



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**PINGELOHKUDE MÕJU VÄHENDAMINE
PINGESTABILISAATORI TOEL
TÖÖSTUSETTEVÕTTE MADALPINGEVÕRGUS**

**REDUCING VOLTAGE SAGS IN INDUSTRIAL LOW
VOLTAGE NETWORK USING A VOLTAGE STABILIZER**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Risto Matt

Üliõpilaskood 202684TAF

Juhendaja: Toomas Vinnal

Tallinn 2021

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

"25" mai 2021

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"25 " mai 2021

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Risto Matt

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose pingelohkude mõju vähendamise pingestabilisaatori toel tööstusettevõtte madalpingevõrgus, mille juhendaja on Toomas Vinnal,

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

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

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

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

05.12.2021 (*kuupäev*)

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

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Risto Matt

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Pingelohkude mõju vähendamine pingestabilisaatori toel tööstusettevõtte madalpingevõrgus

Kuupäev:
24.04.2021

46 lk (*lõputöö lehekülgede arv koos lisadega*)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): Toomas vinnal

Töö konsultant (konsultandid):

Sisu kirjeldus:

Käesoleva lõputöö eesmärgiks on pakkuda ettevõtte madalpingevõrgus esinevate pingelohkude vähendamisele üheks võimalikuks lahendiks pingestabilisaatorit. Töö käigus on uuritud ja kogutud andmeid ühe tootmiseettevõttes esinevate pingelohkude kohta, samuti teostatud võrgumõõtmised madalpingevõrgus.

Lisaks tutvustatakse võrgunõudeid madalpingevõrgus, ning pingestabilisaatorit ja tema sobivust süsteemi lähtudes kogutud andmetest. Lõpptulemusena tuuakse välja seadme nii majanduslik kui ka tehniline sobivus.

ABSTRACT

Author: Risto Matt

Type of the work: Bachelor

Title: Reducing voltage sags in industrial LV network using voltage stabilizer

Date: 24.04.2021

46 pages (the number of thesis pages including appendices)

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor(s) of the thesis: Toomas Vinnal

Consultant(s):

Abstract:

The purpose of this thesis is to offer voltage stabilizer as one possible solution to reduce voltage sags in factory's low-voltage network. Measurement data has been gathered from low-voltage side through measurements in factory and also information from the grid side for longer period to study voltage sags occurrences. In addition the network requirements in the low voltage network are introduced, as well as the voltage stabilizer and its suitability based on the collected data. As a result, both the economic and technical suitability of the device is showed.

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Pingelohkude mõju vähendamine pingestabilisaatori toel tööstusettevõtte madalpingevõrgus
Lõputöö teema inglise keeles:	Reducing voltage sags in industrial LV network using a voltage stabilizer
Üliõpilane:	Risto Matt, 202684TAF
Eriala:	Elektrotehnika
Lõputöö liik:	bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	Toomas Vinnal
Lõputöö kaasjuhendaja: (ettevõtte, amet ja kontakt)	
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	15. aprill 2021
Lõputöö esitamise tähtaeg:	15. mai 2021

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Tänapäeval kasutatakse tööstusettevõtetes palju elektroonikal põhinevaid tootmisseadmeid, mis on tundlikud pingelohkudele. Pingelohud elektrivõrgus võivad tekitada olulist majanduslikku kahju tootmisele. Antud töö keskendub ühe sellise probleemolukorra lahendamisele kasutades pingestabilisaatorit.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärk on tuvastada pingelohkude probleemi ulatus ühes tööstusettevõttes, uurida seda reaalses madalpingevõrgus ning pakkuda ühe võimaliku lahendusena pingestabilisaatorit, näidates ära nii majanduslikud kui ka tehnilised probleemid.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Pingestabilisaatori tööpõhimõtte ja parameetrite uurimine kasutades kirjandust,
- Võrguettevõtte poolt edastatud pingehälbed ühe tööstusettevõtte kohta,
- Antud ettevõtte võrgupinge mõõtmistest saadud info analüüsimine,
- Majandusliku tasuvuse arvutused.

4. Lähteandmed

- Andmed võrguettevõtte poolt,
- Andmed, mis on saadud võrgumõõtmistest objektil,
- Erialane kirjandus, seadme kasutusjuhend,
- Tootjapoolne informatsioon, kasutuskoigemused teistelt objektidelt.

5. Uurimismeetodid

Teoreetiline taust saadakse kirjandusest, pikemaajaline informatsioon probleemist saadakse võrguettevõtjalt. Seadme tehniline valik teostatakse läbi vaatluse näidisobjektil ja läbi võrgumõõtmiste ning kooskõlastatakse tootjaga.

6. Graafiline osa

Pikemaajalisem info pingelohkudest esitatakse tabelina ja valim võrgumõõtmisi graafiliselt.

7. Töö struktuur

- Sissejuhatus,
- Pingehälvetest tulenevad probleemid,
- Olukorra ja mõõtmistulemuste analüüs,
- Lahendus/seade,
- Modelleerimine,
- Majanduslikud arvutused,
- Kokkuvõte.

8. Kasutatud kirjanduse allikad

- Internet,
- Artiklid pingestabilisaatori kohta,
- Tootja informatsioon,
- Aruanded/mõõteprotokollid.

9. Töö etapid ja ajakava

- Seadme spetsifikatsiooni läbitöötamine 20.11.2020,
- Mõõteandmete ja objektilt info korjamine ja läbitöötamine 20.12.2020,
- Lähteandmete kogumine 30.12.2020,
- Teoreetilise osa kirjutamine 16.01.2020,
- Arvutuste/mõõtmiste/seadme võimaliku paigalduse modelleerimine 16.02.2021,
- Uuringu tulemuste kirjutamine 28.02.2021,
- Järelduste kirjutamine 20.03.2021,
- Kokkuvõtte kirjutamine 10.04.2021,
- Töö esimene versioon valmis 18.04.2021,
- Juhendajale läbilugemiseks saatmine 25.04.2021,
- Paranduste läbiviimine 10.05.2021,
- Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine 11.05.2021,
- Töö lõplik versioon on valmis 15.05.2021.

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

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	10
Lühendite ja tähiste loetelu	11
SISSEJUHATUS	12
1 Tarbija toitepinge	14
1.1 Tarbija elektrivarustus	14
1.2 Toitepinge kvaliteet	15
1.3 Pingehälbed	16
1.4 Pingelohud	16
2 Pingestabilisaator	18
2.1 Pingestabilisaatorid üldiselt	18
3 Elektrimõõtmised tootmisettevõttes	24
3.1 Mõõtmismetoodika	24
3.2 Pingegraafik	26
3.3 Voolugraafik	27
3.4 Võimsusgraafik	27
3.5 Seadme paigaldus	28
3.6 Kõrgemad harmoonikud	29
3.7 Harmoonikute kaod	31
3.8 Aktiivfiltri paigaldus harmoonikute filtreerimiseks	33
3.9 Pingelohkude mõõteandmete analüüs võrguandmetest	37
4 Seadme kasutamise majanduslik analüüs	41
4.1 Tootepaigaldusest tulenev kulu	41
4.2 Pingelohkudest tekkiv kulu tootmises	42
4.3 Tasuvusaeg	43
KOKKUVÕTE	45
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	46

EESSÕNA

Lõputöö teema algatus tuli autorilt, keda ajendas teemaga tegelema käsil olevad projektid, kus esinesid pingelohud elektrivõrgus. Sellest omakorda tulenevad probleemid tootmiseseadmetele, mille vältimise üheks võimalikuks lahenduseks oleks pingestabilisaator. Seadme valik tehakse ühe hetkel käsil oleva projekti põhjal, kus esinevad pingelohud võrgu poolelt. Töö tulemused on saadud läbi elektrimõõtmiste (andmeanalüüsi), lisaks tootjaga konsulteerides ja tootja andmete analüüsimisest. Samuti on oluline osa andmetel, mis pärinesid Elektrilevilt võrgus esinevate pingelohkude kohta.

Lühendite ja tähiste loetelu

IGBT – isoleeritud paisuga bipolaartransistor

PLC – programmeeritav loogikakontroller

IEC – Rahvusvaheline Elektrotehnikakomisjon

SEMIF47 – pooljuhtide pingehäiretele keskenduv standard

THD_U – pinge harmoonikute kogumoonutustegur

THD_I – voolu harmoonikute kogumoonutustegur

EVS-EN – Eesti standard – Euroopa standard

PJK – peajaotuskilp

PCB – trükkplaat

KP – keskpinge

AJ - alajaam

SISSEJUHATUS

Tänapäeva tootmisettevõttes kasutavad järjest rohkem elektroonikal põhinevaid lahendusi: arvutid, PLC-d, erinevad mõõte- ja juhtimisseadmed, andurid jne. Pingelohkude korral on need seadmed kõige tundlikumad. Väiksema pingekadumisega võib tootmisliini töö olla tavapäraselt häiritud, mis lõppeb toote kvaliteedi halvenemise või halvemal juhul hävinemisega. Eelkõige tekitab selline olukord tootmisettevõttes majanduslikku kahju.

Antud töö käigus pakutakse ühe võimaliku lahendina pingestabilisaatorit pingelohkude ärahoidmiseks tootmisettevõtte madalpingevõrgus. Tänapäeval kasutatakse selleks otstarbeks tootmisettevõttes IGBT staatilist pingestabilisaatorit, mida juhib mikrokontroller. See tagab kõige kiirema reageerimise sõltuvalt tootjast <3 ms. Seade paigaldatakse vastavalt vajadusele ja objektiisearasustele kas tsentraalselt kogu tootmisele või lokaalselt üksikutele liinidele.

Lisaks kirjeldab töö pingelohku mis on toitepinge järsk langus alla 90 % nimipingest ja on kestvusega 10 ms kuni 1 min, samuti vaadeldakse lühidalt mõningaid võrguparameetreid seadme valiku seisukohalt: võimsus, pinge ja kõrgemad harmoonikud.

