ühendatud tarbijaid. Kuna 110 kV alajaamaga ühendatud tarbijate arv on suurem kui näiteks keskpinge jaotusalajaama oma, on standardites ja võrgueeskirjades toodud nõuded kõrgepingevõrkudes rangemad kui keskpinge võrkudes. Nagu näha, on kondensaatorpatarei voolu THD 11,88%, mis on nõuetest suurem, kuid see on paratamatu, kuna kondensaatorpatareid talitlevad lisaks reaktiivenergia

kompanseerimisele ja pinge reguleerimisele ka harmoonikute filtritena. Allolevatel joonistel (joonis 3.2 ja joonis 3.3) on toodud kondensaatorpatarei voolu ja alajaama faasipinge harmoonikute diagrammid.



Joonis 3.2 Kondensaatorpatarei voolu harmoonikute võimendamine liini Tartu-Viljandi väljalülitamisel.

Kondensaatorpatarei voolus on selgelt näha emiteeritud harmoonikud kuid nende efektiivväärtus ei ole võrdne. Põhjuseks on see, et võrgu impedants on igal sagedusel erinev ning ka vooluharmonikute jagunemine sõlmes toimub erinevalt.



Joonis 3.3 Pinge harmoonikute võimendamine liini Tartu-Viljandi väljalülitamisel.

Järgmises katses oli liin Tartu-Viljandi välja lülitatud. Sagedusarakteristiku muutus on näidatud joonisel 3.1. Resonantsisagedus on siin 250 Hz ehk viies harmoonik. Tabelis 3.1 on näha, et sõlme pinge THD on nüüd 4,76%. Kondensaatorpatarei voolu THD on üle 27% ning voolu ostsillogrammi visuaalsel vaatlusel on näha, et resonantsi puhul see enam siinuselist kuju ei oma (joonis 3.7). Paide ja Sindi liinide THD on tõusnud üle 8,8%. Tarbijaliini Viljandi-Reinu koormusvoolu THD on 1,99%, mis on tingitud Viljandi alajaama lattide pinge moonutusest.

Antud näites on näha, et võrgu konfiguratsiooni muutmisel langes resonantsipunkt kokku viienda harmoonikuga ning energia kvaliteedi tingimused sõlmes halvenesid järsult ja ületasid lubatud piiri. Vaatamata sellele, et iga tarbija voolu THD oli normi piirides, toimus resonantsi tõttu harmoonikute võimendus, mis kandub üle ka teistele tarbijatele. Sõlme pinges ja eriti kondensaatorpatarei voolus on selgelt näha (joonis 3.2 ja joonis 3.3) domineeriv viies harmoonik.

### **3.2.1 Sageduskarakteristiku sõltuvus erinevatest tingimustest**

Selleks, et selgitada välja võimalikud probleemsed olukorrad, tuleb sarnaselt eelnevate näidetega analüüsida võrgu talitlust erinevatel konfiguratsioonidel. Eelnevast teoreetilisest analüüsist selgub, et resonantsi sagedust mõjutavad kõige rohkem uuritava sõlme ühendatud reaktiivenergia allikad ning lühisvõimsus alajaama lattidel. Alajaama lühisvõimsus sõltub peamiselt toitvate liinide parameetritest ning nende arvust. Vaatamata sellele, et enamuse oma eluajast talitleb alajaam ühes konfiguratsioonis ehk normaalskeemis, võivad rikete või hooldustööde ajal olla mõned ülekandeliinid välja lülitatud. Samuti on vajalik analüüsida teiste alajaamade vaheliste liinide ning toitvate sõlmede 330/110 kV trafode ja autotrafode väljalülitamise mõju. Selleks, et uurida erinevate ülekandeliinide ja reaktiivenergia ning pingejuhtimisseadmete lülitamise erinevaid kombinatsioone, on koostatud tabel, mis on toodud lisa 5. Tabeli igale veerule vastab ühe liini või toitvas sõlmes autotrafo väljalülitus. Ridadele vastavad erinevad kondensaatorpatareide lülitamise kombinatsioonid. Igas lahtris on toodud vastavalt sõlme resonantssagedus hertsides, pinge mittelineaar moonutus, kõige suurem toitva liini voolu mittelineaar moonutus ja kondensaatorpatarei voolu mittelineaar moonutus. Punasega on märgitud need kombinatsioonid, millel sõlme pinge mittelineaar moonutus ületab 3%. Kollasega on märgitud olukorrad, kus voolu mittelineaar moonutus vähemalt ühes liinis ületab 6%. Rea või veeru järknumbri kasvamisega kasvab sellega seotud tegevuse mõju resonantssagedusele. Tabelist on näha, et alajaama toitvate liinide väljalülitamisel või võrgu kõikide kondensaatorpatareide sisselülitamisel on sõlme resonantsisagedus viienda harmoonikuga (250 Hz) lähedane ning harmoonmoonutuse tingimused on kõige halvemad. Ent nende kahe piirtingimuse kombineerimisel (tabeli alumine parem pool, välja arvatud viimane veerg) muutub resonantsisagedus 250 hertsist väiksemaks ning harmoonmoonutuse tingimused paranevad. Liikudes mööda tabeli diagonaali ülemisest vasakust poolest alumisse paremasse (välja arvatud viimane veerg), muutub resonantsisagedus vahemikus 290–220 Hz. Viimase veeru ehk 110 kV kondensaatorpatarei väljalülitamist tuleb käsitleda eraldi, kuna sel juhul nihkub resonantsipunkt 13. harmooniku piirkonda. Lisaks liinide ja kondensaatorpatareide lülitusele mõjutab sageduskarakteristikut oluliselt ka sektsioneeriva võimsuslüli

väljalülitus. Sektsioneeriva võimsuslüliti väljalülitamisel on kondensaatorpatarei ühendatud ainult ühe sektsiooni lattidega ning sellel on toitva liini väljalülitamisega sarnane mõju, kuna kondensaatorpatarei on eraldatud teise sektsiooni liinidest sektsioneeriva võimsuslüliti abil. Katsete järelduseks on see, et paralleelresonantsi seisukohast osutuvad uuritavas alajaamas kõige probleemsemaks viies ja kolmeteistkümnes harmoonikud.

### 3.3 Lahenduse ettepanek

Antud juhul tekkis resonants viiendal harmoonikul. Kondensaatorpatarei impedants võrgusagedusel on:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 7,22 \cdot 10^{-6}} \approx 441 \Omega.$$

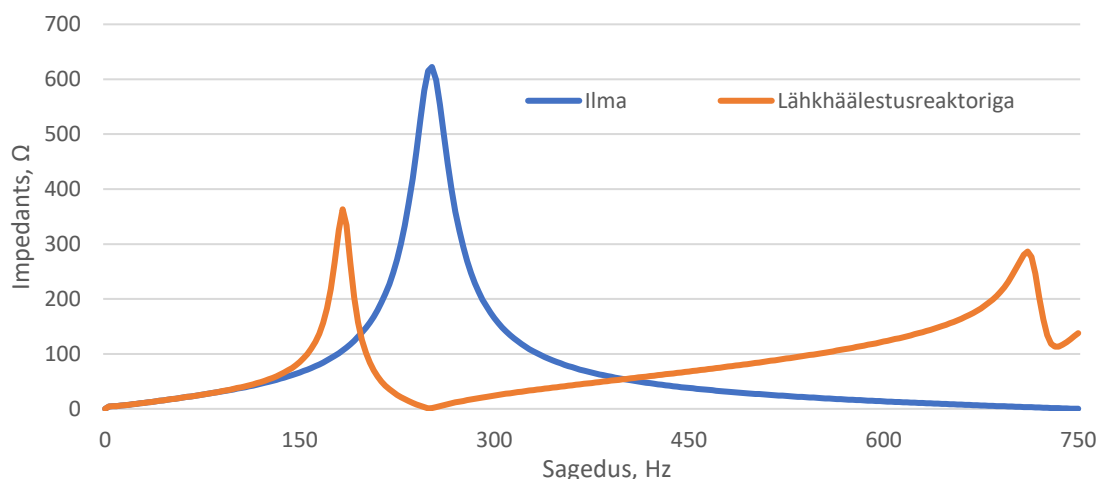
Reaktori induktiivtakistus:

$$X_L = \frac{X_c}{h^2} = \frac{441}{5^2} \approx 17,63 \Omega$$

Reaktori induktiivsus:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{17,63}{2\pi \cdot 50} \approx 5,61 \text{ mH}.$$

Pärast arvutatud induktiivsusega reaktori asetamist mudelisse muutub sageduskarakteristik uuritavas sõlmes järgmiseks (liin Tartu-Viljandi on väljas):



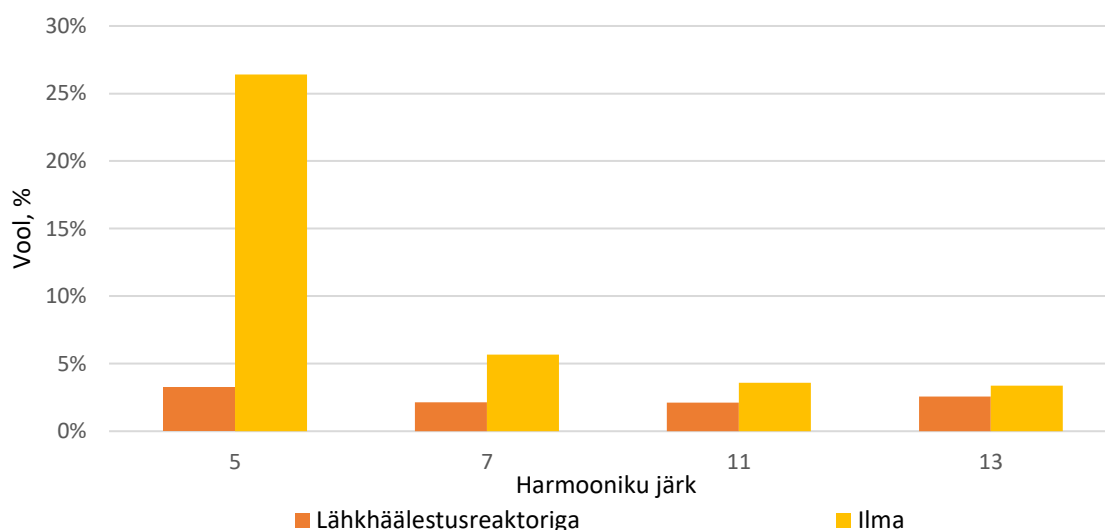
Joonis 3.4 Sageduskarakteristik lähkhäälustusreaktoriga.

Probleemseks võib osutada väiksema takistusega resonantsipunkt sagedusel 175 Hz kuna see on kolmanda harmooniku lähedal. Kuid eelmainitud põhjustel on kolmanda harmooniku esinemise tõenäosus väiksem kui näiteks viienda, seitsmenda, üheteistkümnenenda või kolmeteistkümnenenda oma.

Tabel 3.2 Lahkhäälestusreaktorite mõju harmoonmoonutuse näitajatele.

	<b>Ilma</b>	<b>Lahkhäälestusreaktoriga</b>
<b>THD<sub>U</sub>, %</b>	4,76	1,44
<b>THD<sub>I</sub> KP1, %</b>	27,46	5,09
<b>THD<sub>I</sub> Viljandi-Paide, %</b>	8,86	0,61
<b>THD<sub>I</sub> Viljandi-Sindi, %</b>	8,85	0,55
<b>THD<sub>I</sub> Viljandi-Reinu, %</b>	1,99	0,28
<b>I KP1, A</b>	154	151
<b>I<sub>KP1</sub>/I<sub>KP1, nimi</sub></b>	1,01	1,00
<b>U<sub>lattid</sub>, kV</b>	112,4	112,4
<b>U<sub>KP</sub>, kV</b>	112,8	117,1

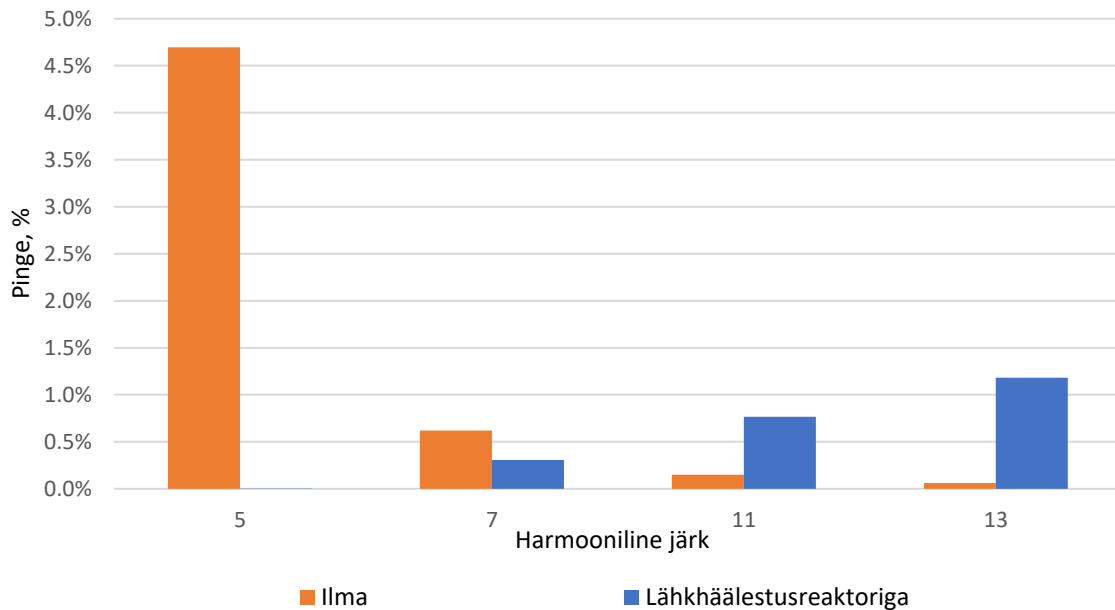
Nagu on näha tabelist 3.2, vähendab lahkhäälestusreaktori lisamine oluliselt pinget ja voolu mittelineaarMoonutust ning see on nüüd normide piires. Alltoodud joonistel on näha KP voolu ja sõlme faasipinge harmoonikute diagrammid (joonis 3.5 ja joonis 3.6).