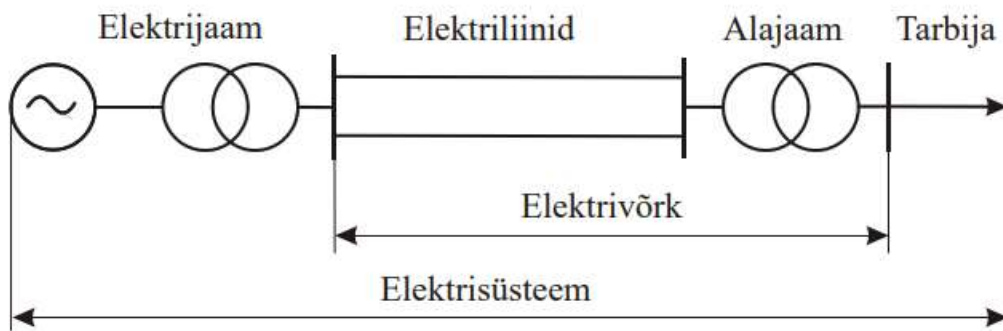
Kuna mõõtmiste käigus tuvastati standardist lubatud suurem harmoonikute osakaal ettevõttes, pakub töö lühidalt lahendust ka sellele ettevõtte pingesüsteemis olevale probleemile. Järjest rohkem kasutatakse tänapäeval mittelineaarseid seadmeid tootmistes ja jõuelektroonikas, mis tekitavad kõrgemaid harmoonikuid. Kõrgemad harmoonikud mõjutavad samuti tootmisettevõttes olevaid seadmeid ja toote kvaliteeti. Samuti ei saa pingestabilisaatori paigaldusel süsteemi vaadata mööda ka olukorrast kus esinevad suuremal mahul THDu 8%+ kõrgemaid harmoonikuid. Üheks võimalikuks lahendiks pakub töö autor aktiivfiltrit. Lahendusi on ka teisi: passiivfilter, suurema trafo paigaldus elektrivõrku ja tõstes võrgu inertsi, aga nendele lahendustele ei keskenduta antud töös.

Lisaks teoreetilisele osale, viiakse läbi ka päriselu probleemil põhinev praktiline osa milles tuuakse näitena välja ühe Hiiu maakonna asuva tootmisettevõtte põhjal võrgumõõtmised. Mõõtmistulemustest on välja toodud osalised tulemused pingest, voolust, võimsusest ja harmoonikutest. Mõõtmistel kasutati võrguanalüsaatorit Fluke435. Samuti analüüsitakse nelja kuu pikkust võrguettevõtte poolt edastatud informatsiooni ja tulemusi kliendi keskpinge liitumispunktis toimunud pingekatkestustele ja nende pikkustele. Järgneva info põhjal valitakse välja vastav pingestabilisaator ja näidatakse mõõteandmete põhjal seadme tasuvus, nii majanduslikus mõttes kui ka tehnilisest aspektist lähtudes.

1 Tarbija toitepinge

1.1 Tarbija elektrivarustus

Elektrienergiat edastatakse Eestis õhuliinidel 330 kV ja 110 kV, edasi jaotatakse elektrit piirkonniti keskpingel 35...6 kV, mis sõltuvalt tarbijast jõuab ka suurtematele tootmisettevõtetele keskpingel (tavaliselt 10 kV ja 6 kV). Väiksemate tootmiste puhul jõuab tarbijani 0,4 kV. Keskpinge puhul toimub elektri muundamine üldtarbijale juba läbi komplektalajaama 0,4 kV-ks, mida siis kasutatakse lokaalselt tootmisettevõtte seadmetes. Joonis 1.1 näeme, et tootmisettevõtte madalpinge pingehälbed on samuti tihedalt seotud elektrivõrgus toimuvaga.



Joonis 1.1. Elektrisüsteemi põhielemendid [1]

Lihtsustatud skeemina jõuab elekter tarbijani joonis 1.1 näidatud kujul. Tarbijaks loetakse igasugused ettevõtted, tootmised, asutused või eramajad, mis on ühendatud elektrivõrku. Elektrisüsteem peab olema tarbijale töökindel. See tähendab, et süsteem töötab ilma häiringuteta. Sellest olenemata võivad tekkida pingehälbed, mis võivad olla nii võrgupoolsed, kui ka tarbijapoolsed ja kanduda ühest süsteemist teise, põhjustades avariisid, millest enamlevinud põhjused on:

- inimlikud eksimused,
- loodusmõjud (väik, tormid),
- liigkoormused,
- seadmete üldine riknemine,
- erinevad lülitused võrkudes,

IEC töögrupi poolt on antud soovitus registreerida pingemuutused sedasi, et vaatlusperiood oleks minimaalselt neli nädalat. Antud töö puhul on kasutatud

mõõteperioodi neli kuud, mis annab juba vajaliku ettekujutuse pingehälvete esinemise kohta uuritavas liitumispunktis. [2]

1.2 Toitepinge kvaliteet

Toitepinge kvaliteet kliendi liitumispunktis peab vastama standardile EVS-EN:501600. Tarbija seisukohalt on oluline toitepidevus, standardi kohaselt on toitekatkestus olukord, kus toitepunktis on pinge väiksem kui 1% lepingulisest pingest. Päriselt loetakse toitekatkestust olukorraks kus pinge langeb rohkem kui 50% nimipingest. Varustuskindlust elektrisüsteemis loetakse järgmiste parameetrite alusel:

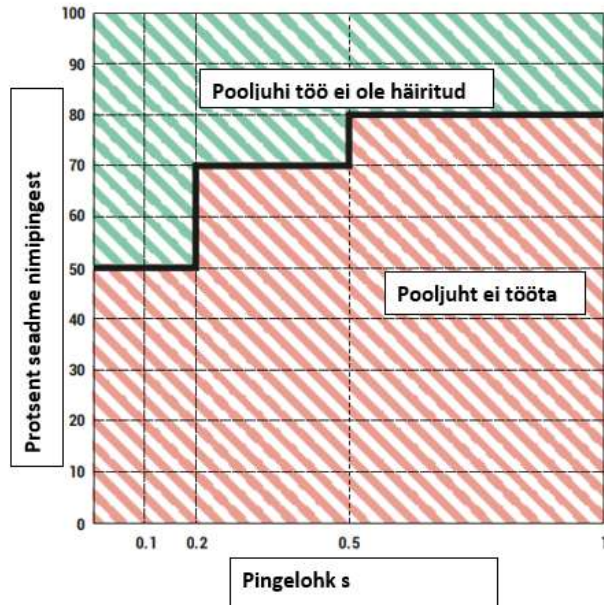
- toitekatkestuste erisagedus,
- toitekatkestuste keskmine kestus kliendi kohta,
- kliendi toitekatkestuste keskmine kestus.

Kuna ettevõtete tootmistehnoloogia on tänapäeval muutunud elektroonika osas väga keerukaks, siis toob see omakorda kaasa ka suurenevat tundlikust toitepinge kvaliteedi osas. Ideaalseks toitepingeks kliendi elektrivõrgus võiks lugeda olukorda kus:

- toitepinge sagedus on 50 Hz,
- toitepinge 230/400 V,
- puuduksid pingehälbed ja pingelohud elektrisüsteemis,
- harmoonikud ettevõtte siseselt on ligikaudu olematud,
- pinged on faaside vahel sümmeetrilised.

Sellist olukorda paraku üheski reaalses elektrivõrgus ei leia, seda on näha ka punktis 3 toodud mõõtmistulemustes. Mida kaugemal on tarbija toitmispunktist seda rohkem hälbeid esineb ka tarbija elektrivõrgus. Toitepinge kvaliteedi üheks määramistingimuseks on hinnata mõõtetulemusi vastavalt standardis määratud pingele esitatud nõuetele. Teine võimalus on toetuda praktilisele kogemusele, kuna tihti on standardis esitatud tingimused liiga leebed. Üldiselt teostatakse pingekvaliteeti mõjutavate parameetrite mõõdistamist tarbija liitumispunktis, kas siis madalpingevõrgus või keskpingevõrgus. [2]

Pooljuhtidele on välja töötatud ka SEMIF47 pingehäiretele keskenduv standard. SEMIF47 näeb ette seadmete tööd antud standardi järgi selliselt, et 50% pingelohu korral peab seade töötama 200 ms, kuni 30% pingelohu korral 500 ms ja 20% pingelohu korral 1 s ilma häireteta töös ja operaatori sekkumiseta. [5]



Joonis 1.2. näitab pooljuhi tööd vastavuses SEMIF47 pooljuhtide pingehäirete standardile [5]

1.3 Pingehälbed

Pingehälbed on oolised pingekvaliteedi parameetrites, need mõjutavad otseselt elektriseadmete tööd häiringute ja tõrgete osas. Pingehälbed võivad olla nii võrgupoolsed, kui ka tarbija enda tekitatud.

Võrgupoolsed pingehälbed on enamasti juhuslikud, neid esineb harva ja neid tekitavad enamasti lühised, liinide katkemised ja erinevad lülitused jaotusvõrkudes.

Tarbijapoolsed pingehälbed ei pruugi enam olla juhuslikud ning võivad tekkida näiteks suurte asünkroonmootorite käivitamisel, kraanade ja keevitusseadmete. Pingelohud suurte asünkroonmasinate poolt jäävad tavaliselt keskmiselt 5-10% vahele, harvem kuni 15% juurde. Neid on juba lihtsam registreerida ja mõõta välja konkreetsetest punktides, sõltuvalt seadme tsüklitest kus neid on võimalik mõõtmiste tarbeks ise tekitada. Lühised tarbija poolel pingehälbeid ei tekita, kuna õigesti valitud kaitseseadmete korral ei teki piisavalt suurt lühisvoolu. [2]

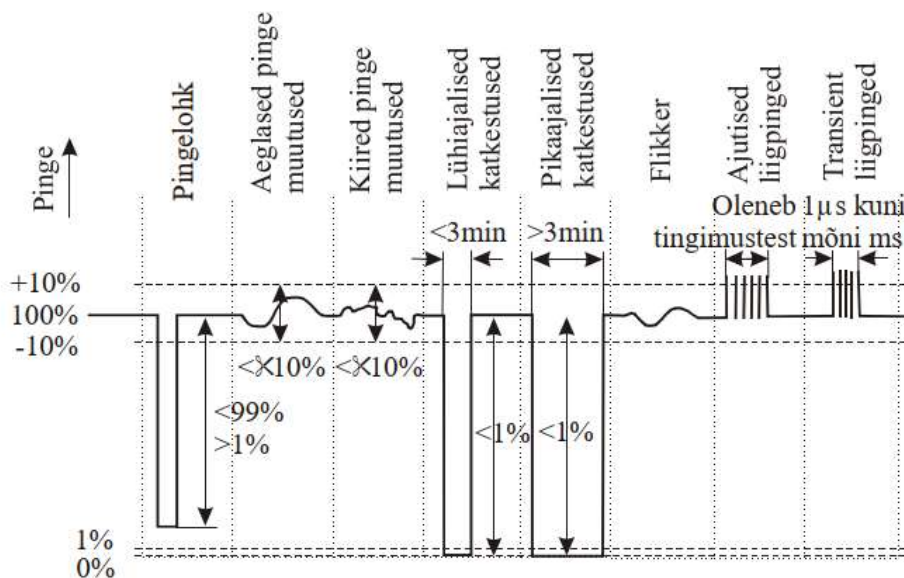
1.4 Pingelohud

Pingelohk on toitepinge äkiline langus alla 90% nimipingest mis on kestusega 10 ms kuni 1 min, lubatud pinge väärtus EVS-EN 50160 (avalike elektrivõrkude pinge

tunnussuurused) järgi on +/- 10% (207...253 V). [9] Pingelohkude hulk ühe aasta kohta võib olla tuhandetes, tihti tekivad need ka tootmisseadmetest endast, näiteks suure mootori käivitamisel, sellisel juhul ei tekita see probleeme. Pingelohkude sügavus ja kestvus sõltub paljustki mootorist endast, sügavus on tavaliselt kuni 90% ja kestusega 0,2-20 s ja on ühtlane faaside vahel. Probleemsed pingelohud tootmises võivad tekkida kui leiab aset mõni järgnevast sündmusest:

- elektrisüsteemis on kesk- ja kõrgepinge lühised,
- elektrisüsteemis on erinevad lülitused või, trafode pingestamised.

Lühistest tingitud pingelohud ei pruugi enam olla ühtlased faaside vahel, see sõltub sellest, kas lühis on faasijuhi ja neutraalijuhi vahel ning mitmes faasis see esineb. Pingelohu suurus sõltub ka lühise kaugusest tootmise liitumispunktist. [10]



Joonis 1.3. Olulisemad pingekvaliteedi näitajad [1]

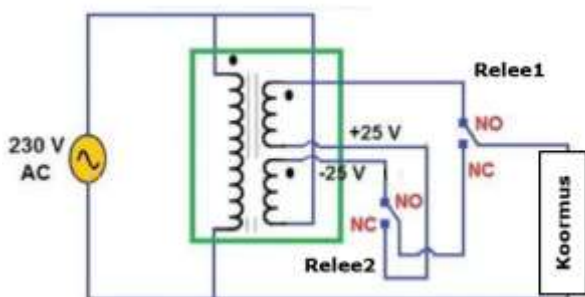
Taolised pingelohud mõjutavad otseselt erinevaid seadmeid: muutuva kiirusega tootmisseadmed, erinevad kontrollsüsteemid, arvutid ja PLC-d ei kannata pinget mis langeb rohkem kui 90% nimipingest. Sellise pinge langemise korral võib tekkida seadmel toitekatkestus, pingelohud võivad olla isegi probleemsemad kui täielik toitekatkestus võrgus, kuna protsess võib jääda osaliselt töösse. Selliste probleemide lahendamiseks kasutatakse tänapäeval põhiliselt UPS ja pingestabilisaatoreid. Pingelohkude korral on tehniliselt soovituslik kasutada pingestabilisaatorit, seda sellepärast et kui eesmärk on siluda pingeid ja mitte omada otsest tugiaga võib olla UPS majanduslikult kallim ja füüsiliselt suurem ehk suurema ökoloogilise jalajäljega, seda tänu patareide kasutamisele ja nende hooldamisele.

2 Pingestabilisaator

2.1 Pingestabilisaatorist

Pingestabilisaator on elektriseade, mis annab oma väljundis konstantse pinget sõltumata sisendi pinget muutustest või kõikumistest. Seadme eesmärk on kaitsta erinevaid elektriseadmeid võimalike kahjustuste eest pinget suurenemise või väljalülitamise eest pinget kõikumise tagajärjel ehk pingelohkude kaitseks. Ülepinge korral peab alapinge funktsioon vähendama pinget intensiivsust ning, alapinge korral peab ülepinge funktsioon tõstma pinget. Funktsioonide mõte on säilitada sama väljundpinget. Pingestabilisaatorite kasutamine ei piirdu ainult tööstusega, pingestabilisaatoreid kasutatakse ka kodustes majapidamistingimustes, kasutatakse nii ühefaasilisi 220-230 V, kui ka kolmefaasilisi 380-400 V või 690 V stabilisaatoreid.

Seadmed on saadaval mitmesugusteks erinevateks rakendusteks, näiteks spetsiaalsed pingeregulaatorid väiksematele seadmetele, tööstusseadmetele, samuti erinevate lisafunktsioonidega nagu ülekoormuskaitse, nullpinge väljalülitamine, sageduse muutumise kaitse, pinget väljalülitamine, erinevad seiskamise võimalused väljundile ja bypass võimalused. [3]



Joonis 2.1. Kahe astmelise pingeregulaatori skeem

Joonisel 2.1 on kujutatud väga lihtsustatud ja tänapäeval vähe kasutusel oleva pingeregulaatorit, kus kasutatakse releed 1 ja releed 2, et pakkuda läbi releede konfiguratsiooni võimalusi väljundpingele, kasutades autotrafot. Hetkel suudab seade pinget reguleerida vahemikus +/- 25 V, ehk siis vahemikus 230 V puhul 205 V kuni 255 V. [3] Pingeregulaatorites, kus on kasutusel autotrafo, juhitakse tänapäeval astmeid juba servomootoritega või mikrokontrolleriga, teise variandina kasutatakse staatilisi pingestabilisaatoreid IGBT põhjal ning mikrokontrolleritega.

Pinge stabilisaatorid võib jagada kaheks eri tüübiks:

- staatilised pingestabilisaatorid,
- autotrafool põhinev pingestabilisaator, mida juhib kas servomootor või mikrokontroller.

2.2 Staatiline pingestabilisaator

Kuna tänapäeva tootmisettevõtted ja seal kasutatav elektroonika vajab aina rohkem täpsemat ja kvaliteetsemat pinget, oleks üheks lahenduseks staatiline pingestabilisaator, tema lühikese reageerimisaja tõttu, mis on >3 ms. Erinevad tootjad pakuvad pingestabilisaatoreid, näiteks tootja Ortea kes keskendub tööstusele omab staatilisi pingestabilisaatoreid vahemikus võimsustega 200 kVA kuni 3200 kVA, lisaks erinevate tehniliste parameetritega. Antud töös keskendutakse selle tootja võimalustele ja lõplik valik tehakse antud tootja seadmete tootevalikust.

Üldine seadme tehniline info pingestabilisaatori kohta, tootja Ortea mudel Oxygen on toodud tabelis 2.1.

Tabel 2.1. Ortea mudel Oxygen seadme tehnilised parameetrid [4]

Pinge reguleerimise tehnoloogia	IGBT juhtimine
Pinge stabiliseerimine	Mõõtmise ja stabiliseerimise käib faasi kaupa
Nimipinge	380-480 V
Sagedus	50 Hz +/-5% või 60 Hz +/-5%
Pinge stabiliseerimise täpsus	+/- 0.5%
Stabiliseerimise kiirus	<3ms
Lubatud koormatuse %	100%
Lubatud faaside vaheline ebalanss	50%
Jahutus	Sundventilatsioon
Lubatud ümbritsev keskkond	0-40° C
Suhteline niiskustase	<95%
Lubatud ülekoormus	Kuni 150% 1min jooksul nimipinge korral
Värv	RAL9005
IP aste	IP 2X
Paigaldus	Siseruumi
Juhtpaneel	10" puuetundlik juhtpaneel
Kommunikatsioon	Modbus RTU, Modbus TCP
Ülepinge kaitse	Sisend T1 väljund T1+T2

Põhiline erinevus staatilise pingestabilisaatori ja teiste pingestabilisaatorite vahel lisaks ehitusele on ka väga kiire reageerimisaeg. Staatiline pingestabilisaator reageerib kuni <3 ms jooksul, seda tänu IGBT kasutamisele ja kuna puuduvad otseselt liikuvad osad ja mehhaanika, sama tootja elektromehaaniline pingestabilisaator reageerib vahemikus 8 kuni 30 ms. Seega määrab meile vajaminev reageerimisaeg ja vajaminev töökindlus pingestabilisaatori tüübi, mida kasutada antud olukorras.

Töökindluse seisukohalt on staatiline pingestabilisaator lihtsamini hooldatav, kuna puuduvad otseselt liikuvad osad mis kuluksid. Kui võrdleme servomootoriga juhitud stabilisaatoritega või autotrafo põhimõttel stabilisaatoritega, siis omavad sellist tüüpi stabilisaatorid liikuvaid mehhaanilisi osasid, mis vajavad teatud ajahetkel hooldust või vahetust. Lisaks sarnaselt sagedusmuunduriga, kontrollib ja mõõdab mikroprotsessor pidevalt voolu väärtusi ahelas ja näiteks lühise korral tuvastab mikroprotsessor automaatselt tekkiva suure vooluväärtuse, mis annab edasi signaali IGBT plaadile ning see omakorda lülitab pingestabilisaatori väljundi ahelast välja. See kõik toimub protsessiliselt kiiremini kui kaitseautomaat, säilitades seeläbi selektiivsuse. Servomootoriga või autotrafo põhimõttel pingestabilisaatorid vajavad spetsiaalselt välja arvestatud kaitseautomaati ahela kaitseks lühise korral. Miinuseks servomootori ja autotrafol põhineva stabilisaatorite vahel võrreldes staatilise pingestabilisaatoriga, on seadme kõrge hind. Seega väiksema reageerimisaja ja töökindluse vajadusel tasub võtta pigem mehhaaniline pingestabilisaator majanduslikus mõttes.

Tabel 2.2. Oxygen 1000 pingestabilisaatori nimiaandmed [4]

Nimivõimsus	1000 kVA, näiteks Oxygen 1000 mudel
Pinge stabiliseerimisvahemik	+15% -50% (1min Un korral)
Nimipinge vahemik	380-480 V
Väljundpinge	400 V seadme korral 400 V +/-0.5% jne
Maksimaalne vooluimpulss	1698 A [2887 A 50% korral]
Väljundvool	1443A 100 kVA seadme korral
Seadme töötamise efektiivsus	>98%

Lisaks tehakse seadmeid erinevate pingereguleerimise vahemikega. Näiteks on toodud üks mudel Oxygen tooteseeriast tabelis 2.2, mis reguleerib pinget +/-15% pidevalt ja pingelangemisel kuni -50% 1 min jooksul andes välja 100% Un. [4]

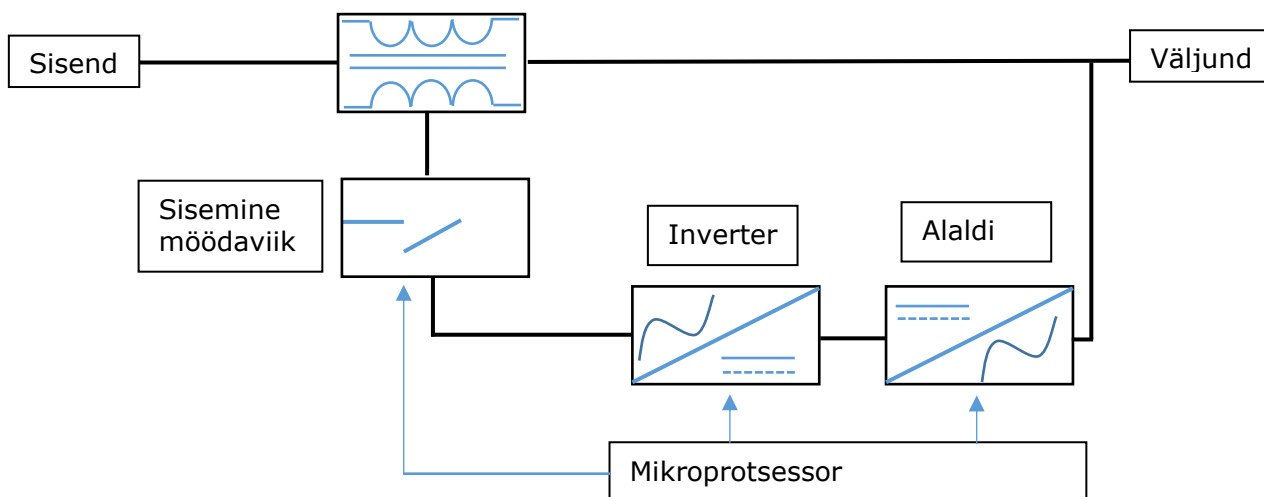
See tähendab, et 400V langemisel 50%, antakse väljundisse endiselt 100%-ne väljundpinge 400V ja seda suudetakse hoida 1 minuti jooksul.