Joonis 3.5 Lahkhäälestusreaktori mõju kondensaatorpatarei voolu harmoonikutele.

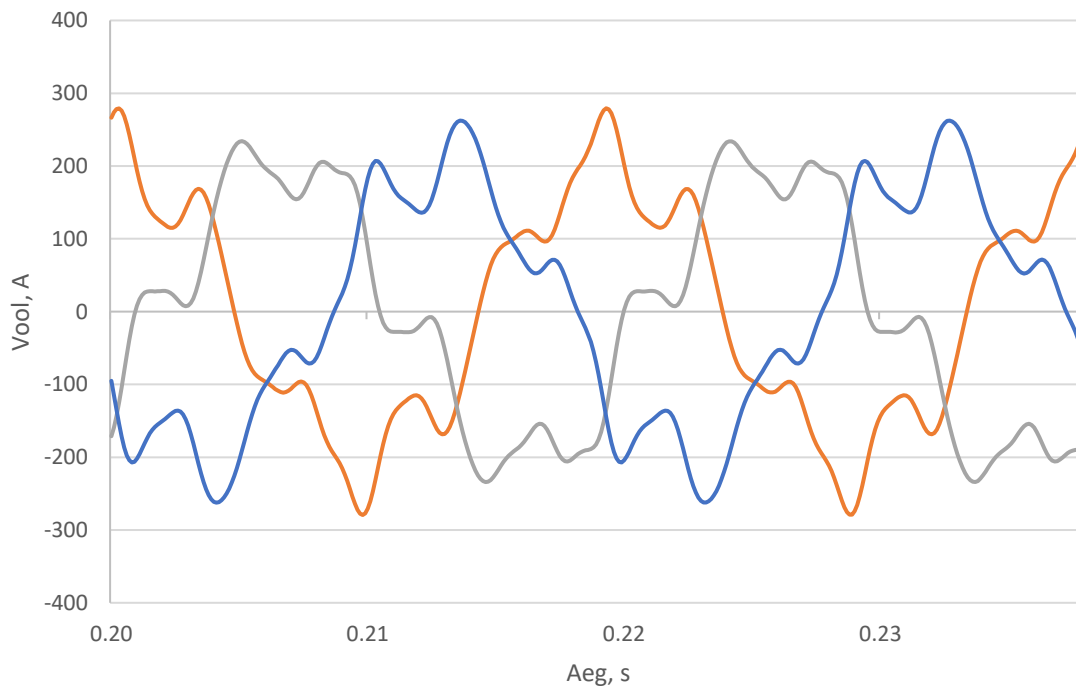
Nagu näha, on tingimused oluliselt paranenud ning pinget viienda harmooniku tase on nüüd 3% normi piires. KP ja lahkhäälestusreaktori pingelangude vektorite summa on võrdne alajaama lattide pingega, kuid pingelang KP peal võib olla sellest suurem. Seetõttu on antud juhul KP liinipinge efektiivväärtus 117,1 kV, kuid lattide pinget on 112,8 kV (tabel 3.2). Lahkhäälestusreaktorite paigaldamisel peab arvestama sellega, et pinget kondensaatorpatarei peal võib ületada tootja poolest või standardides sätestatud piiri.

Joonisel 3.7 on toodud kondensaatorpatarei vool harmooniresonantsil Viljandi-Tartu liini väljalülitamisel. Voolu lainekuju on tugevalt moonutatud ega oma enam siinuselist kuju.



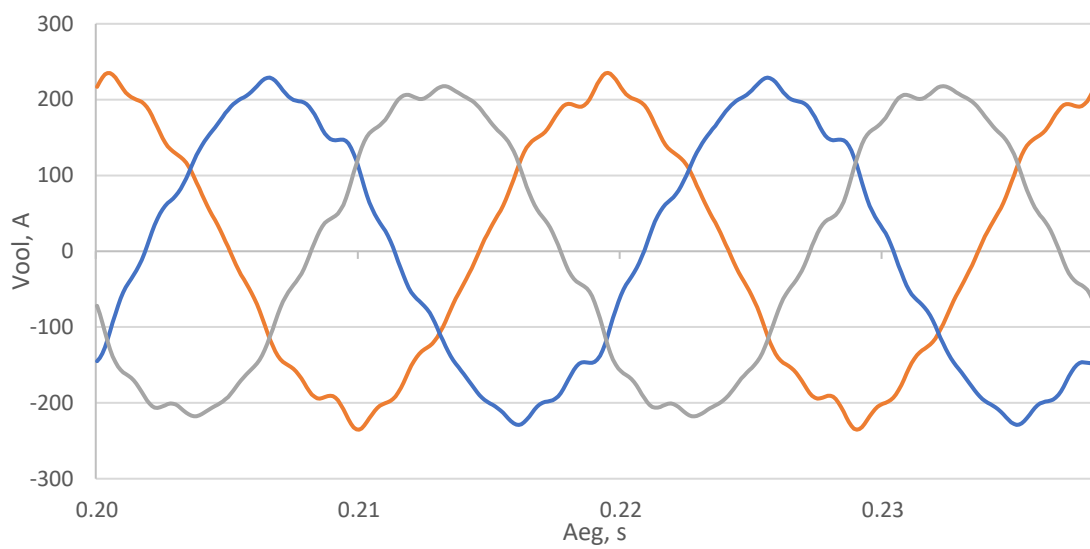
Joonis 3.6 Lahkhäälestusreaktori mõju pinge harmoonikute võimendamisele.

Ostsillogrammide visuaalne vaatlus võimaldab kiiresti hinnata pinge või voolu harmoonmoonutuse taset.



Joonis 3.7 KP vool. Liin Tartu-Viljandi väljas.

Antud juhul on kondensaatorpatarei vool harmoonresonantsil praktiliselt võrdne kondensaatorpatarei nimivooluga ning selle ülekoormamise ohtu ei esine. Lahkhäälestusreaktori kasulikkus seisneb siin eeskätt sõlme pinge parandamises ja sisendliinide voolu mittelineaarhoonutuste vähendamises.



Joonis 3.8 KP vool. Liin Tartu-Viljandi väljas. Lahkhäälustusreaktoriga.

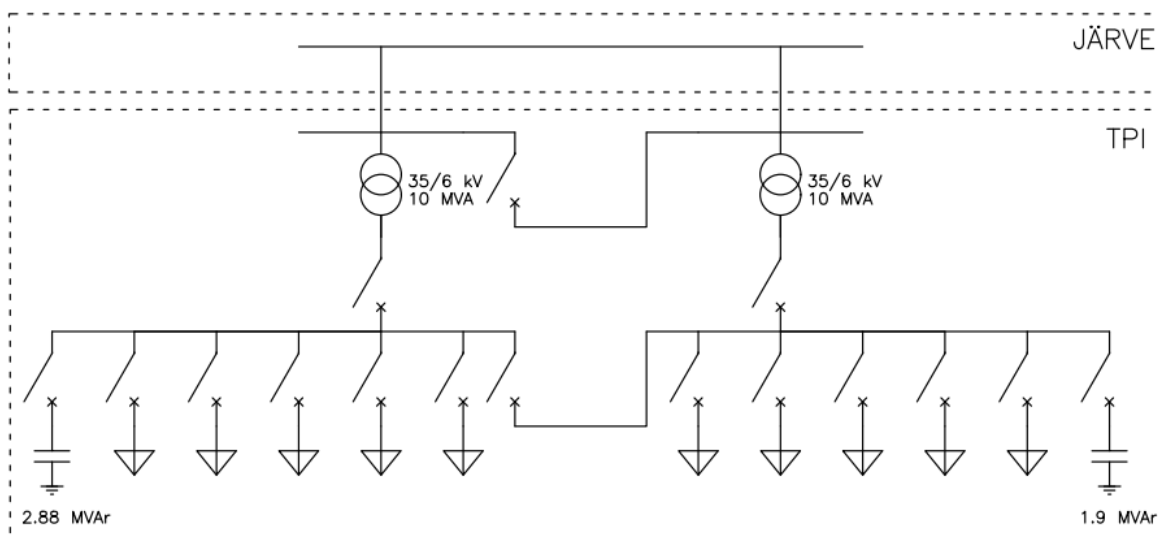


## 4. HARMOONRESONANTS JAOTUSVÕRKU TOITVAS ALAJAAMAS

Antud katses simuleeritakse harmoonresonantsi tekkimist jaotusvõrgu 35/6 kV alajaamas. Keskpinge võrkudes on tihti paigaldatud kondensaatorpatareid ning tehtud analüüsis uuritakse uue kondensaatorpatarei paigaldamist harmoonresonantsi seisukohast.

### 4.1 Uuritav näide

Alajaam paikneb linnas ning toidab maakaabelvõrku. Selles on kaks 35 kV sisendliini ning kaks 35/6 kV 10 MVA jaotustrafot.



Joonis 4.1 Uuritav 35/6 kV alajaam.

Alajaamas on kaks 35 kV sisendliini ning kaks 35/6 kV 10 MVA jaotustrafot. Praeguse seisuga on reaalse alajaama ühes sektsioonis paigaldatud 2,88 MVA kondensaatorpatarei. Et uurida harmoonresonantsi tekkimise erinevaid stsenaariume, on alajaama PSCAD mudel tehtud kahe kondensaatorpatareiga – üks kummaski sektsioonis. Teoreetilise kondensaatorpatarei nimivõimsus on 1,9 MVA ning selle andmed on võetud tootja kataloogist [22]. Uuritava võrgu mudeli joonis on toodud lisas 6. PSCAD mudeli parameetrid on toodud lisas 7. Valemi 1.7 järgi võib välja arvutada teoreetilise resonantsisageduse, kasutades lühisvoolude andmeid ja trafode ning kondensaatorpatareide nimiaandmeid. Alajaama ülempinge poole lattide kolmefaasiline lühisvool juhul, kui mõlemad toitvad 35 kV kaabelliinid on sees, on 14 kA. Seega lühistakistus antud punktis on:

$$Z_{35kV} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I_{k,KP}} = \frac{38,5}{\sqrt{3} \cdot 14} \approx 1,59 \Omega.$$

Trafo lühispinge on 7 %, seega takistus 35 kV poolel on:

$$Z_t = \frac{u_k U^2}{100 S_t} = \frac{10 \cdot 38,5^2}{100 \cdot 7} \approx 10,38 \Omega.$$

Lühistakistus alampingepoole lattidel:

$$Z_{k,6kV} = \left(\frac{6,6}{38,5}\right)^2 \cdot (Z_{35kV} + Z_t) = \left(\frac{6,6}{38,5}\right)^2 \cdot (1,59 + 10,38) \approx 0,35 \Omega.$$

Lühisvõimsus alampingepoole lattidel:

$$S_{k,6kV} = \frac{6,6^2}{0,35} \approx 124,5 \text{ MVA}.$$

Resonantsisagedus esimese sektsiooni lattidel:

$$f_{res} = 50 \cdot \sqrt{\frac{S_{k,MP}}{S_C}} = 50 \cdot \sqrt{\frac{124,5}{2,88}} \approx 328 \text{ Hz}.$$

Resonantsisagedus teise sektsiooni lattidel:

$$f_{res} = 50 \cdot \sqrt{\frac{124,5}{1,9}} \approx 404 \text{ Hz}.$$

Juhul, kui hooldus- või parandustööde käigus madalpinge sektsioonid on omavahel ühendatud sektsioneeriva võimsuslüli kaudu kondensaatorpatareide võimsus liitub ning lühisvõimsus alajaama alampingepoole lattidel suureneb.

$$Z_{k,6kV} = \left(\frac{6,6}{38,5}\right)^2 \cdot (Z_{35kV} + Z_t) = \left(\frac{6,6}{38,5}\right)^2 \cdot \left(1,59 + \frac{10,38}{2}\right) \approx 0,20 \Omega.$$

$$S_{k,6kV} = \frac{6,6^2}{0,20} \approx 217,8 \text{ MVA}.$$

Resonantsisagedus on sel juhul:

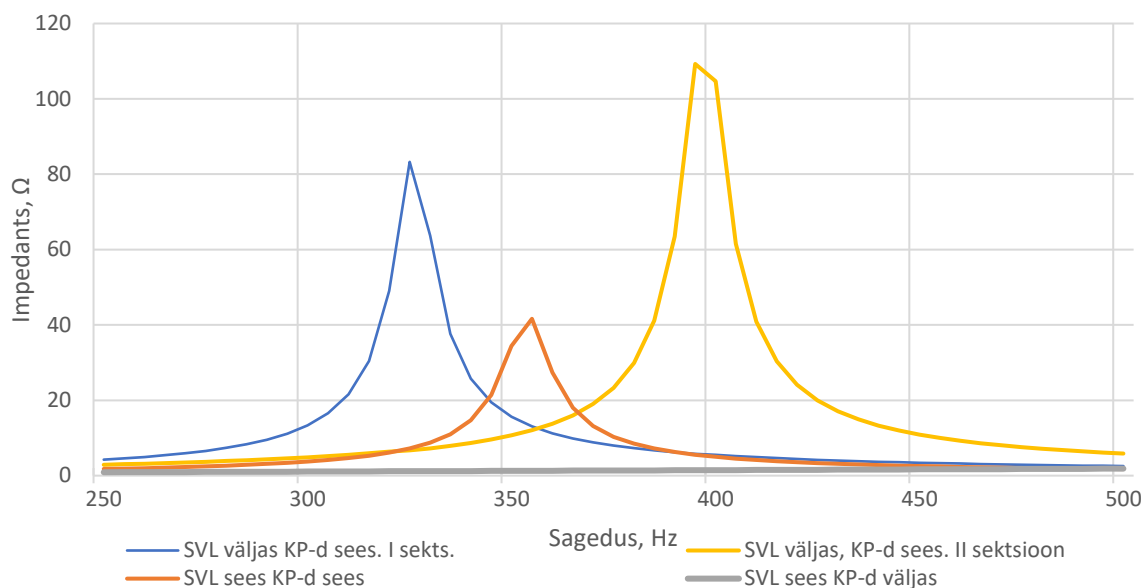
$$f_{res} = 50 \cdot \sqrt{\frac{217,8}{4,78}} \approx 338 \text{ Hz},$$

mis on seitsmenda harmooniku lähedal. Järeldus: on tõenäoline, et simulatsiooni käigus osutub kõige probleemsemaks seitsmes harmoonik, juhul kui alajaamas on sisse lülitatud sektsioonidevaheline võimsuslüli ning mõlemad kondensaatorpatareid.

## 4.2 Simulatsiooni tulemused

Joonisel 4.2 on näha, et sektsioneeriva võimsuslüli sisselülitamisel nihkub võrgu resonantsisagedus seitsmenda harmooniku poole. Vaatamata sellele, et sektsioneeriva võimsuslüli väljasolekul on impedants resonantsisagedusel mõlemas sektsioonis

suurem, on impedants seitsmenda harmooniku sagedusel (350 Hz) väiksem kui sektioneeriva võimsuslüliti seesolekul. Seega toimub sektioneeriva võimsuslüliti sisselülitamisel tugevam seitsmenda harmooniku võimendamine.



Joonis 4.2. AJ sageduskarakteristik. 6kV lattidel.

Tabelist 4.1 on näha, et alajaama 6 kV lattide pinge oli THD enne sektioneeriva võimsuslüliti sisselülitamist 4,44%, mis on standardi EN-50160 järgi lubatud piires. Kondensaatorpatarei voolu THD on 30,99%, mis on väga suur, kuid voolu efektiivväärtus on praktiliselt võrdne nimivooluga. SVL sisselülitamisel, mis võib toimuda hooldus- või parandustööde ajal, tõuseb alajaama pinge THD 17,9%-ni. Esimese kondensaatorpatarei voolu THD on 126% ning voolu efektiivväärtus on 1,5 nimivoolu, mis on standardis IEC-60871 [23] sätestatud 30% piirist väljas ning suure tõenäosusega lülitab liigvoolukaitse teatud aja möödumisel kondensaatorpatarei välja. Teise kondensaatorpatarei puhul on tingimused praktiliselt samad. Ühe kondensaatorpatarei väljalülitamisel sageduskarakteristik muutub ning harmoonikute võimendamine võib järsult peatuda ning sel juhul on tõenäoline, et teise kondensaatorpatarei liigvoolukaitse ei jõua seda välja lülitada.

Tabel 4.1 Harmoonmoonutuse ja KP voolu muutus SVL-i ja KP-de lülitamisel.

	SVL väljas KP-d sees	SVL sees KP-d sees	SVL sees KP-d väljas
<b>THD<sub>U</sub> I sekts, %</b>	4,44	17,91	1,18
<b>THD<sub>U</sub> II sekts, %</b>	2,67	17,91	1,18
<b>THD<sub>I</sub> KP1, %</b>	30,99	126	-
<b>THD<sub>I</sub> KP2, %</b>	19,34	124	-
<b>THD<sub>I</sub> sisend 1, %</b>	22,15	88,67	5,33
<b>THD<sub>I</sub> sisend 2, %</b>	15,27	88,67	5,33

Tabel 4.1 järg

	SVL väljas KP-d sees	SVL sees KP-d sees	SVL sees KP-d väljas
<b>I KP1, A</b>	256	256	0
<b>I KP2, A</b>	173	377	0
<b>I<sub>KP1</sub>/I<sub>KP1</sub>, nimi</b>	1,03	1,51	0
<b>I<sub>KP2</sub>/I<sub>KP2</sub>, nimi</b>	1,04	1,48	0

### 4.3 Lahenduse ettepanek

Antud juhul tekkis resonants seitsmendal harmoonikul. Et välistada jadaresonantsi tekkimist, valitakse reaktori ja kondensaatori resonantsisagedus mitteharmooniliseks ehk  $h$  ei tohi olla täisarvuline.

Esimese sektsiooni kondensaatorpatarei impedants võrgusagedusel on:

$$X_{c,KP1} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 210 \cdot 10^{-6}} \approx 15,13 \Omega.$$

Reaktori reaktiivtakistus:

$$X_{L,KP1} = \frac{X_c}{h^2} = \frac{15,13}{6,5^2} \approx 0,36 \Omega$$

Reaktori induktiivsus:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{0,36}{2\pi \cdot 50} \approx 1,1 \text{ mH}.$$

Teise sektsiooni kondensaator patarei impedants võrgusagedusel on:

$$X_{c,KP2} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 139 \cdot 10^{-6}} \approx 22,92 \Omega.$$

Reaktori reaktiivtakistus:

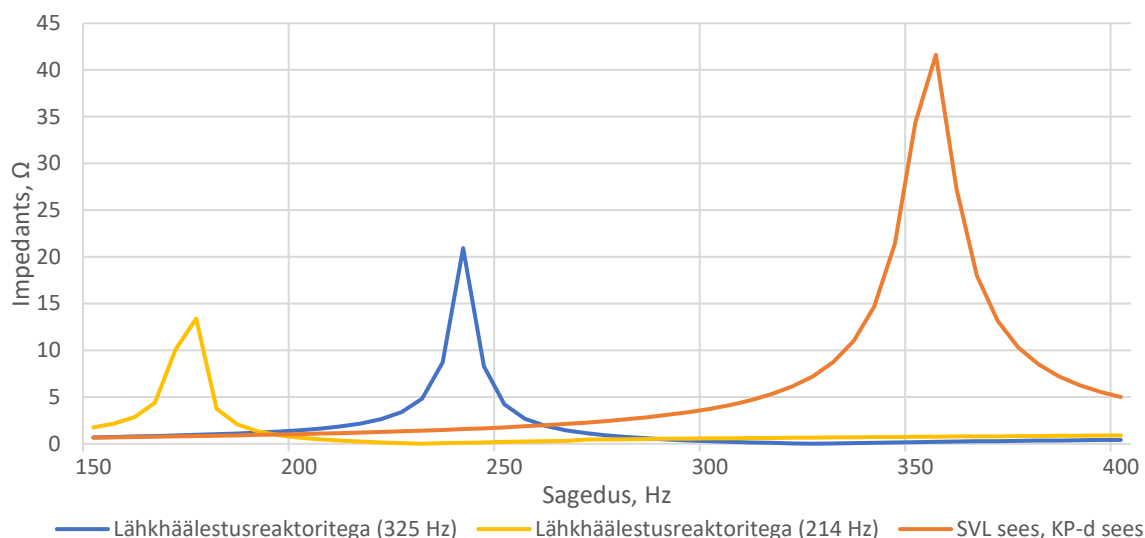
$$X_{L,KP2} = \frac{X_c}{h^2} = \frac{22,92}{6,5^2} \approx 0,54 \Omega$$

Reaktori induktiivsus:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{0,54}{2\pi \cdot 50} \approx 1,7 \text{ mH}.$$

Madalpingevõrkudes on levinud standardsete väärtustega reaktorid, mille resonantsisagedused koos kondensaatorpatareidega on 134, 189, 214 Hz [8]. Samad väärtused on kasutusel ka keskpingevõrkudes [24]. Joonisel 4.3 on näha, et kui valida lahkähälestatud filtri resonantsisageduseks seitsmenda ja kuuenda harmoonikute vahel (325 Hz), siis tekib sageduskarakteristikul uus resonantskoht viienda harmooniku

lähedal. Kui valida filtri resonantsisageduseks 214 Hz, on impedants viiendal harmoonikul palju väiksem.



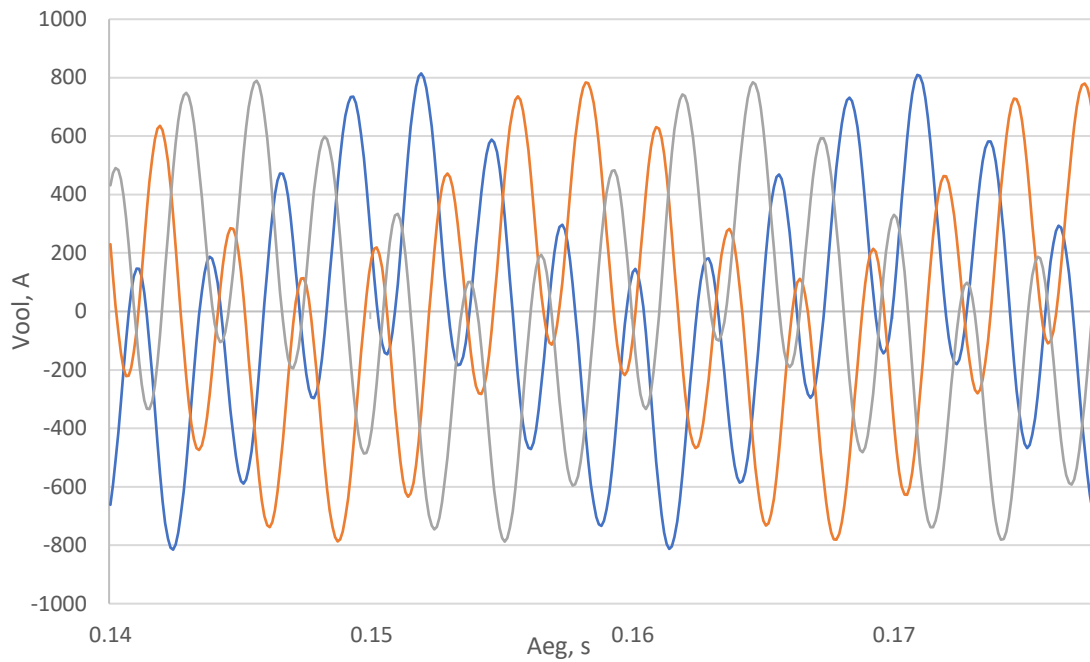
Joonis 4.3 Lahkhäälestusreaktorite mõju AJ sagedusarakteristikule.

Tabelis 4.2 on näidatud, kuidas harmoonmoonutuse parameetrid muutuvad erinevate resonantssagedusega lahkhäälestusreaktorite lisamisel. 214 Hz resonantssagedusega filtri puhul on pinge ja sisendvoolu THD väiksem, kuna impedants viiendal harmoonikul on väiksem. Üheks oluliseks järelduseks sellest on siis, et lahkhäälestatud filtri võivad nihutada resonantssagedust mõne teise harmooniku sagedusele. Lahkhäälestatud filtri omasageduse valimine võrgu resonantssageduse lähedaseks ei pruugi välistada harmooniresonantsi tekkimist. Modelleerimistarkvara võimaldab katselisel meetodil leida sellise lahkhäälestusreaktori induktiivsuse, mille sagedusarakteristik on optimaalne ning kõik resonantsipunktid on välja filtreeritud. Antud juhul osutus paremaks hoopis 214 Hz sagedusega lahkhäälestatud filter, mis erineb arvutamisel saadud väärtusest.

Tabel 4.2 Lahkhäälestusreaktorite mõju harmoonmoonutusele. SVL sees, KP-d sees.

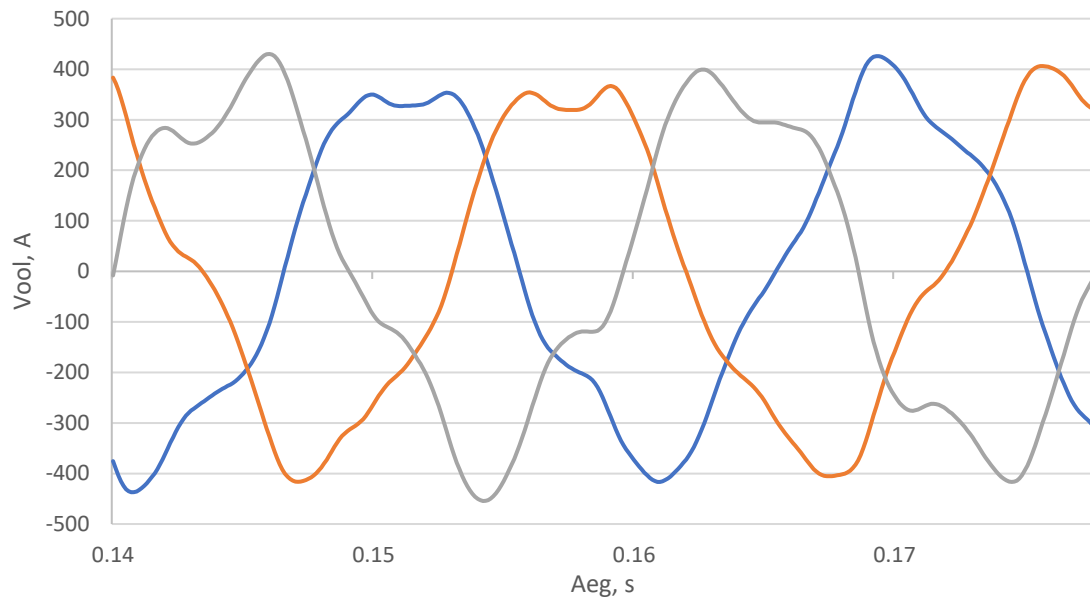
	Ilma	Lahkhäälestusreaktor. 325 Hz	Lahkhäälestusreaktor. 214 Hz
<b>THD<sub>U</sub>, %</b>	17,91	2,20	0,75
<b>THD<sub>I</sub> KP1, %</b>	126	26,24	3,12
<b>THD<sub>I</sub> KP2, %</b>	124	26,57	3,33
<b>THD<sub>I</sub> sisend 1, %</b>	88,67	15,05	3,14
<b>THD<sub>I</sub> sisend 2, %</b>	88,67	15,05	3,14
<b>I KP1, A</b>	377	261	267
<b>I KP2, A</b>	256	174	176
<b>I<sub>KP1</sub>/I<sub>KP1</sub>, nimi</b>	1,51	1,04	1,05
<b>I<sub>KP2</sub>/I<sub>KP2</sub>, nimi</b>	1,48	1,05	1,05
<b>U KP1, kV</b>	3,84	3,93	4,05
<b>U KP2, kV</b>	3,84	3,93	4,06

Joonisel 4.4 on toodud kondensaatorpatarei voolu ostsilogramm lahkäälestusreaktorite puudumisel.