Seadme edasisel pinge vähenemisel näiteks kuni -60% ei suuda seade enam tagada väljundisse 100%-list nimipinget, vaid langeb 90%-le. Ehk 400 V-se nimipinge korral annab seade välja 360 V, mis jääb endiselt lubatud pinge standardisse EVS-EN 50160 järgi on +/- 10% (207...253 V) faasipinge.

Tabel 2.3. Pingestabiliseerimise vahemikud ajaliselt [4]

Mudel	Pingelohk võrgus [%]	Seadme tagatud väljundpinge [%]	Seadme tagatud väljundpinge ajaliselt [s]
Oxygen 10-40	-40	100	60
	-50	90	45
	-60	80	36
Oxygen 15-50	-50	100	60
	-60	90	45

Tabel 2.3 näitab staatilise pingestabilisaatori kahe mudeli Oxygen 10-40 ja Oxygen 15-50 pinge töötamise vahemikku. Mudel Oxygen 10-40 töötab vahemikus +10%Un ja -40% Un, ehk 10% suurema pinge korral antakse väljundisse endiselt nimipinge ja -40% korral antakse väljundisse 100% nimipinge 1minuti jooksul. Samamoodi töötab mudel 15-50 aga +15% korral antakse väljundisse 100%Un ja -50%Un korral antakse väljundisse 100% nimipinge. Pinge langemisel alla selle ei suuda seade enam tagada täielikku väljundpinget ja vastavalt tabelile suudab siis tagada kas 80% või 90% teatud vahemikus.



Joonis 2.4. Tööpõhimõtte plokkskeem Oxygen staatiline pingestabilisaator

Staatilise pingestabilisaatori tööpõhimõtte Oxygen mudeli baasil IGBT staatilist lülitamist kontrollib mikrokontroller. Mikrokontroller monitoorib pidevalt väljundpinget ja

vastavalt juhib IGBT kontaktide avanemist ja sulgemist, et saavutada pulsilaiusmodulatsiooni meetodil soovitud väljundpinge. See võib genereerida ka pinget mis võib olla sisendtoite suhtes 180kraadi nihkes, see annab võimaluse sisendvõimsuse languse ja tõusu põhjal kontrollida, kas pinget liita või lahutada. [5]

Seade ei oma otseselt patareisid ega akusid, pinge hoidmiseks soovitud ajaks kasutatakse elektrolüüt-kondensaatoreid nende suure erimahtuvuse tõttu. Alaldi muundab vahelduvpinge alalispingeks, tüüritava inverteri abil muudetakse alaldist tulev alalispinge uuesti vahelduvpingeks, mis on siis juba koos ühise IGBT-ga reguleeritud õigele suurusele. [5]

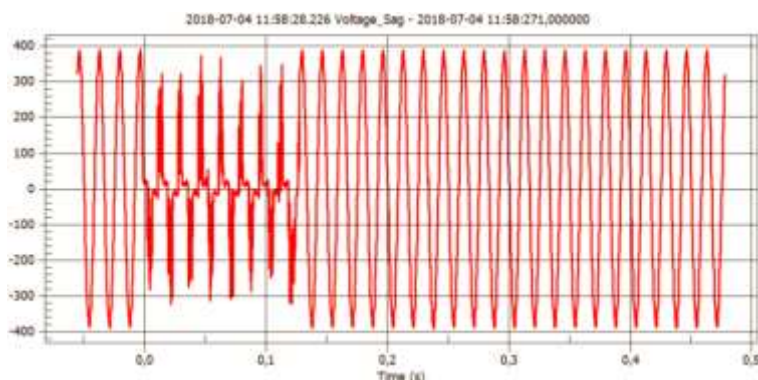
Allpool on tootjapoolne näide tekstiilitööstuses olevast pingestabilisaatori tööst.

Monitooring pingelohu koral		
Mõõdetav faas	Minimaalne mõõdetud tulemus	Kompenseeritud väljundpinge
L1-N Input Oxygen	268.4V	269.1V
L2-N Input Oxygen	91.8V	264.3V
L3-N Input Oxygen	268.7V	269.2V
L1-L2 Input Oxygen	312.1V	466.6V
L2-L3 Input Oxygen	315.8V	466.9V
L3-L1 Input Oxygen	464.2V	465.9V
L1-N Output Oxygen	261.66V	267.47V
L2-N Output Oxygen	264.45V	268.07V
L3-N Output Oxygen	263.67V	266.92V

Joonis 2.5. Tootjapoolne näidis pingelohust ja selle stabiliseerimisest [6]

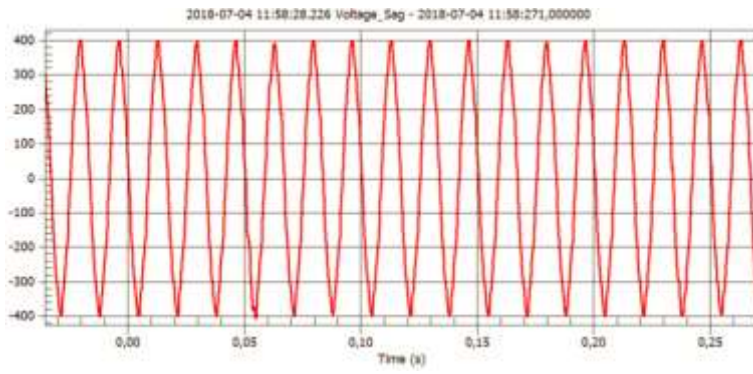
Joonis 2.5 toodud süsteemi nimipinge on 460 V ja sagedus 60 Hz.

Näites on Oxygen seadme poolt tuvastatud sündmus ja paremal on seadme poolt parandatud tulemus. 91,8 V suuruse pingelohu (-65,48%) L2-N vahel, mille kestus oli 0,133 s, sellise pingelohu korral antakse pingestabilisaatorist välja peaaegu nimipingele liginev pinge väljundisse. [6]



Joonis 2.6. Võrgus esinev pingelohk ilma pingestabilisaatorita

2.5 joonisel näidatud tekstiilitööstuse Oxygen seadme registreeritud sisendpinge



Joonis 2.7. Pingelohk pingestabilisaatori töötades on kompenseeritud ja ei kajastu monitooringul

Seadme parandatud väljundpinge on välja toodud joonisel 2.7. [6]

3 Elektrimõõtmised tootmisettevõttes

3.1 Mõõtmismetoodika

Energiakvaliteedi mõõtmised tootmisettevõttes Hiiumaal teostati vahemikus 30.06.2020-07.07.2020, eesmärgiga määrata seadme valikut mõjutavad võrgu parameetrid, samuti kontrollida ka elektrivarustuses esinevaid häireid seadme valiku seisukohalt. Põhilised võrguparameetrid, mis pingestabilisaatori valikul huvi pakkusid olid tarbitavad võimsused, pingekvaliteet ja häiringud, mis võivad mõjutada seadme tööd hilisemalt. Võimsuse järgi saab hinnata vajaliku seadme suurust kVA-des, sõltuvalt olukorrast tuleb arvestada ka tulevikus lisatavaid seadmeid ning tootja soovitatud võimsusvaru 10%. Võimsusvaru seisukohalt võib ka seadme suuruse valida trafo näivvõimsuse järgi, see aga ei pruugi alati olla majanduslikult otstarbekas. Tarbimise võimsuste kontrollimisel seadme paigalduse eesmärgil tuleb lähtuda sellest, kuhu seade paigaldatakse. Madalpingevõrkudes eristatakse põhiliselt kolme paigaldusviisi:

- Tsentraalne paigaldus,
- Gruppide kaupa paigaldus,
- Lokaalne seadme paigaldus.

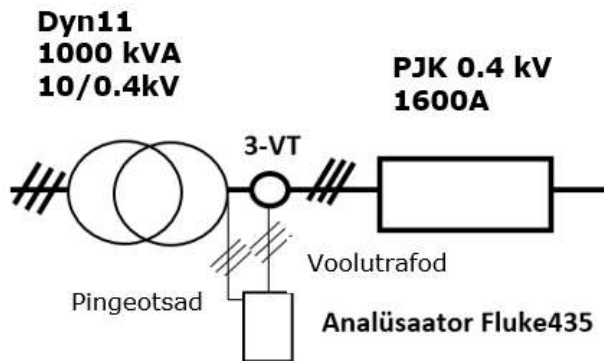
Tsentraalse paigalduse all peetakse silmas suuremat seadmete kogumit: peajaotuskilp, kogu hoone, tootmine jne. Näiteks pingestabilisaatori paigaldamine koheselt pärast trafot, tagatakse kogu tarbimine pingestabilisaatoriga. Seda rakendatakse juhul kui tootmine on nõ terviklik lahendus ja omab palju kompleksseid seadmeid, pingelohud erinevates seadmetes mõjutavad kogu tootmisprotsessi ja ei ole võimalik eemaldada teatud seadmeid tootmisprotsessist. Samuti vastupidises olukorras, kus kogu trafo või enamuse tarbimise moodustab üks suur tarbija.

Gruppide kaupa paigaldus on olukord, kus eristatakse mingi osa tootmisest gruppideks ja seda on võimalik kaitsta pingestabilisaatoriga selliselt, et pingelohud teistes seadmetes, mis grupist välja jäävad, ei ohusta tootmisprotsessi, või ei ole need seadmed lihtsalt prioriteetsed tootmise seisukohalt.