Joonis 4.4 KP1 vool harmoonresonantsi tingimustel.

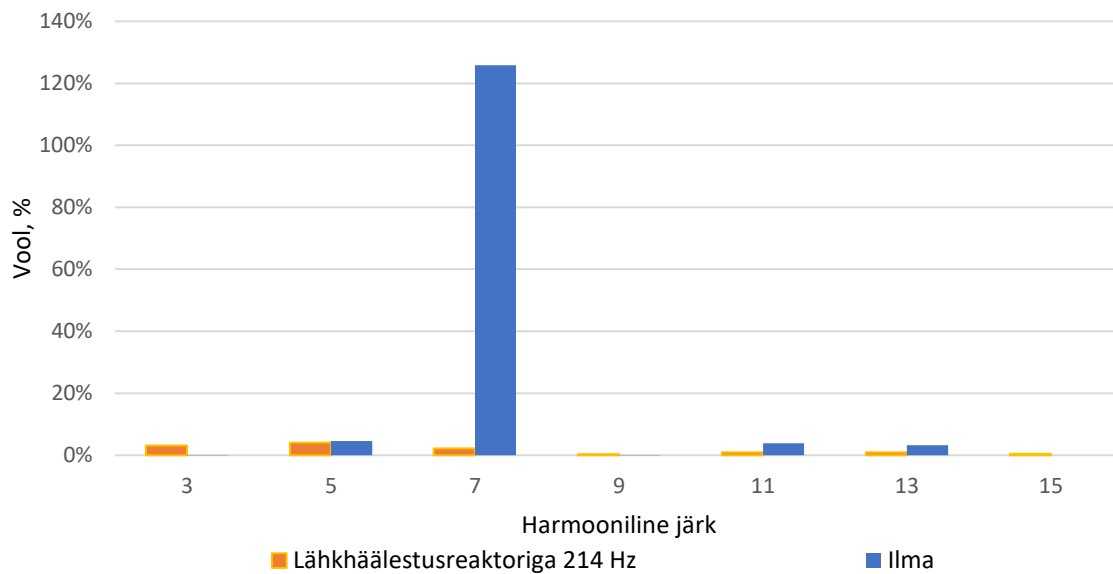
Joonisel 4.5 on näha, kuidas lahkäälestusreaktorite lisamisel omandab vool taas siinuselise kuju.



Joonis 4.5 KP vool lahkäälestusreaktoritega.

Joonisel 4.6 on näha, et nagu oli juba selgitatud teoreetilises käsitluses, osutub kõige probleemsemaks seitsmes harmoonik. Lahkäälestusreaktorite lisamine kõrvaldab

seitsmenda harmooniku võimendamist, mille efektiivväärtus enne seda oli üle 120% põhiharmoniku suhtes.



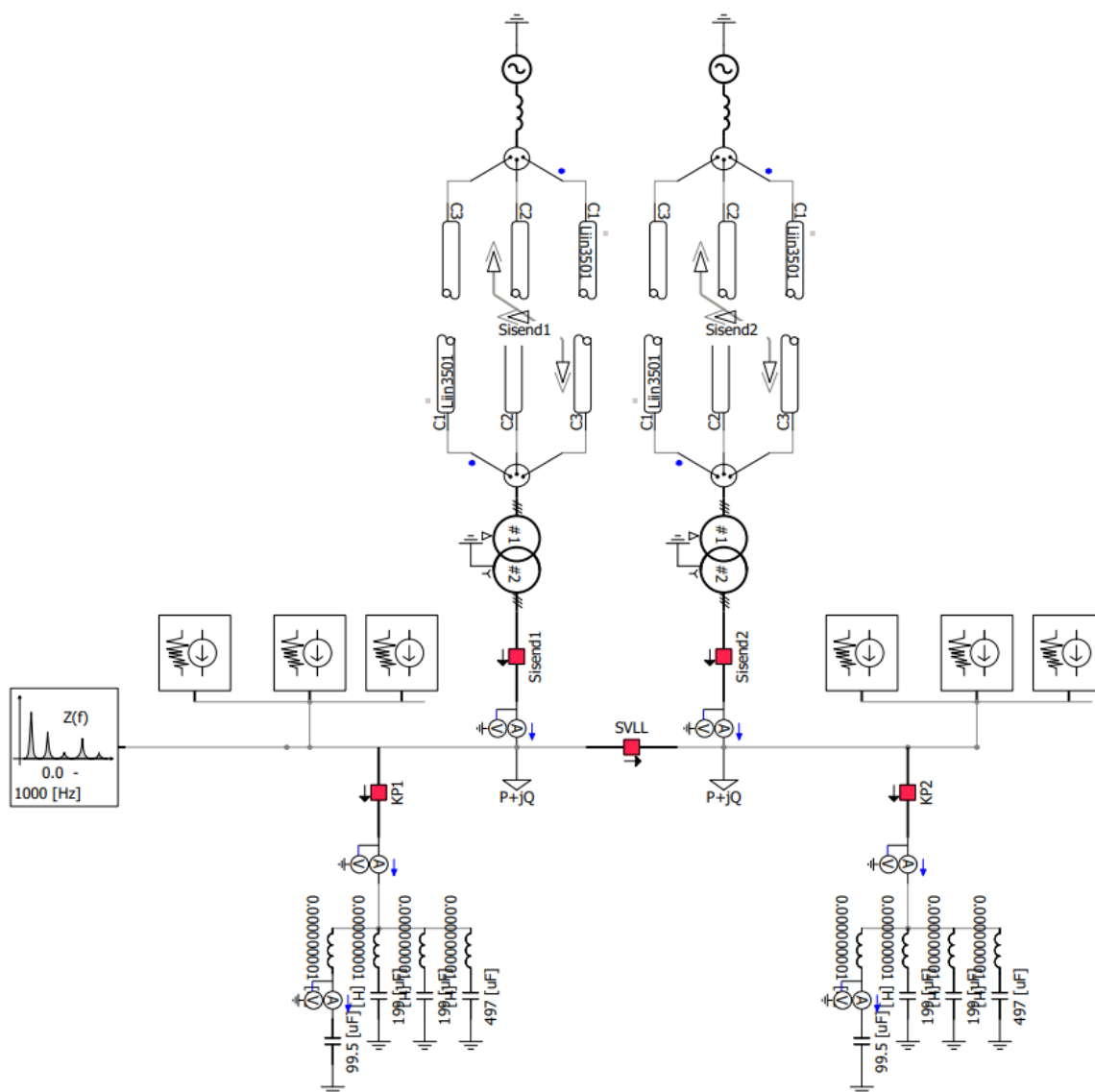
Joonis 4.6 Lähkhäälustusreaktori mõju kondensaatorpatarei voolu harmoonikutele.

## 5. HARMOONRESONANTS TARBIJA ELEKTRIPAGALDISES

Antud katses simuleeritakse harmoonresonantsi tekkimist Tallinna Tehnikaülikooli energeetikamaja (NRG) madalpinge elektrivõrgus. Mudel oli koostatud teise tudengi poolst bakalaaurusetöö raames teostatud võrguanalüsaatori mõõtmiste alusel [25].

### 5.1 Uuritav näide

NRG õppehoone elektrivarustus on teostatud hoonesse sisseehitatud alajaama nr 784 kahest õlijahutusega trafost (6/0,4 kV; 630 kVA) kaabelliinidega pingel 3x230/400 V. Alajaam ning 0,4 kV jaotusseade asuvad hoone esimesel korrusel [25]. Tallinna Tehnikaülikooli energeetikamaja elektripaigaldise PSCAD mudel on toodud joonisel 5.1.



Joonis 5.1 NRG hoone elektrivõrgu PSCAD mudel.



Trafode parameetrid PSCAD mudelis on toodud tabelis 5.1.

Tabel 5.1 Trafode parameetrid PSCAD mudelis

seade	nimipinge, kV	nimi-võimsus, MVA	lühispinge, s.ü.	lühis-võimsus, s.ü.	Tühijooksu-võimsus, s.ü.
trafo 1	6/0,4	0,63	0,04	0,05	0,003
trafo 2	6/0,4	0,63	0,04	0,05	0,003

Toitvate 6 kV liinide parameetrid on toodud tabelis 5.2. Kaablite tüüp on AHXAMK-W ristlõike pindalaga 150 mm<sup>2</sup>.

Tabel 5.2 Sisend liinide parameetrid PSCAD mudelis

parameeter	väärtus
voolujuhitava osa raadius, m	0,007
isolatsiooni välisraadius, m	0,0125
ekraani välisraadius, m	0,018
kesta välisraadius, m	0,0355
voolujuhitava osa materjal	alumiinium
isolatsiooni materjal	XLPE
ekraani alalisvoolu takistus, Ω/km	0,35
kesta materjal	PE
sügavus pinnas, m	1
pikkus, km	1

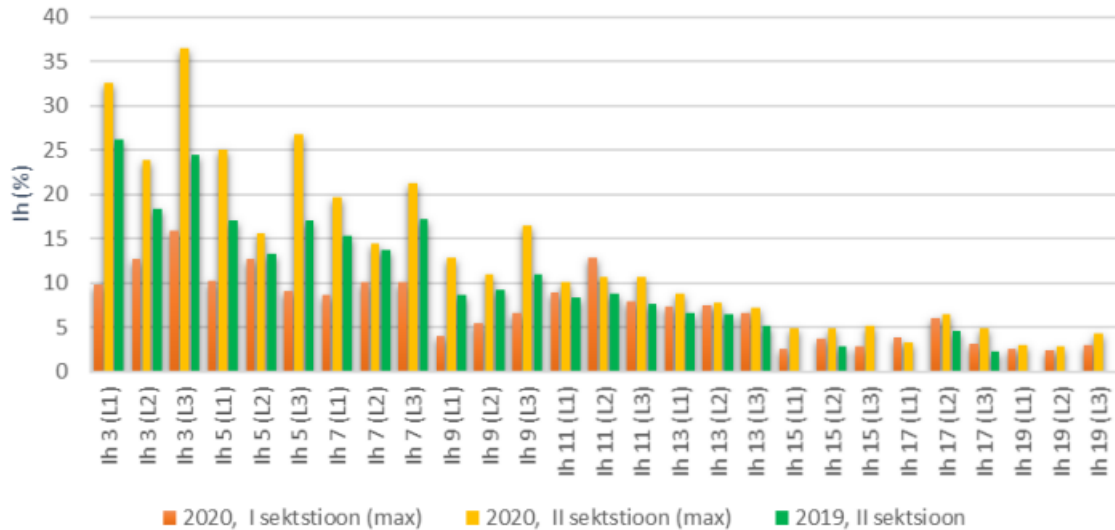
Joonisel 5.2 on toodud NRG õppehoone 0,4 kV jaotla 2020 a vooluharmonikute mõõtetulemuste maksimaalsed väärtused. Tabelis 5.3 on toodud emiteeritud voolu harmoonikute amplituudväärtused PSCAD mudeli jaoks.

Tabel 5.3 Voolu harmoonikute amplituud väärtused PSCAD mudelis

harmoonik	3	5	7	9	11	13	15	17	19
vool, kA	0,052	0,052	0,052	0,026	0,026	0,026	0,009	0,009	0,009

Vastavalt neile andmetele lisati PSCAD mudelisse harmoonikute vooluallikad mõlemasse sektsiooni. Lihtsustusena: mudelis on mõlemas sektsioonis võrdne koormus ning vooluharmonikute osakaal. Algandmete järgi on sisendite voolu THD umbes 20%.

Nimetatud töös kaaluti 50 kVA võimsusega kondensaatorpatareide paigaldamist NRG maja madalpinge jaotusseade mõlemasse sektsiooni. Antud katses modelleeritakse seda olukorda PSCAD-is, et selgitada välja, kas kondensaatorpatareide paigaldamisel tekib koormuse poolest emiteeritud harmoonikute võimendamine.



Joonis 5.2 NRG õppehoone 0,4 kV jaotla 2020 a. voolu harmoonikute mõõtetulemuste maksimaalsed väärtused.

Valemi 1.7 abil võib välja arvutada teoreetilise resonantsisageduse, kasutades lühisvoolude andmeid ning trafode ja kondensaatorpatareide nimiandmeid.

AJ 784 kõrgepingelattide kolmefaasiline lühisvool on 7 kA. Seega lühistakistus antud punktis on:

$$Z_{6kV} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I_{k,KP}} = \frac{6,6}{\sqrt{3} \cdot 7} \approx 0,54 \Omega.$$

Trafo takistus 6 kV poolel:

$$Z_t = \frac{u_k U^2}{100 S_t} = \frac{4,5 \cdot 6,6^2}{100 \cdot 0,63} \approx 3,11 \Omega.$$

Lühistakistus madalpinge lattidel:

$$Z_{k,MP} = \left(\frac{0,4}{6,6}\right)^2 \cdot (Z_{6kV} + Z_t) = \left(\frac{0,4}{6,6}\right)^2 \cdot (0,54 + 3,11) \approx 0,0134 \Omega.$$

Lühisvõimsus madalpinge lattidel:

$$S_{k,MP} = \frac{0,4^2}{0,0134} \approx 11,9 \text{ MVA}.$$

Resonantsisagedus madalpinge lattidel:

$$f_{res} = 50 \cdot \sqrt{\frac{S_{k,MP}}{S_C}} = 50 \cdot \sqrt{\frac{11,9}{0,05}} \approx 771 \text{ Hz}.$$

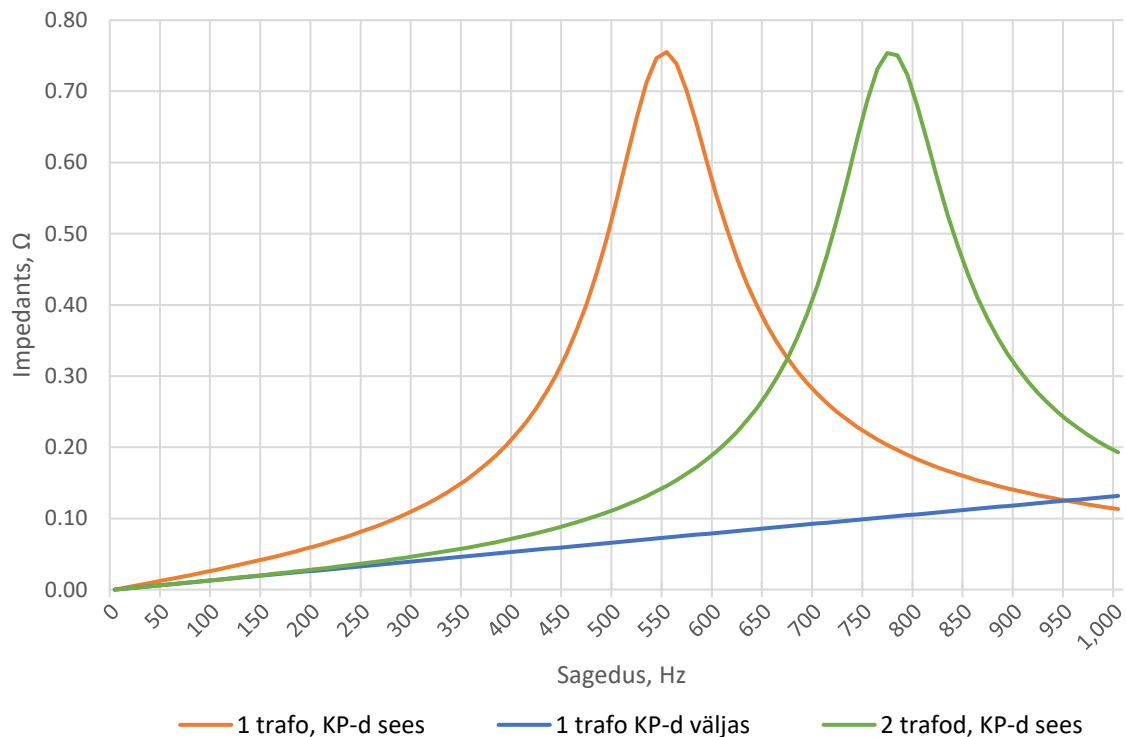
Antud tingimustel on teoreetiline resonantsipunkt 15. ja 16. harmooniku vahel. Juhul, kui hooldus- või parandustööde käigus madalpinge sektsioonid on omavahel ühendatud ning saavad toidet ühest trafost, kondensaatorpatareide võimsus liitub. Resonantsisagedus on sel juhul:

$$f_{res} = 50 \cdot \sqrt{\frac{11,9}{0,1}} \approx 542 \text{ Hz},$$

mis on 11. harmooniku lähedal. Järeldus: on tõenäoline, et simulatsiooni käigus osutub kõige probleemsemaks 11. harmoonik, juhul kui koormus on viidud ühe trafo peale.

## 5.2 Simulatsiooni tulemused

Joonisel 5.3 on näha, et modelleeritud võrgus on resonantsipunktid samad, mis olid saadud lihtsustatud arvutuse tulemusena.



Joonis 5.3 NRG maja madalpinge jaotusseade sageduskarakteristik.

Vaatamata sellele, et 11. vooluharmooniku osakaal oli väike, on see harmooniresonantsi tõttu võimendatud ning madalpinge lattide pinge ja sisendvoolu harmoonmoonutus on suurem kui enne kondensaatorpatareide paigaldamist. Tabelist 5.4 on näha, et kui algtingimustel oli sisendite voolu THD 21%, siis kondensaatorpatareide sisselülitamisel on see 37,48% ning pinge THD on 3,62%. Vaatamata sellele, et sel juhul on resonantsisagedus 15. ja 16. harmooniku vahel, on harmoonikute võimendamine märkimisväärne. Põhjuseks on see, et süsteemi impedants on suur ka resonantsisagedusega lähedastel sagedustel. Nagu on näha joonisel 5.3, on antud juhul kvaliteeditegur  $q$  suhteliselt väike ning resonantsitipp on lame. Impedants 15., 13. ja 11. harmoonikutel on suhteliselt suur ning seega on need harmoonikud võimendatud paralleelresonantsi tagajärjel.

Eelmise katsega võrreldes ei ületa kondensaatorpatareide vool harmoonresonantsil standardis IEC-60871 sätestatud 30% piiri. Põhjuseks võib olla see, et antud katses tekib resonants kõrgematel harmoonikutel, millede tase on tavaliselt väiksem.

Koormuse üleviimisel ühe trafo peale nihkub resonantsisagedus 11. harmooniku poole. Nagu näha tabelist 5.4, on pinge mittelineaarhoonutus sel juhul 7,76%, mis on standardis EVS-EN 50160 sätestatud 8% piirile lähedal, kuid ei ületa seda.

Tabel 5.4 Harmoonhoonutuse näitajad NRG maja madalpinge jaotusseadmes.

	<b>2 trafod, KP-d sees</b>	<b>1 trafo, KP-d sees</b>	<b>1 trafo, KP-d väljas</b>
<b>THD<sub>U</sub>, %</b>	3,62	7,76	2,97
<b>THD<sub>I</sub> KP, %</b>	48,64	83,26	-
<b>THD<sub>I</sub> sisend, %</b>	37,48	46,58	21,04
<b>I<sub>KP</sub>, A</b>	76	84	0
<b>I<sub>KP</sub>/I<sub>KP</sub>, nimi</b>	1,06	1,17	0
<b>U<sub>KP</sub>, V</b>	230	231	230

Sisendvoolu mittelineaarhoonutus on 46,58%. Suur koormusvoolu harmoonhoonutus kandub üle toitvasse jaotusvõrku ning võib põhjustada pinge mittelineaarhoonutuse suurenemist piirkonna alajaamas. Seetõttu juhul, kui paigaldatakse nimetatud nimivõimsusega kondensaatorpatareid, võib tekkida vajadus harmoonhoonutuse piiramiseks, et vältida võimalikke probleeme jaotusvõrguteenust pakkuva ettevõttega.

### 5.3 Lahenduse ettepanek

Resonantsipunkti nihutamiseks võib kasutada lahkähälestusreaktorit. Reaktori reaktiivtakistust on võimalik arvutada kondensaatorpatarei nimiandmete järgi. Kondensaatorpatarei impedants võrgusagedusel on:

$$X_{c,KP1} = \frac{U^2}{S_c} = \frac{0,4^2}{0,05} \approx 3,2 \Omega.$$

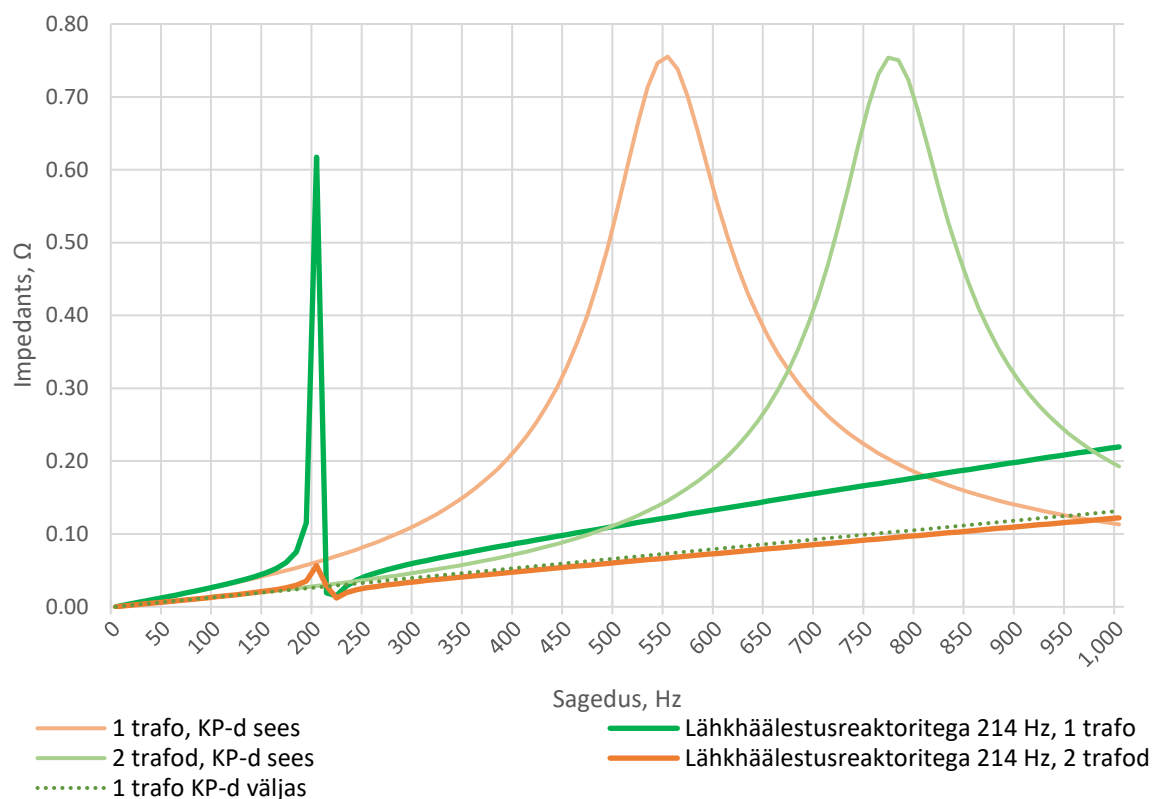
214 Hz reaktori puhul  $h$  on 4,28. Reaktori induktiiv takistus:

$$X_{L,KP1} = \frac{X_c}{h^2} = \frac{3,2}{4,28^2} \approx 0,17 \Omega$$

Reaktori induktiivsus:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{0,17}{2\pi \cdot 50} \approx 0,5 \text{ mH}.$$

Joonisel 5.4 on näidatud 214 Hz lahkähälestusreaktorite mõju sageduskarakteristikule juhul, kui sees on üks või kaks trafod.



Joonis 5.4 Lahkhäälestusreaktorite mõju sagedusarakteristikule.

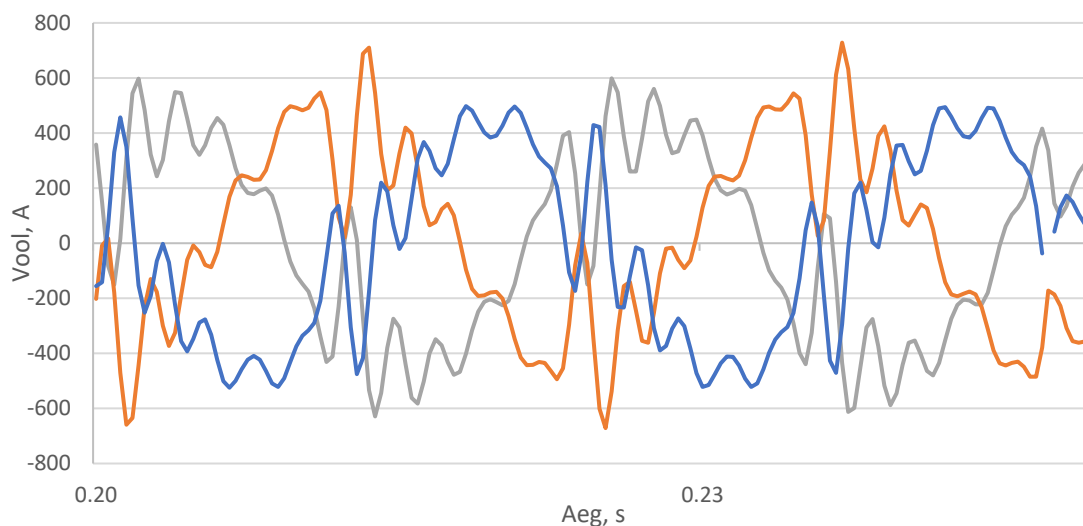
Nagu näha, on resonantssagedus nihutatud 4. harmooniku poole. Kuna paarisarvuliste harmoonikute tase elektrisüsteemides on tavaliselt madal, siis resonantsi tekkimise tõenäosus sellel sagedusel on suhteliselt väike.

Tabel 5.5 Lahkhäälestusreaktorite mõju harmoonmoonutuse näitajatele.