Lokaalne lahendus seisneb ühe konkreetse väljundi kaitsmisel pingestabilisaatoriga. Seda saab rakendada väiksemas tootmises või olukorras, kus mingi teatud seade on prioriteetne ning omab tootmises olulist rolli. Pingehäiringu korral selle seadme toitmine on piisav, et hoida tootmisprotsess töös või viia pingehäiringutest tekkiv kahju tootmises miinimumini.

Antud tootmise korral lähtuti tsentraalsest paigaldusest, kuna tootmisprotsess on keeruline ja koosneb paljudest liinidest ning nende koostöötamisest, antud olukorras

tuli majanduslikult kallim hakata eristama gruppe või üksikuid seadmeid tootmises. Tootmine on juba jagatud kahe trafo vahel selliselt, et ühes toitepunktis on prioriteetsemad seadmed kui teises toitepunktis. Seega keskendume seadme valikul ühele mõõtepunktile. Erinevate paigaldusviiside majanduslikku arvutust antud töö ei käsitle.



Joonis 3.1. Ühejooneskeem analüsaatori ühendamisest

Töö käigus mõõdeti kogu tootmistarbimine otse 10/0.4 kV 1000 kVA trafo väljundist. Selleks kasutati trafo madalpinge otsasid, kuhu ühendati pingeoatsad ja voolutrafod. Mõõtmisteks kasutati Fluke435 võrguanalüsaatorit.

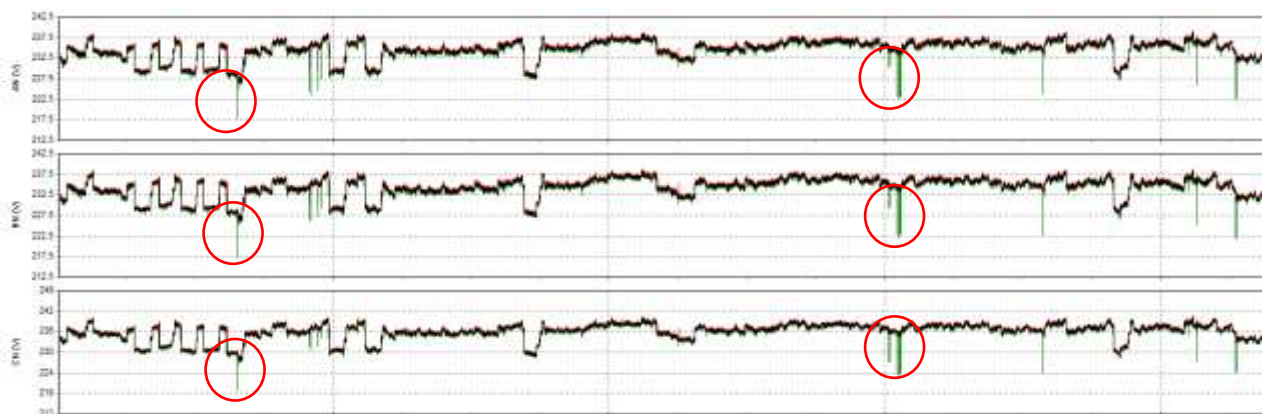


Joonis 3.2. Mõõdetud otse sisendtrafolt seadmega Fluke435

Mõõtetulemuste eesmärk oli mõõta võrguparameetrid ja sobivus pingestabilisaatoriga, vajalik võimsus, kõrgemad harmoonikud, tarbitav vool. Eesmärk polnud mõõta välja pingelohkuseid. Pingelohkude tarbeks peaks mõõtma vähemalt kahe-kolme kuu pikkuselt. Pikemaajalised pingelohkude graafikud sai võrguettevõtelt Elektrilevi OÜ kliendi liitumispunkti kohta.

Mõõtetulemused ja lähteprobleemi kontekstis olulisemad mõõtmiste graafikud ja parameetrid on toodud eraldi välja.

3.2 Pingegraafik



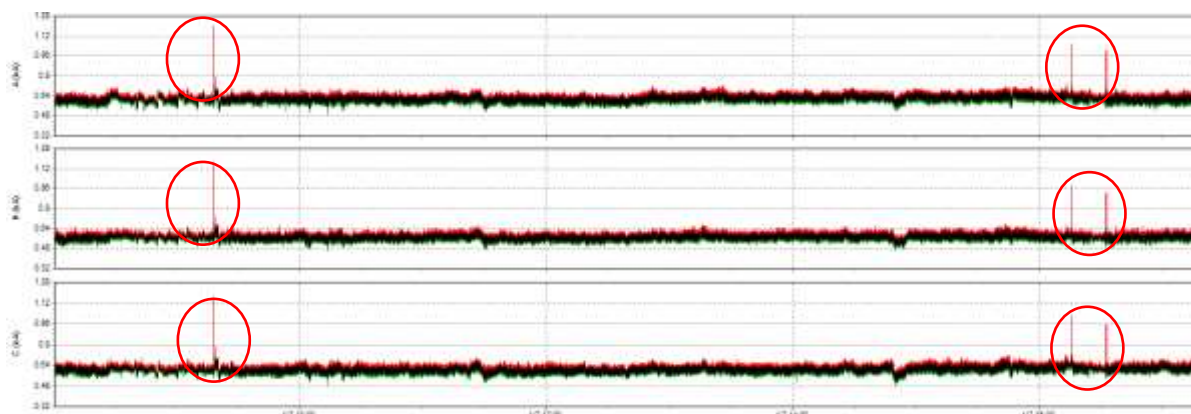
Joonis 3.3. 01.07 10.00-17.00 Pingegraafik 0.4 kV tootmisvõrgus

Jooniselt 3.3 on näha, et võrreldes voolugraafikuga on suuremad mõõdetud lohud tingitud käivitustest, kuna analoogsed lohud esinevad ka voolugraafikutes.

Faasipingete pildil jäävad faasipinge lubatud väärtused 230 V +/- 10% (207...253 V) etteantud vahemikku. Toitepinge sümmeetria on lubatud piirides. Erinevus faaside pingeniivoode vahel jääb 3 V piiridesse. Pingenivoo all mõeldakse pingestme keskmist pinget, mis on teatud ajavahemiku vältel. Tarbija jaoks on pinge muutuv suurus ja tarbija vool I_K põhjustab samuti toiteahelas pingelangu, see sõltub toiteahela takistusest ning tarbitavast voolust.

Takistus üldjuhul ei muutu, tarbimine ja vool muutub pidevalt, seetõttu muutub ka pinge liitumispunktis võrgu nimipinge U_{nimi} suhtes. Seega meie nähtud pinge muutused sõltuvad paljustki tarbija enda koormusest ning tema näivtakistusest. [1]

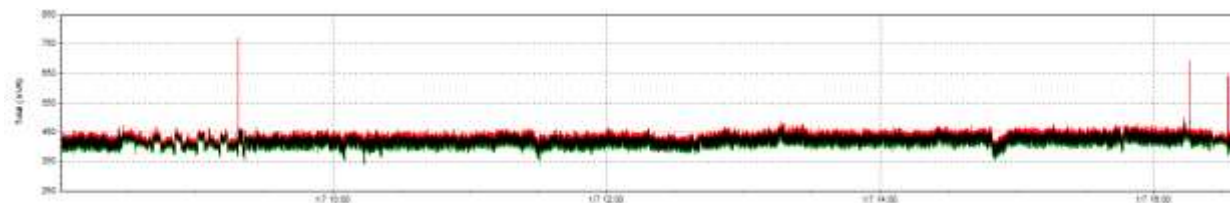
3.3 Voolugraafik



Joonis 3.4. 01.07 10.00-17.00 Voolugraafik

Antud mõõtmiste joonis 3.4 juures näeme, et osalised pingekukkumised langevad kokku voolutõusuga. Tarbija voolust sõltuvuses muutub pidevalt ka pinge liitumispunktis. Pingekõikumised, mida me tarbimise muutustes ei näe, võivad olla tingitud juba võrgus tekkivatest pingekõikumistest.

3.4 Võimsusgraafik



Joonis 3.5. 01.07 10:00-17:00 võimsusgraafik

Võimsuste joonis 3.5 puhul seadme valikul pakub antud töös huvi eelkõige tarbitav näivvõimsus. Antud mõõtmistest on näha, et tarbitav võimsus on üsna stabiilne ja omab teatud impulsse, mis on tingitud suuremate mootorite käivitamisest. Üldine näivvõimsus jääb 400-475 kVA vahele. Lühiajalised impulsid, mida näeme mõõtmistes võime jätta seadme suuruse valikul tähelepanuta.

Antud tarbimispunktis on kasutusel trafo 1000 kVA 10/0.4 kV. Trafo omab piisavat võimsusvaru tootmise tarbimise seisukohalt. Hetkemõõtmisi ja tootja seadmete tarbimist arvestades ning võimalikku tuleviku varu koos tootja soovitatud 10%-lise reserviga, võiks stabilisaatori suurus olla 630 kVA. Ortea Oxygen staatiliste pingestabilisaatorite näidissuurused:

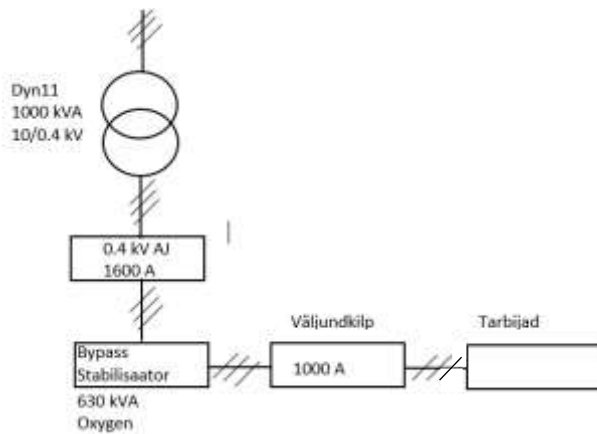
Tabel 3.1. Erinevate suurustega Ortea mudelite tehnilised parameetrid

Tüüp	Pinge stabiliseerimis- vahemik	Võimsus	Sisendpinge vahemik	I _{pk}	Väljund pinge +/-0.5%	I _n	Effektiivsus	Reageerimis-aeg	Möödud	Kaal
	[%]	[kVA]	[V]	[A]	[V]	[A]	%	[ms]	[WxDxH] m	[t]
400-15-50	+15 (-50%)	400	340- 460	679 (1155)	400	577	>98%	>3	1.8x1x2	1
500-15-50	+15 (-50%)	500	340- 460	849 (1443)	400	722	>98%	>3	1.8x1x2	1.2
630-15-50	+15 (-50%)	630	340- 460	1070 (1819)	400	909	>98%	>3	3x1x2	1.5

500 kVA seade jääks tootmises liiga piiripeale ja puuduks tootja soovitud minimaalne varu 10%. Võttes arvesse tarbitava võimsuse tipuväärtusi 475 kVA, oleks koos võimsusvaruga võimsuse väärtus 522.5 kVA. Kuna sellist seadet tootja ei paku, oleks järgmiseks seadme suuruseks 630 kVA, mida on näha tabelist 3.1.