	<b>Ilma</b>	<b>Lahkhäälestusreaktoritega, 214 Hz</b>
<b>THD<sub>U</sub>, %</b>	7,76	2,46
<b>THD<sub>I</sub> KP, %</b>	83,26	83,26
<b>THD<sub>I</sub> sisend, %</b>	46,58	20,67
<b>I KP, A</b>	84	84
<b>I<sub>KP</sub>/I<sub>KP, nimi</sub></b>	1,17	1,17
<b>U<sub>KP</sub>, kV</b>	231	244

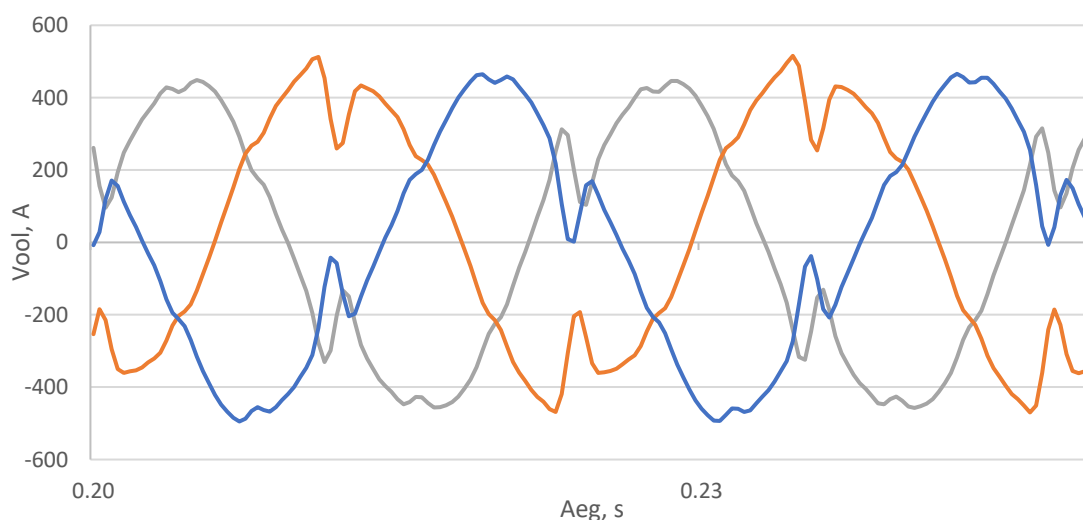
Tabelist 5.5 on näha, et lahkhäälestusreaktorite paigaldamine vähendab pingeline mittelineaarhoonutuse 2,46%-ni. Sisendvoolu mittelineaarhoonutus on 20,67%, mis on praktiliselt võrdeline koormuse mittelineaarhoonutusega ehk on sama mis juhul, kui kondensaatorpatareid puudusid. Nagu on näha joonisel 5.4, muutub lahkhäälestusreaktori paigaldamisel sagedusarakteristik samaks, mis oli kondensaatorpatareide puudumisel, välja arvatud reaktori resonantsisagedusel. Seega ei talitle see kõrgemate harmoonikute filtrina ning harmoonmoonutuse tase jääb samaks ja reaktor ainult ennetab harmoonikute võimendamist paralleelresonantsi tõttu.

Joonisel 5.5 on toodud sisendvoolu ostsiogramm lahkäälestusreaktorite puudumisel. Joonisel 5.6 on näha, et lahkäälestusreaktorid parandasid sisendvoolu siinuse kuju, kuid harmoonmoonutus jääb märkimisväärseks. Harmoonikute paremaks filtreerimiseks võib kasutada passiivset C-tüüpi või aktiivset filtrit.



Joonis 5.5 Sisendvool harmoonresonantsil.

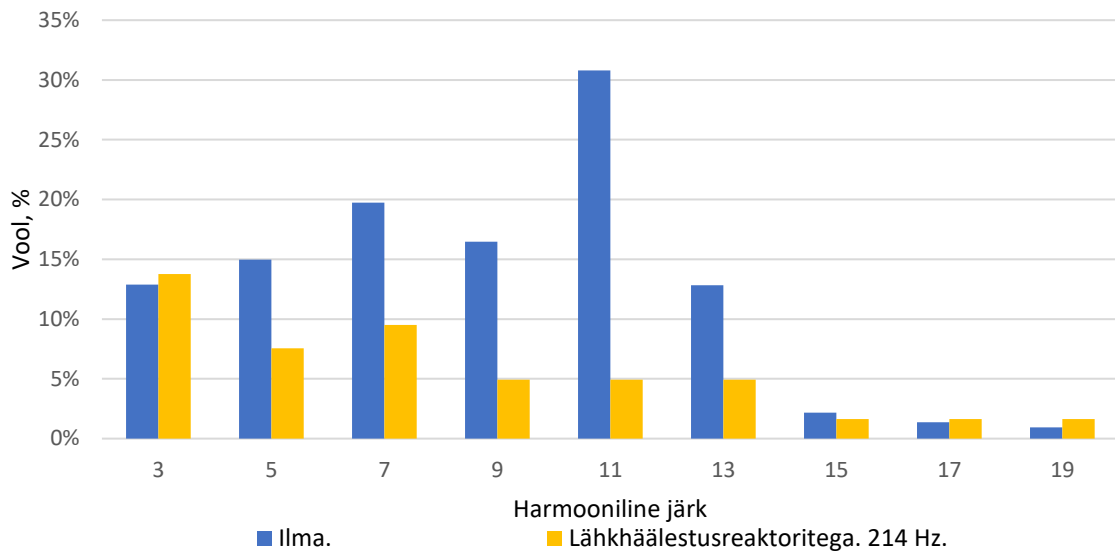
Joonisel 5.7 on näha, et arvutuste põhjal tehtud järeldused olid õiged ning kõige rohkem on võimendatud 11. harmoonik, vaatamata sellele, et see pole koormusvoolus kõige suurema osakaaluga.



Joonis 5.6 Sisendvool lahkäälestusreaktoriga.

Harmoonmoonutus on suurem madalpingevõrkudes, kuna siin esitavad nõuded on kõige madalamad ning ka selle tõttu, et siin esinevad kolmeka jagatavad harmoonikud – 3, 9, 15 jne. Nagu on näha joonisel 5.7, on koormusvoolu kolmanda harmooniku tase

kõige suurem juhul, kui kondensaatorpatareidega on ühendatud lahkäälestusreaktorid, kuid pinge mittelineaar moonutus on sel juhul normide piires ning 214 Hz lahkäälestusreaktorite kasutamine on õigustatud.



Joonis 5.7 Lahkhäälestusreaktori mõju sisendvoolu harmoonikutele.

## KOKKUVÕTE

Töö käigus selgitati välja harmoonresonantsi tekkimisega seotud tegurid ja seosed simulatsioonide abil PSCAD tarkvaras. Teoreetilises käsitluses leitud seaduspärasused selgitasid suures osas simulatsioonide käigus vaadeldud nähtusi. Tegelike elektrivõrkude andmete kasutamine võimaldas saada tulemusi, mis on kooskõlas elektrisüsteemides tegelikkudes toimivate protsessidega.

Olenemata võrgu topoloogiast või pingeklassist on kõige tähtsamateks teguriteks, mis mõjutavad sõlme resonantsisagedust ning seega ka mittelineaarmoonutuse tugevust, sõlme lühisvõimsus ning sõlmega ühendatud kondensaatorpatareide summaarne mahtuvus.

Analüüsi käigus selgus, et piirkonna alajaamade sageduskarakteristik ülempingepoolel sõltub olulisel määral ülekandevõrgu elementide sees- või väljasolekust, sealhulgas ka teistes alajaamades. Kõige suuremat mõju avaldab sõlmega ühendatud toitvate liinide arv, kuna sellega suureneb lühisvõimsus alajaama lattidel. Samuti sõltub sageduskarakteristik vaadeldavas sõlmes kondensaatorpatareide lülitamisest teistes alajaamades. Sel põhjusel on resonantsisageduse väljaselgitamine ülekandevõrgus eriti keeruline ning nõuab uuritava võrgu detailse mudeli loomist.

Kuna mittelineaarmoonutus ülekandevõrgu tasemel on tavaliselt väiksem kui jaotusvõrkudes, on liigvoolukaitse vale toimimine või kondensaatorpatareide ülekoormamine harmoonresonantsil vähetõenäoline. Vaatamata sellele on harmoonresonantsi tekkimise vältimine ülekandevõrkudes väga oluline, kuna siin on mittelineaarmoonutuse nõuded kõige rangemad ning mõjutatud tarbijate arv on suur.

Juhul, kui kondensaatorpatareid on piirkonnaalajaama alampingepoolel, väheneb sageduskarakteristiku sõltuvus ülempingepoolses võrgus toimuvatest protsessidest oluliselt, kuna otsustavaks muutujaks on siin jaotustrafa takistus. Resonantsisagedust saab usaldusväärselt leida lihtsa arvutuse abil. Siiski tuleb pöörata tähelepanu sellele, et kondensaatorpatareisid võib olla rohkem kui üks ning neil võib olla mitu astet. Samuti muutub sõlme lühisvõimsus olenevalt trafode paralleeltööst ehk sektsioneeriva võimsuslülitist sees- või väljasolekust. Analüüsi teostamisel harmoonresonantsi seisukohast tuleb arvestada kõiki võimalikke kombinatsioone, kuna sellest sõltub sõlme sageduskarakteristik.

Kuna mittelineaarmoonutus jaotusvõrgu tasemel on tavaliselt suurem, võib harmoonresonants viia releekaitse vale toimimiseni ning halvemal juhul kondensaatorpatarei riknemiseni.



Sarnane olukord on ka tarbijate madalpinge-elektripaigaldistes. Siin on lühisvõimsuse peamiseks määravaks teguriks samuti trafode takistus. Resonantsisagedust mõjutab trafode paralleeltöösse lülitamine või koormuse üleviimine ühe trafo peale ning kondensaatorpatareide summaarne reaktiivvõimsus.

Kuna madalpinge elektripaigaldistes võib koormusvoolu harmoonmoonutus olla suur, siis võivad harmoonresonantsi tagajärjed olla eriti kahjulikud. Olukorda raskendab ka kolmega jagatavate harmoonikute olemasolu, mis suurendavad pinget ja voolu mittelineaarmoonutusi ning tekitavad rohkem sagedusi, millel võib esineda resonants.

Harmoonresonantsi vältimiseks on kõige otstarbekam lahkäälestusreaktorite paigaldamine. Lahkhäälestatud filtrid muudavad sõlme sageduskarakteristikut ning vähendavad võrgu impedantsi ka filtri omasagedusest erinevatel sagedustel. Näiteks viimases katses ennetas lahkäälestatud filter omasagedusega 214 Hz resonantsi tekkimise sagedusel 550 Hz. Seega võib lahkäälestusreaktori olemasolu ennetada harmoonresonantsi tekkimist suhteliselt laia sagedusvahemiku piires. Lahkhäälestusreaktori induktiivsuse täpse valikuga saab optimeerida sageduskarakteristikut ning viia harmoonresonantsi tekkimise tõenäosuse miinimumini. Mida rohkem resonantsisagedus erineb filtri enda sagedusest, seda vähem mõju filter avaldab. Samuti peab pöörama tähelepanu sellele, et lahkäälestatud filtri olemasolu võib küll nihutada resonantsisagedust, kuid mitte täielikult elimineerida resonantsi tekkimise tõenäosust.

Vaatamata sellele, et võrgu lühisvoolude andmete ning kondensaatorpatareide nimiaandmete alusel saab resonantsisagedust arvutada, on harmoonikute võimendamise hindamiseks tarvis elektrisüsteemide simuleerimise tarkvara. Resonantsisageduse alusel pole võimalik hinnata harmoonresonantsi tagajärgede tõsidust, kuna see nõuab paljude tegurite arvestamist.

Katsete käigus näitas autor, et mittelineaarmoonutus, mis on standardites määratud piires, võib olla harmoonresonantsi tagajärjel võimendatud ja ületada lubatud taseme. Järelduseks on, et mittelineaarmoonutuse ja üksikute harmoonikute taseme hoidmine lubatud piirides ei pruugi olla piisav. Märkimisväärse harmoonmoonutuse esinemisel on võrguettevõtetele ja ettevõtetele, kus on paigaldatud kondensaatorpatareid, soovitatud kaaluda passiiv- või aktiivfiltrite paigaldamist või rakendada meetmeid harmoonmoonutuse vähendamiseks ning võtta kasutusele valdkonna standarditest rangemad eeskirjad. Lisameetmetega seotud kulud võivad olla väiksemad kui seadmete harmoonresonantsist tingitud kahjustustest või teiste elektrivõrguga liitunud füüsiliste või juriidiliste isikute pretensioonidest põhjustatud kulud.