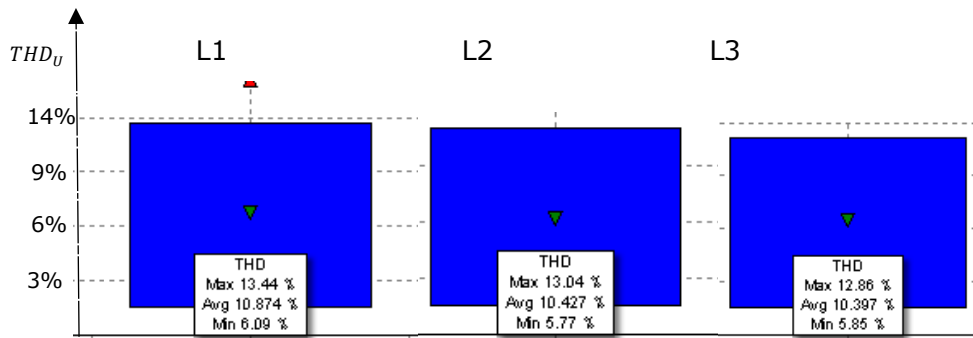
3.5 Seadme paigaldus

Pingestabilisaator paigaldatakse jadamisi tarbijatega, kas siis kogu tarbimisega või prioriteetsemate tarbijatega. Mõõdetud tootmises paigaldatakse pingestabilisaator mõõdetud koormusele. Osa koormustest, mis ei ole prioriteetne (kontor, olmeruumid jne) jäetakse seadme toitest välja. Lisaks paigaldatakse ka möödaviik ehk *bypass*, mis annab rikke korral võimaluse suunata toide pingestabilisaatorist mööda otse tarbijatesse.



Joonis 3.6. Ühejooneskeem pingestabilisaatori paigaldusest mõõdetud tootmisesse.

3.6 Kõrgemad harmoonikud



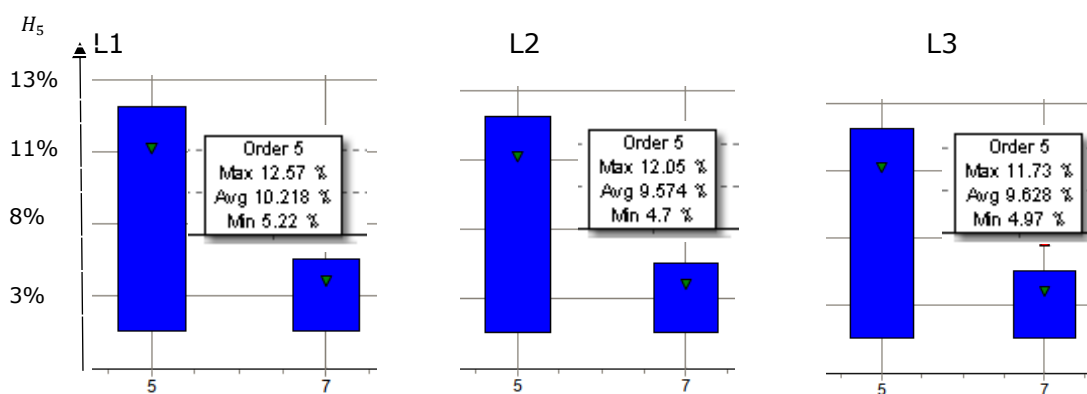
Joonis 3.7. Mõõdetud kõrgemad sagedused THD_U

Mõõtmistulemuste käigus tuvastati EVS-EN 50160 standardis sätestatud pingeharmonikele lubatust suuremad tulemused. Kuna harmoonikud volulus pole standardis reguleeritud, siis nendele ei keskenduta. Standardi EVS-EN 50160 kohaselt peab pingeharmonike moonutustegur jääma alla 8% THD_U suhtes. Lisaks on sätestatud ka piirväärtused üksikutele pingeharmonikele. [9]

Tabel 3.8. Eestis kasutatavad piirväärtused THD_U [9]

Paaritud harmoonilised				Paarisharmoonilised	
3-ga jagumatud		3-ga jaguvad			
Järk h	Suhteline pinge u_h , %	Järk h	Suhteline pinge u_h , %	Järk h	Suhteline pinge u_h , %
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25					

Tabelis 3.8 on sätestatud harmoonikutele pinges lubatavad väärtused nimipinge suhtes. Mõõtmiste eesmärgiks oli ettevõtte pinge harmoonikute uurimine seoses pingestabilisaatori seadistamise ja paigaldamise seisukohalt.



Joonis 3.9. Viienda järgu kõrgemad harmoonikud pinges suhtes 3-s faasis intervalliga 1 min

Mõõtetulemustest saame järeldada, et THD_U on lubatud standardi piiridest väljas. Keskmine THD_U jääb 9.5-10.2% vahele, enamuse sellest moodustab harmoonikute pinge järk H_5 joonis 3.9.

Kuna tegemist on tootmisettevõttega, siis analoogne harmoonikute tase on ettevõtte madalpingevõrgus pidevalt, see sõltub ka hetkekoormustest ja palju on mittelineaarseid tarbijaid kasutuses.

Harmonikud tekitavad lisakadusid elektriseadmetes, mis põhjustavad toitepinge ja voolu moonutusi, see omakorda mõjutab ka pingestabilisaatori tööd, kuna mõõdetav pinge on juba moonutatud. Tavaliselt on tootmisettevõtte keskmine THD_U 3%. Sellisel juhul on lisakaod erinevates liinides arvutatav valemiga 3.1, mootorites ja trafodes on kaod väiksed.

Liinides tekib pinnaefekt kõrgemate sageduste tõttu, mis tähendab, et elektronid surutakse sageduse toimel kaabli keskelt kaabli välispinnale lähemale. Sellisel moel väheneb piltlikult kaabli ristlõige ja väiksemal ristlõikel sama kogus võimsust tekitab suuremaid võimsuskadusid kaablis. [2]

3.7 Harmonikute kaod

Kolmefaasilises neljajuhtmelses süsteemis avalduvad kaod kaablis valemi põhjal:

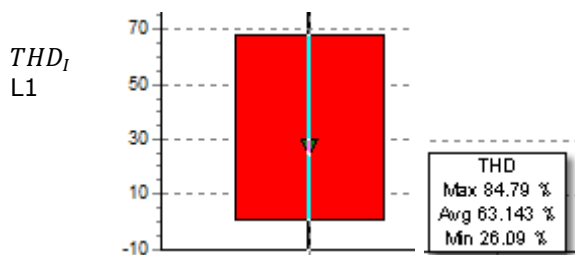
$$\Delta P_h = \sum_{c=1}^n \sum_{h=1}^{40} R_{ch} I_{ch}^2, \quad \text{, kus} \quad (3.1)$$

R_{ch} – kaablisoone takistus harmoonikute sagedusel h ,

I_{ch} – harmoonikud voolus ühes kaablisoones sagedusel h .

Juhul kui esinevad põhisagedusele lisaks ka kõrgemad sagedused, suureneb ka voolu efektiivväärtus ja suurenevad kaod liinis voolu harmoonikutest sõltuvalt:

$$\Delta P_{kaod} / \Delta P_{kaod1} = 1 + THD_i^2, \quad (3.2)$$



Joonis 3.10. Mõõdetud kõrgemad harmoonikud THD_L1 suhtes

See tähendab, et antud mõõtmiste korral 84,79% THD_L1 juures oleksid kaod kaablites ca 25% suuremad kui põhisagedusel. [2]

Harmoonikud tekitavad samuti lisakadusid trafodes, mootorites, erinevates lülitusseadmetes ning tarbijates.

Suurte harmoonikute voolu korral ei ole võimalik ka ära kasutada kogu trafo nimivõimsust, sest tegelik kasutatav võimsus on sellest umbes 10...20% väiksem. Enamlevinud trafokadusid iseloomustatakse teguri K-ga, mis on välja toodud valemis 3.3. Antud valem iseloomustab trafokadude suhet moonutatud voolu ja siinuselise voolu korral, vastavalt nende mõjule trafo kuumenemisele. [2]

$$K = \sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 h^2, \text{ kus} \quad (3.3)$$

I_h - on voolu kehtiv väärtus harmoonikute järjekorras A

h - harmoonikute järjekord

Uuringud on näidanud, et kui pingemoonutuste ulatus on $THDU \approx 10\%$, suurenevad trafo kaod kuni 20%, antud mõõtmiste käigus jäi $THDU \approx 10\%$ juurde.

Samuti tekitavad harmoonikud ka lisakadusid mootorites, aga lisaks eeltoodud põhjustele tekivad seal ka vastujärgnevuskomponendid (5-s, 11-s, 17-s) mootoris pöörleva magnetvälja, mille suund on vastupidine. [2]

Harmoonikute osakaalu vähendavad võimalused:

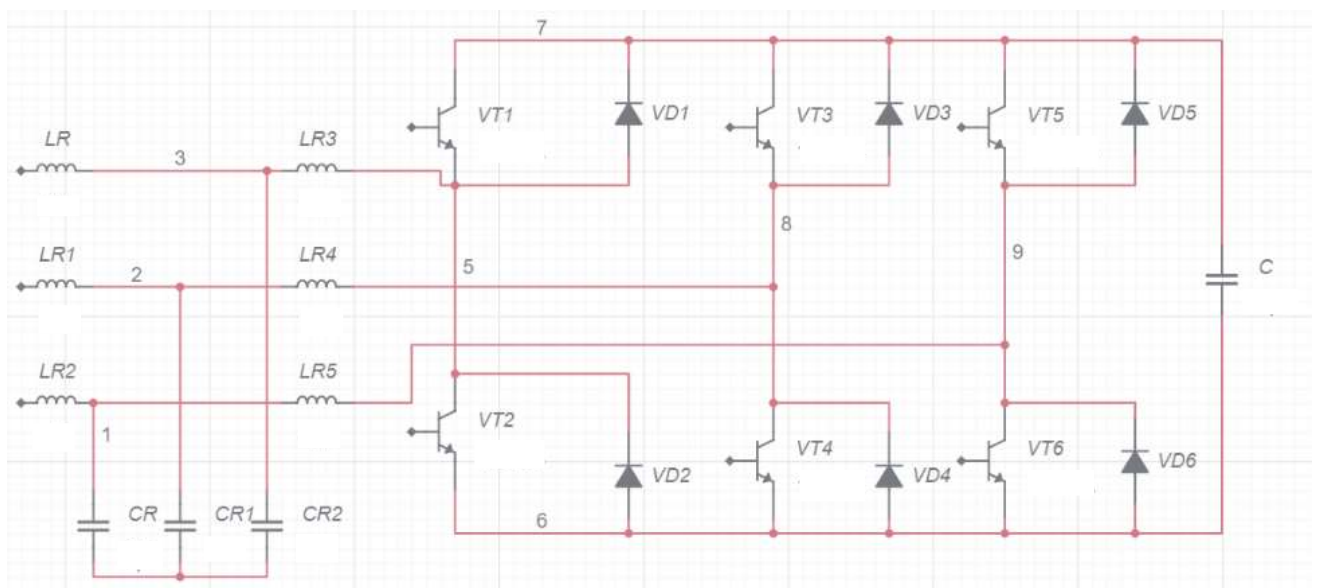
- Toiteahela lühisvõimsuse suurendamine, näiteks suurema trafo paigaldamine,
- Tarbijate ümberplaneerimine, osade mittelineaarsete seadmete paigutamine teistesse tarbimispunktidesse,
- Passiivfiltrite kasutamine,
- Aktiivfiltrite kasutamine,
- Mittelineaarsete seadmete eraldi filtreerimine, näiteks sagedusmuunduritele tootjapoolsete filtrite lisamine, „low harmonic“ muundurite kasutamine. [2]

Üldjuhul ei pea pingestabilisaatori valikul ja paigaldamisel harmoonikuid pinges arvesse võtma, sest seade mõõdab pinget efektiivväärtust. Mõõdetud elektripaigaldises tekib aga olukord, et seade töötab väga suure täpsusega, aga mõõtetulemus oli $THD_U \approx 10\%$, selle mõõtetulemuse juures on pingemoonutused liiga suured, tootja lubab välja käidud täpsust tabeli 2.3 ja kiirust tabeli 3.1 alusel harmoonikute pinget THD_U 8% juures. Mida suuremad on pingemoonutused, seda keerulisem on seadmel kompenseerida pingsiinust ja saada väljundist kätte täpne tulemus, mis on reaalne Urms. Harmoonikud ei kahjusta otseselt seadet, aga seade võib minna ooterežiimi, mille käigus tarkvara jääb ootele, oodates väljundpinge stabiliseerimist, ning hakkab käima nende

olekute vahel. Nii soojuskadude kui ka pingestabilisaatori sujuvamaks ja tulemuslikumaks tööks oleks soovitav antud tööstusel probleemiga tegeleda, vähemalt nii palju, et saaks harmoonikute kogumoonutuse pinges minimaalselt 7-8% THD_U juurde, mis vastab ka standardi EVS-EN-50160-le. Soovituslik võiks THD_U jääda 5% juurde.

3.8 Aktiivfiltri paigaldus harmoonikute filtreerimiseks.

Aktiivfilter on seade, mis ühendatakse paralleelselt mittelineaarsete tarbijatega. Seade mõõdab pidevalt läbi voolutrafode ja pinge-otste tarbija koormust, sealjuures harmoonikute voolu. Seade ise süstib samuti võrku, nagu mittelineaarsed tarbijad kõrgemaid harmoonikuid, aga seekord teeb ta seda võrdselt olemasolevate harmoonikutega vastasfaasis. Sellisel moel kaotatakse ära mittelineaarsete tarbijate poolt tekitatud kõrgemad sagedused. [7]



Joonis 3.11. Kolmefaasilise aktiivfiltri elektriskeem

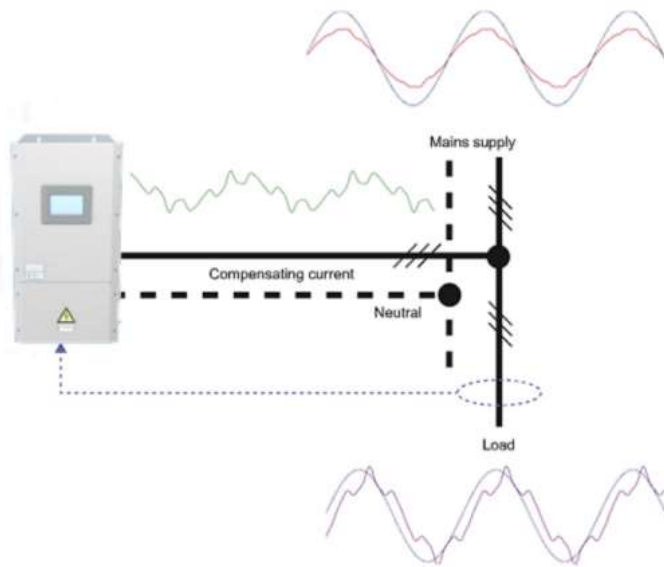
L_R – liinireaktor

C_R – kõrgesagedusega kondensaator filtreerimiseks

VT_{1-6} – IGBT komponendid

VD_{1-6} – kiired isetaastuvad diodid

C – elektrolüüt-kondensaator

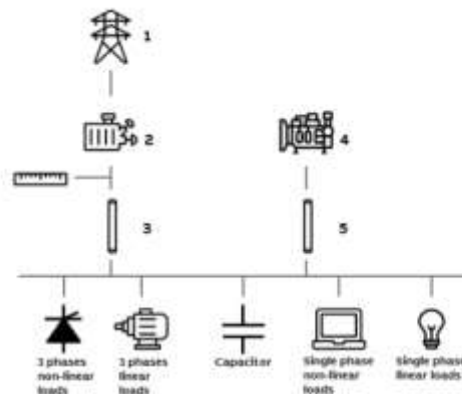


Joonis 3.12. Võrgufiltreerimine kõrgematest harmoonikutest 0.4 kV 90A seade [11]

Aktiivfiltri paigaldamise põhimõte on toodud joonisel 3.12. Seade on paigaldatud paralleelselt mittelineaarse koormusega, tarbitav koormus omab kõrgemaid harmoonikuid, aktiivfilter annab võrku vastavalt mõõdetud koormusele omakorda kõrgemaid sagedusi vastandfaasis, sellisel moel puhastatakse toitepoolset võrku, kuna sageduste siinused ühtivad. [11]

Kasutades ABB PQFSize tarkvara simuleerime vajaliku aktiivfiltri, võttes THD_U eesmärgiks 7%, tegelikult võiks olla eesmärk isegi väiksem 4-5% THD_U , antud juhul lähtutakse tootja soovist.

PQFLink simulatsiooni esitatud parameetrid, simuleerimaks aktiivfiltrit



1 - Network characteristics

Frequency: 50 Hz
 Primary voltage: 10 kV

Temperature: ≤ 30 °C
 Altitude: ≤ 1000 m

2 - Transformer(s) characteristics

Secondary voltage (V): 400 V

Size (kVA)	
1000	5.5

3 - Transformer(s) cables characteristics

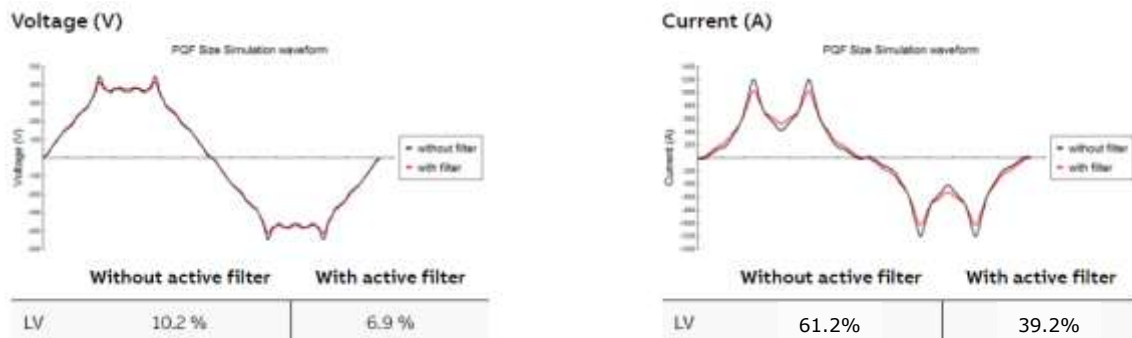
Cable length: 30 m

Cable section/phase: 240 mm²

Nr Parallels: 4

Joonis 3.13. PQFlink simulatsioonis tekitatud tootmise ühejooneskeem vastavalt näidistootmise andmetele

Lisame programmi objektiandmed joonisele 3.13 ja mõõdetud harmoonikute andmed punktist 3.4, saame hetketulemused, mis on simuleeritud ja sarnanevad ka realselt mõõdetud tulemustele. Simulatsioon näitab tulemusi ilma aktiivfiltrita ja meie soovitud tulemus tuua THD_U vähemalt 7%, mida tootja lubab ka seadmele.



Joonis 3.14. PQFLink poolt simuleeritud tulemus ilma ja koos kolmeefaasilise aktiivfiltriga

6 - Conclusions

The following ABB active filter is proposed:

PQFS-M09

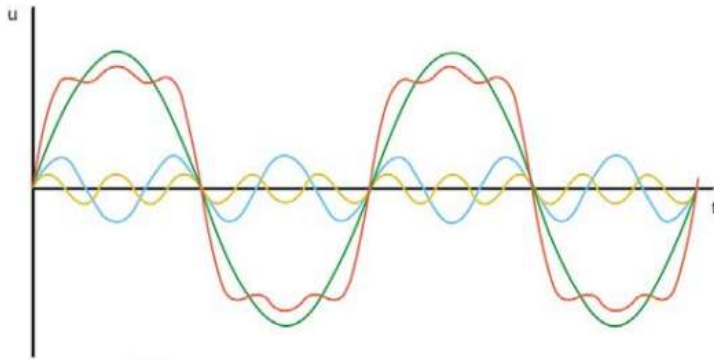
Three wire connection

Joonis 3.15. PQFLink poolt pakutud aktiivfiltri suurus saavutamaks vähemalt 7% THD_U .

Et saavutada 7% THD_U mõõdetud tulemuste põhjal, soovib tarkvara paigaldada seadme mudelinimetusega PQFS-M09, antud aktiivfilter on välja toodud ka joonisel 3.15. Antud mudel on tootja informatsiooni järgi 90 A aktiivfilter.

Seega saavutamaks 7% THD_U ja tuua harmoonikute tase standardis EVS-EN-50160 välja tooduga vastavusse, tuleks paigaldada vähemalt 90 A aktiivfilter süsteemi, tõstmaks pingestabilisaatori mõõtetäpsust pingelohkude kompenseerimiseks. Tegelikult

võiks olla eesmärk isegi suurem – tuua THD_U vähemalt 5%, mis on tootmisettevõttes rahuldav olukord.



Joonis 3.16. Harmoonikute osakaal visualiseerituna [12]

- - Nimisagedus 50 Hz ilma harmoonikuteta,
- - Pinge harmoonikud kolmandas 150 Hz,
- - Pinge harmoonikud neljandas 200 Hz,
- - Pingesiinus koos harmoonikutega.