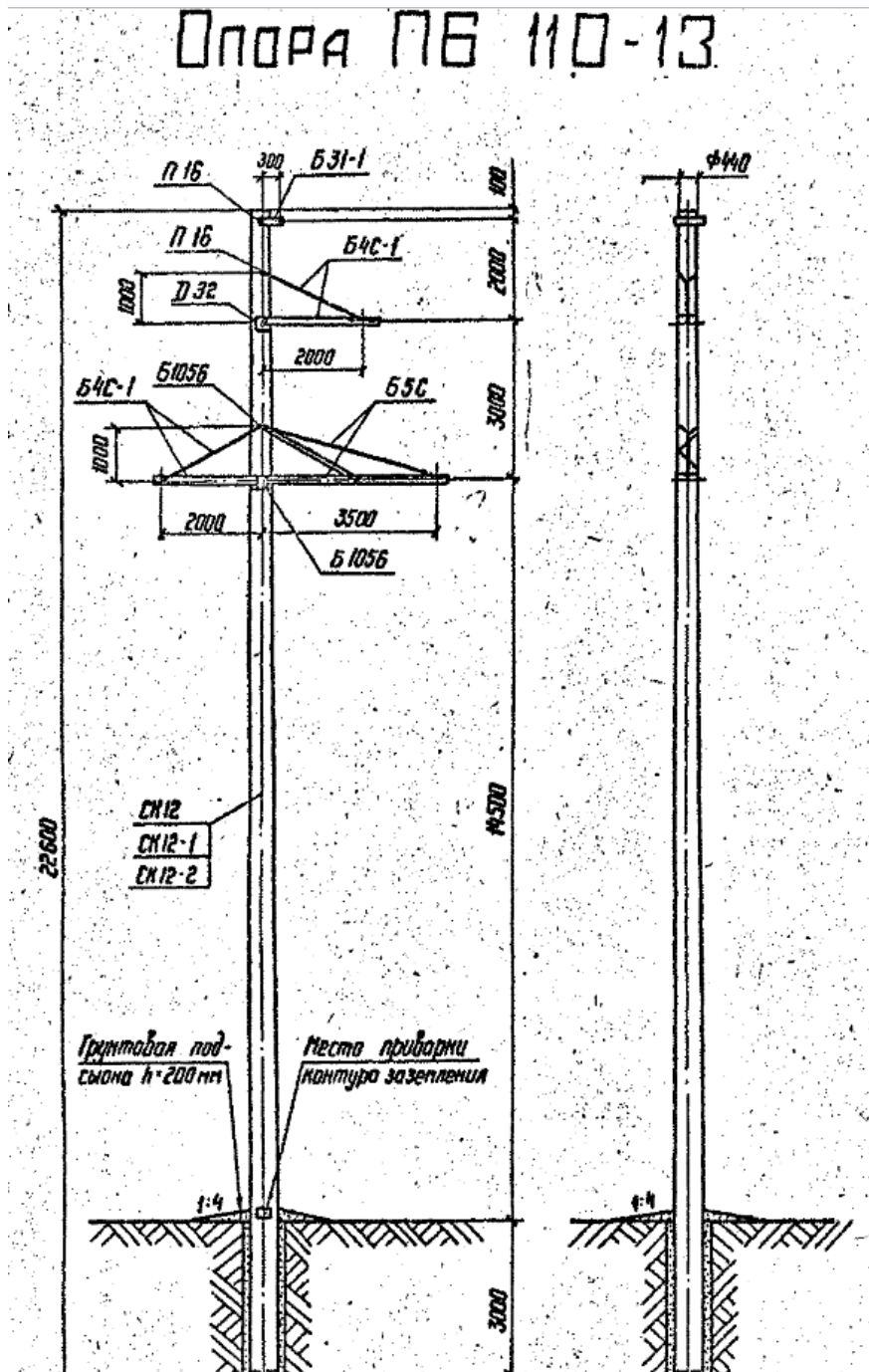
Lõputöö peamised järeldused:

- resonantsisagedus sõltub peamiselt lühisvõimsusest ja kondensaatorpatareide nimivõimsusest
- ülekandevõrgus harmoonresonantsist tulenev releekaitse rakendumine või seadmete vigastus on vähetõenäoline
- jaotusvõrgus on võimalik harmoonresonantsist tulenev releekaitse rakendumine või seadmete vigastus
- ülekandevõrgus sageduskarakteristik sõltub paljudest teguritest ning resonantsisageduse arvutamine on raskendatud
- jaotusvõrgus resonantsisagedus sõltub peamiselt jaotustrafo reaktiivtakistusest ja paigaldatud kondensaatorpatareide nimivõimsusest ning seda saab usaldusväärset arvutada
- resonantsisageduse arvutamine ei võimalda piisavalt hinnata harmoonresonantsi mõju ning analüüsiks on soovitatav elektrivõrkude modelleerimis tarkvara kasutus
- standardides sätestatud piiride tagamine ei ole piisav juhul kui esineb harmoonresonantsi tekkimise oht
- lahkäälestusreaktorid võimaldavad ennetada harmoonresonantsi laias sagedusvahemikkus
- lahkäälestusreaktori lisamine võib elimineerida ühe resonantsi kohta kuid tekitada uue teisel sagedusel

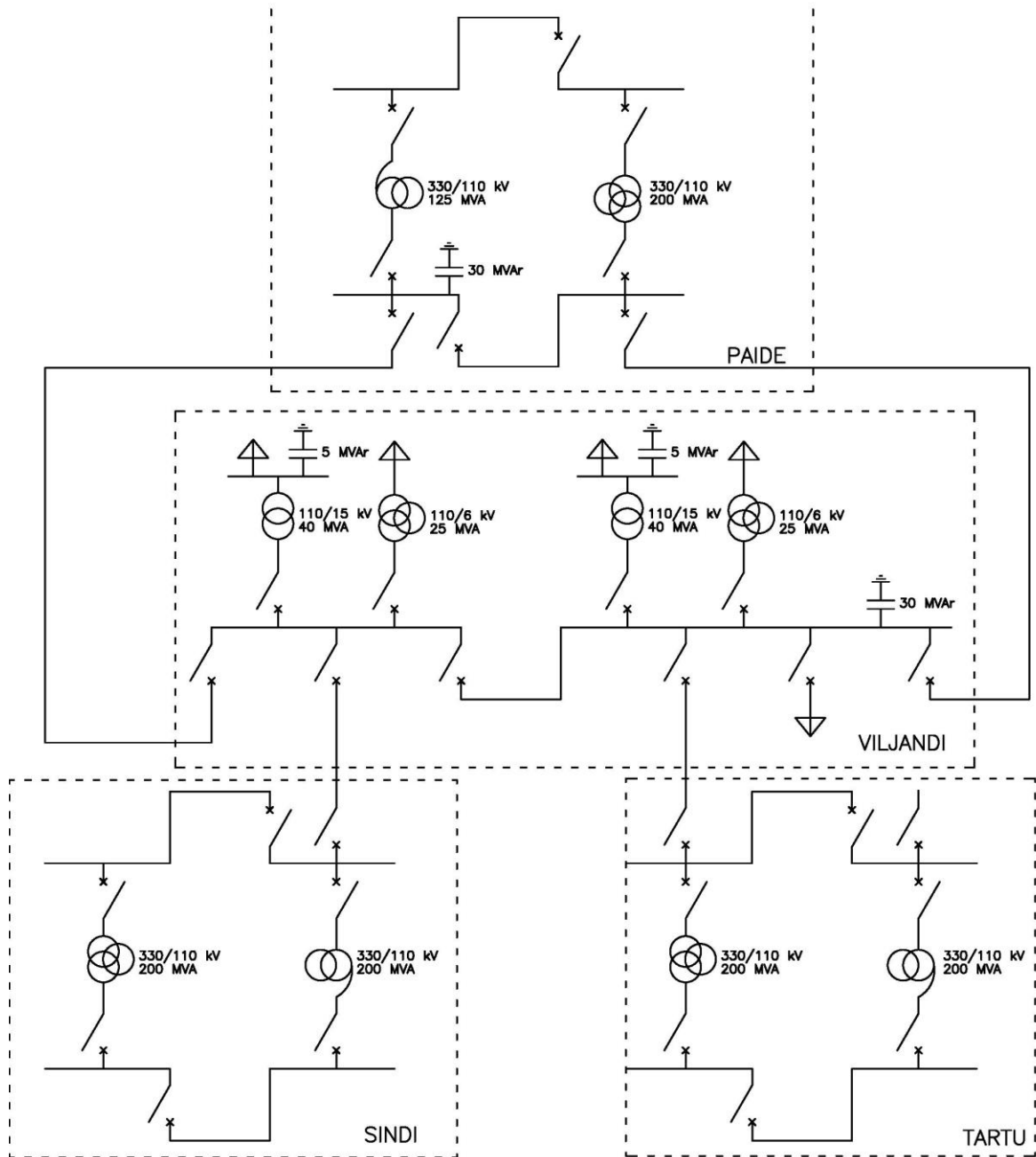
## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] D. Hart, Power Electronics, New York: McGraw Hill, 2010.
- [2] R. Pinyol, Harmonics: Causes effects and minimization, Salicru: Salicru White Papers, 2015.
- [3] J. Kilter, M. Meldorf, H. Tammoja ja Ü. Treufeldt, Jaotusvõrgud, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2007.
- [4] S. Santoso, M. McGranaghan ja R. Dugan, Standard handbook for electrical engineers, New York: McGraw Hill, 2006.
- [5] Circutor, Detuned and harmonic filtering banks, Barcelona, 2005, pp. 16-19.
- [6] D. Carnovale, „Power Factor Correction and Harmonic Resonance: A Volatile Mix,“ *EC&M*, kd. 102, pp. 16-19, 2003.
- [7] K. Kaiser, Electromagnetic Compatibility Handbook, Boca Raton: CRC Press, 2004.
- [8] T. Vinnal, Eesti ettevõtete elektritarbimise uurimine ja soovitude väljatöötamine tarbimise optimeerimiseks, Tallinn, 2011.
- [9] J. Sun, „Modeling and Analysis of Harmonic Resonance Involving Renewable Energy Sources,“ *Energy Conversion and Economics*, kd. 3, nr 5, pp. 333-344, 2012.
- [10] Eesti Standardikeskus, EVS-EN 50160:2023 Avalike elektrivõrkude pingetunnussuurused, Tallinn, 2023.
- [11] Eesti Standardikeskus, EVS-EN IEC 61000-3-2:2019/A1:2021 Elektromagnetiline ühilduvus. Osa 3-2: Piirväärtused. Vooluharmonooniliste emissiooni lubatavad piirväärtused (seadmetel sisendvooluga kuni 16 A faasi kohta), Tallinn, 2021.
- [12] IEC TR 61000-3-6:2008 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-6: Limits - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems, Eesti Standardikeskus, 2008.
- [13] IEEE, IEEE 519-2022 IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems, 2022.
- [14] F. Oy, Power quality in Fingrid's 110 kV grid, Helsinki, 2015.

- [15] A. Lange ja G. Redlarski, „Selection of C-Type Filters for Reactive Power Compensation and Filtration of Higher Harmonics Injected into the Transmission System by Arc Furnaces,” *Energies*, kd. 13, nr 9, p. 2330, 2020.
- [16] Prysmian Group, Jõukaablid, Milan, 2021.
- [17] Elering AS, 701 Projekteerimine, Tallinn, 2019.
- [18] Nexans, AXLJ TT 52 kV, Paris, 2023.
- [19] A. Bonnet ja R. Boteler, „The Impact That Voltage Variations Have on AC Induction Motor Performance,” *Conference Record of 1999 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*, pp. 16-26, 1999.
- [20] R. Pavelek ja L. Saenko, „Влияние тяговых нагрузок на системы электроснабжения,” *Электрификация транспорта*, kd. 8, pp. 49-55, 2014.
- [21] R. Klempka, „A New Method for the C-Type Passive Filter Design,” *Przegląd Elektrotechniczny*, pp. 277-281, 2012.
- [22] Vishay, High Voltage AC Power Capacitors, Malvern, 2023.
- [23] IEC 60871-1:2014 Shunt capacitors for a.c. power systems having a rated voltage above 1 000 V - Part 1: General, Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2014.
- [24] Hans von Mangoldt GmbH, Iron-core reactors for detuning power capacitors in medium and low voltage network, Aachen.
- [25] A. Mesilane, Taltech NRG õppehoone elektri kvaliteedi ja reaktiivenergia kompenseerimise vajaduse analüüs, Tallinn, 2020.



## Lisa 2. Modelleeritava ülekandevõrgu skeem



### Lisa 3. Ülekandevõrgu mudeli parameetrid

Tabel L3.1 Modelleeritava ülekandevõrgu liinide pikkused.

Liin	pikkus, km
Viljandi-Tartu	75
Paide-Tartu	175
Paide-Sindi	75
Viljandi-Sindi	80
Viljandi-Paide	65

Tabel L3.2 Ülekandeliinide mastide ja juhtmete PSCAD parameetrid.

parameeter	väärtus
traatide arv, tk	33
välistraatide arv, tk	17
rippe, m	6
traatide läbimõõt, m	0,109
faasijuhtme läbimõõt, m	0,00172
faasijuhtme alalisvoolutakistus, $\Omega/\text{km}$	0,12
juhe 1 - X koordinaat, m	-2
juhe 1 - Y koordinaat, m	13,5
juhe 2 - X koordinaat, m	3,5
juhe 2 - Y koordinaat, m	13,5
juhe 3 - X koordinaat, m	2
juhe 3 - Y koordinaat, m	16,5
piksekaitsetrossi läbimõõt, m	0,0055
piksekaitsetrossi alalisvoolutakistus, $\Omega/\text{km}$	2,86
piksekaitsetrossi - X koordinaat, m	0
piksekaitsetrossi - Y koordinaat, m	16,5

Tabel L3.3 Trafode ja autotrafode PSCAD parameetrid.

seade	nimipinge, kV	nimivõimsus, MVA	lühispinge, s.ü.	lühisvõimsus, s.ü.	tühijooksuvõimsus, s.ü.
Viljandi trafo 1	115/38,5/6,6	25	0,1	0,0046	0,00062
Viljandi trafo 2	115/38,5/6,6	25	0,1	0,0046	0,00062
Viljandi trafo 3	115/16,5	40	0,12	0,00425	0,0005875
Viljandi trafo 4	115/16,5	40	0,12	0,00425	0,0005875
Tartu autotrafo 1	330/115	200	0,097	0,002	0,00025
Tartu autotrafo 2	330/115	200	0,098	0,002	0,00025
Sindi trafo	347/117,5/21	200	0,14	0,002	0,00025
Sindi autotrafo	347/117,5	200	0,097	0,002	0,00025
Paide trafo	330/115/21	200	0,1427	0,002	0,00025
Paide autotrafo	330/115	125	0,0948	0,0025	0,0003

Tabel L3.4 Voolu harmoonikute amplituud väärtused PSCAD mudelis

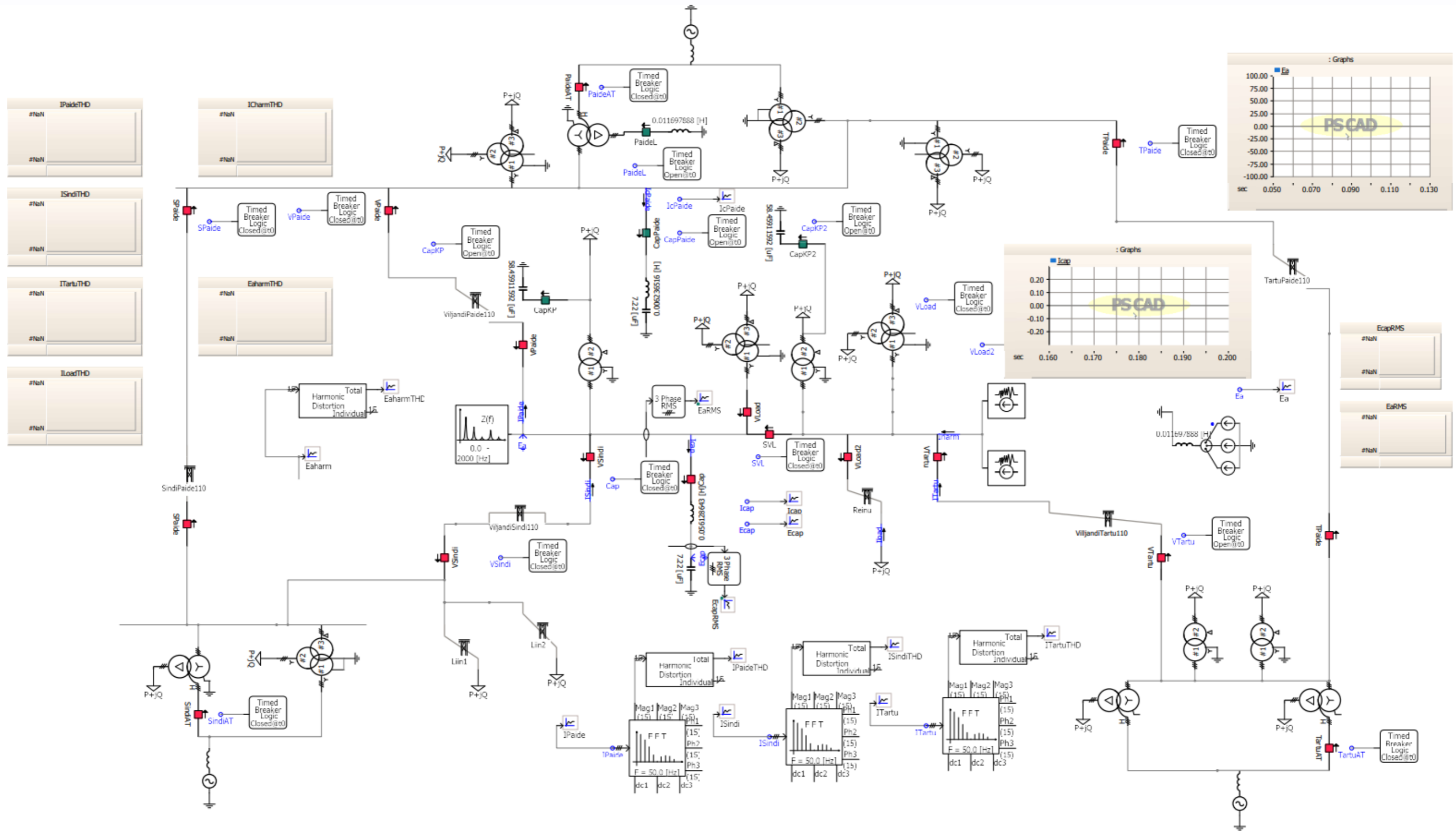
<b>harmoonik</b>	3	5	7	9	11	13	15	17	19
<b>vool, kA</b>	0	0,014	0,014	0	0,007	0,07	0	0	0

Tabel L3.5 Ülekande võrgu koormuse parameetrid PSCAD mudelis

<b>Sektsioon/Liin/KP</b>	<b>aktiivvõimsus, MW</b>	<b>reaktiivvõimsus, MVar</b>
Viljandi 6 kV 1	12,50	6,05
Viljandi 6 kV 2	12,50	6,05
Viljandi 15 kV 1	20	9,69
Viljandi 15 kV 2	20	9,69
Viljandi-Reinu Liin	20	9,69
Viljandi 15 kV KP 1	0	2,50
Viljandi 15 kV KP 2	0	2,50
Viljandi 110 kV KP	0	30
Paide 110 kV KP	0	30
Paide 6 kV 1	20	9,69
Paide 6 kV 2	20	9,69
Tartu 10 kV 1	20	9,69
Tartu 10 kV 2	20	9,69

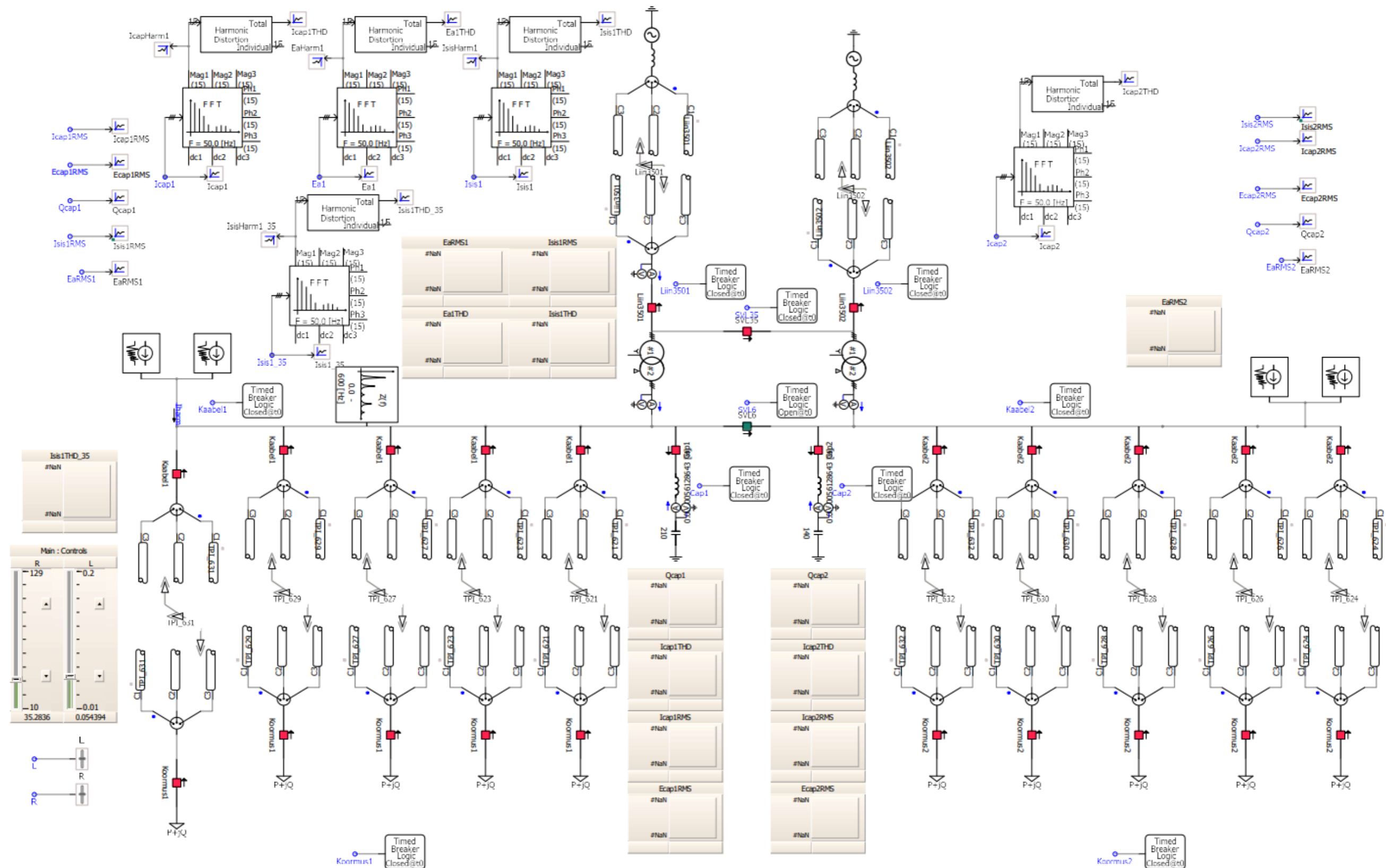


Lisa 4. Ülekandevõrgu PSCAD mudel



Lisa 5. 110 kV alajaama mittelineaarmoonutuse sõltuvus erinevate võrgu elementide väljalülitamisest

resonantssagedus THD <sub>U</sub> THD <sub>I</sub> toitvas liinis THD <sub>I</sub> KP	kõik sees	Tartu-Paide	Sindi-Paide	Sindi AT	Tartu AT	Paide AT	Viljandi trafo	Viljandi tarbija liin	Viljandi SVL	Viljandi- Sindi	Viljandi- Tartu	Viljandi- Paide
<b>Viljandi 15KP väljas (110 sees)</b>	290 Hz 1,62 % 4,46 % 11,88 %	290 Hz 1,61 % 4,47 % 11,94 %	290 Hz 1,62 % 4,43 % 11,9 %	285 Hz 1,79 % 5,05 % 12,44 %	280 Hz 1,72 % 5,56 % 12,18 %	285 Hz 1,77 % 4,49 % 12,37 %	290 Hz 1,68 % 5,72 % 12,01 %	280 Hz 1,68 % 6,5 % 12,1 %	240 Hz 2,27 % 11,83 % 13,11 %	260 Hz 4,39 % 8,95 % 25,48 %	255 Hz 4,76 % 8,86 % 27,46 %	250 Hz 4,56 % 8,6 % 26,36 %
<b>Viljandi 15KP1 (110 sees)</b>	270 Hz 2,12 % 6,36 % 13,63 %	270 Hz 2,08 % 6,32 % 13,51 %	270 Hz 2,11 % 6,3 % 13,6 %	265 Hz 2,55 % 7,55 % 15,73 %	265 Hz 2,52 % 7,55 % 15,73 %	265 Hz 2,55 % 7,55 % 15,73 %	290 Hz 1,68 % 5,72 % 12,01 %	280 Hz 1,68 % 6,5 % 12,1 %	240 Hz 1,0 % 7,1 % 6,44 %	240 Hz 3,09 % 6,36 % 18,42 %	240 Hz 2,71 % 5,06 % 16,47 %	235 Hz 2,46 % 4,64 % 15,16 %
<b>Viljandi 15KP2 (110 sees)</b>	260 Hz 3,04 % 9,35 % 18,46 %	260 Hz 3,00 % 9,35 % 18,32 %	260 Hz 3,01 % 9,3 % 18,43 %	250 Hz 3,33 % 9,75 % 19,8 %	250 Hz 3,23 % 11,55 % 19,47 %	250 Hz 3,28 % 12,25 % 21,43 %	280 Hz 1,98 % 6,73 % 13,12 %	255 Hz 3,42 % 14,64 % 20,4 %	240 Hz 1,08 % 7,31 % 6,94 %	230 Hz 1,78 % 3,66 % 12,19 %	220 Hz 1,62 % 3,00 % 11,46 %	220 Hz 1,52 % 2,82 % 10,96 %
<b>Paide 110KP sees (viljandi kõik sees)</b>	250 Hz 3,27 % 10,34 % 19,78 %	250 Hz 3,23 % 11,55 % 19,47 %	250 Hz 3,54 % 10,02 % 20,23 %	250 Hz 3,68 % 12,25 % 21,43 %	245 Hz 3,13 % 9,67 % 18,87 %	245 Hz 3,12 % 9,53 % 18,49 %	260 Hz 2,52 % 7,55 % 15,73 %	260 Hz 2,55 % 7,55 % 15,73 %	220 Hz 0,84 % 6,54 % 5,57 %	220 Hz 1,56 % 3,25 % 11,29 %	220 Hz 1,51 % 3,22 % 11,18 %	220 Hz 1,5 % 2,8 % 10,78 %
<b>Viljandi 110KP väljas</b>	660 Hz 6,01 % 2,06 % -	790 Hz 1,09 % 2,23 % -	650 Hz 6,89 % 2,19 % -	655 Hz 6,56 % 4,21 % -	650 Hz 6,67 % 4,31 % -	655 Hz 6,6 % 4,1 % -	660 Hz 6,05 % 2,07 % -	660 Hz 6,03 % 2,01 % -	660 Hz 3,23 % 3,13 % -	650 Hz 6,70 % 2,05 % -	660 Hz 6,31 % 2,15 % -	655 Hz 5,79 % 2,07 % -



## Lisa 7. 35/6 kV alajaama mudeli parameetrid

Tabel L7.1 Maakaablite parameetrid

	6 kV liinid	35 kV liinid
voolujuhitava osa raadius, m	0,009	0,075
isolatsiooni välisraadius, m	0,0146	0,016
ekraani välisraadius, m	0,021	0,018
kesta välisraadius, m	0,0445	0,023
voolujuhitava osa materjal	alumiinium	alumiinium
isolatsiooni materjal	XLPE	XLPE
ekraani alalisvoolu takistus, $\Omega/\text{km}$	0,265	0,6
kesta materjal	PE	PE
sügavus pinnas, m	1	1
pikkus, km	3	4,5

Tabel L7.2 Trafode nimiandmed

seade	nimipinge, kV	Nimi-võimsus, MVA	Lühis-pinge, s.ü.	Lühis-võimsus, s.ü.	Tühijooksu-võimsus, s.ü.
trafo 1	38,5/6,6	10	0,1	0,0115	0,00155
trafo 2	38,5/6,6	10	0,1	0,0115	0,00155

Tabel L7.3 Väljuvate liinide koormused

Kaabli number	aktiivvõimsus, MW	reaktiivvõimsus, MVAr
631	0,34	0,17
629	0,91	0,44
627	0,91	0,44
625	0,57	0,28
623	0,91	0,44
621	0,34	0,17
630	0,34	0,17
628	0,91	0,44
626	0,91	0,44
624	0,57	0,28
622	0,91	0,44
620	0,34	0,17
KP1	0	2,88
KP2	0	1,9

Tabel L7.4 Voolu harmoonikute amplituud väärtused PSCAD mudelis

harmoonik	3	5	7	9	11	13	15	17	19
vool, kA	0	0,014	0,014	0	0,007	0,07	0	0	0