Harmoonikute osakaal on võimalik arvutada valemiga 3.3 pingele ning 3.4 voolu kohta.

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (U_h)^2}}{U_1} \quad (3.3)$$

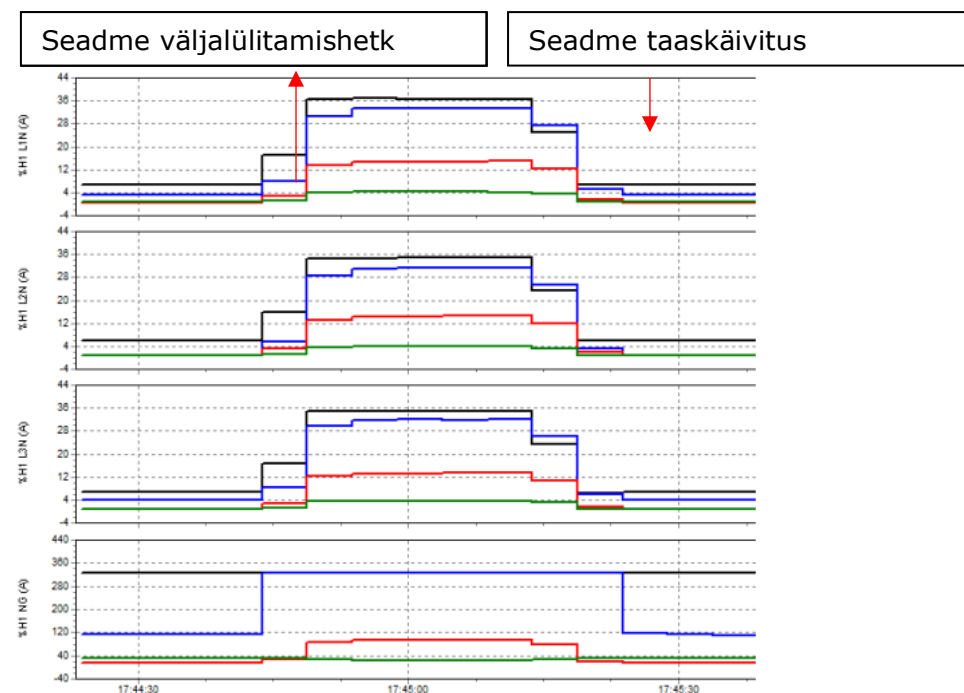
$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I_h)^2}}{I_1}, \text{ kus} \quad (3.4)$$

Kus U_1 , I_1 on efektiivväärtused.

U_h , I_h üksikute harmoonikute komponentide efektiivväärtused



Joonis 3.17. Näidispaigaldus aktiivfiltritele ettevõttes, filtrite koguvõimsus 200 kVA, nimipingega 400 V.



Joonis 3.18. Harmoonikute voolu osakaal seadmete töötamise korral ja seadmete väljalülitamisel

Jooniselt 3.18 näeme näidislülitust, kus on installeeritud aktiivfilter. Aktiivfiltri töötades jääb THD_I valem 3.4 tase 6-7% juurde, filtri välja lülitades tõuseb THD_I tase 32-36% juurde.

3.9 Pingelohkude mõõteandmete analüüs võrguandmetest

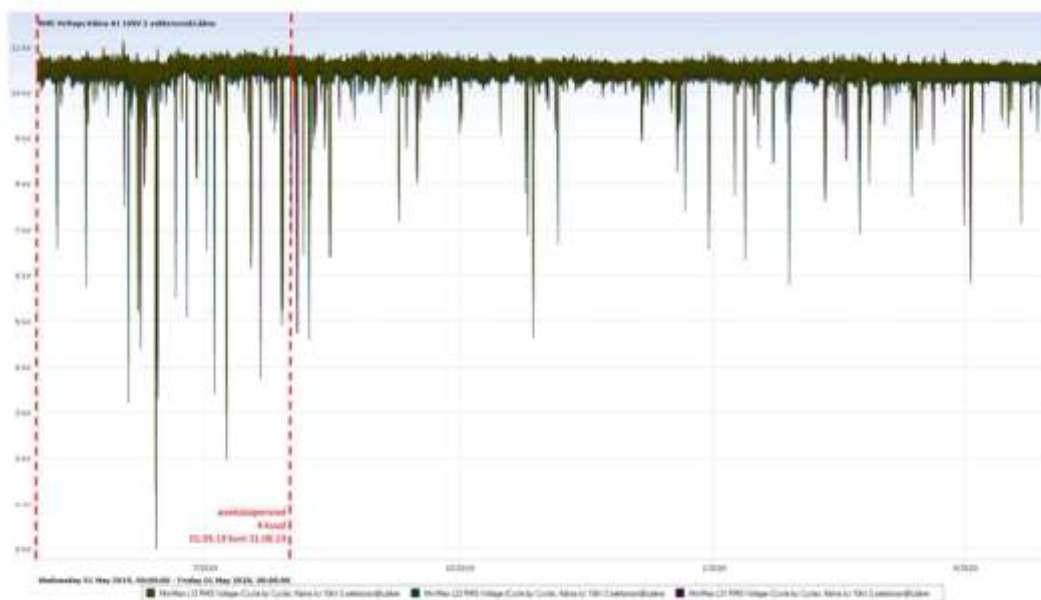
Hindamaks pingelohkusi ja pingestabilisaatori tasuvust antud tootmisettevõtte näitel, tuleb analüüsida pingelohkusi pikemas ajavahemikus, vähemalt kolme kuu pikkusel perioodil. Pingelohkude pikemaajaliseks analüüsimiseks on soovituslik kasutada võrguettevõtja andmeid, andmed salvestatakse liitumispunktides pikaajaliselt võrguettevõtja poolt. Teine võimalus on kasutada statsionaarseid analüsaatoreid mis installeeritakse nii liitumispunktidesse kui ka tarbijate vahetusse lähedusse. Tegemist võib olla nii mikroprotsessoriga multifunktsionaalsete arvestite, multimeetrite või analüsaatoritega, kõik sõltuvalt vajadusest ja mõõtetäpsusest. Seadmed on võimelised salvestama lisaks pingele, voolule, sagedusele, võimsustele, kõrgemate sageduste ka pingelohkusi ja nende sügavusi. Seda kõike juhul kui seadet toidetakse katkematust toiteallikast (UPS või pingestabilisaator), madala pingel korral salvestab seade toimunud

olukorra mida on võimalik hiljem analüüsida. Selliste mõõteriistade korral saame vajaliku ajavahemiku analüüsimeks pingelohkused, nende toimumise sagedusi, pingelohu sügavust jne.



Joonis 3.19. Lokaalne kilbi analüsaator UMG512 [13]

Analüsaator, mis näidatud joonisel 3.19, salvestab oma mõõteandmed juba arvutisse lokaalselt või siis veebipõhisesse keskkonda. See annab pideva ülevaate nii võrgukvaliteedist kui ka tarbitavatest andmetest ilma, et tuleks teostada kordumõõtmisi teisaldatava mõõteseadmega. Tänapäeval kasutatakse analoogseid lahendusi aina rohkem, lahendus on abiks tootmisettevõtte igapäevaseks käiduks.



Joonis 3.20. Mõõdetava ettevõtte pingelohkude väljavõte 01.05.2019-01.05.2020 Elektrilevi poolt edastatud andmed KP liitumispunktis

Võrguettevõtjapoolne pingelohkude andmed, mis salvestatakse läbi kaugloetava arvesti.

Joonisel 3.20 on näha pingemuutusi perioodil 01.05.2019-01.05.2020.

Andmete mahu tõttu vaatame täpsemalt perioodi 01.05.2019-31.08.2019, kus esines keskmisest rohkem pingemuutusi.

Möötepunkt: Käina AJ

Nimipinge: 10 kV

Periood: 01.05.2019-31.08.2019

Sündmusi: 50tk

Märkus: pinge kõikumised Un kuni 10% ei ole välja toodud.

Tabel 3.2. Pingelohkude kujunemine protsentuaalselt ja ajaliselt

Pinge langus [Un]	Kestus [ms]						Katkestus	Rikete jaotumise osakaal	
	0-100	101-200	201-300	301-400	401-600	601 ja pikem		Σ	Osakaal %-des
Un = 0, katkestus							1	1	2
Un alla 50%	2	7				1		10	20
Un -40% kuni -50%		7	2	1				10	20
Un -30% kuni -40%	1	5	1	1	1			9	18
Un -20% kuni -30%	2							2	4
Un -10% kuni -20%	4	11		1	1	1		18	36

Antud tabeli 3.2 põhjal ja tootja Ortea 1.5 Oxygen 15-50 seadme jõudluse järgi saame teha järeldused.

100%-ne väljundpinge saavutatakse seadmega Oxygen 15-50 tabel 2.3 põhjal juhtudel, mis jäävad piiridesse kuni -50% nimipingest ja mille kestus on väiksem kui 1 min, on tabeli 3.2 põhjal 78% olukordadest.

Olukorrad, kus pinge on alla 50%, mida esineb 20% juhtudest, nendes olukordades ei ole täpselt tuvastatav, kui sügav on pingelohk. Kui ta jääb kuni 60% nimipingest, suudab seade Oxygen 15-50 tabel 2.3 põhjal ikkagi tagada 90%-lise väljundpinge ja see tootmiseseadmeid ei seiska ja jääb lubatud +/-10% standardisse. Kuna pole täpselt teada pingelohu sügavust protsentuaalselt, saame öelda, et vähemalt 78% olukordadest suudab pingestabilisaator tagada tulemuse, mis ei mõjuta tootmiseseadmeid.

Ühel korral toimub katkestus, katkestuse korral ei ole seadmete seiskumise vältimine pingestabilisaatoriga tagatud. Olukorras kus nimipinge jääb alla 60%, sellisest jääkpingest ei piisa enam, et toita IGBT plaate ja PCB-d. See tähendab, et pingestabilisaator läheb standby režiimile ja väljundpinget enam ei stabiliseeri. Seega

saab edastatud info põhjal väita, et 78% olukordadest täidab seade eesmärgi, olukorras kus nimipinge langeb alla 60%, seade enam ei tööta.

4 Seadme kasutamise majanduslik analüüs

4.1 Tootepaigaldusest tulenev kulu

Seadme majanduslik tasuvus tootmisettevõttes arvutatakse eelkõige katkestuste järgi ja on igas tootmises erinev, sõltudes toodetava toote tüübist, materjalist, liinidest, katkestuste arvust seadmetes, elektroonika kasutusest ja seadme enda efektiivsusest. Vaatleme näidisarvutust ettevõttest, kus teostati elektrimõõtmised. Tabel 3.1 alusel oli seadme suuruseks valitud 630 kVA koos vähemalt 10% varuga, seega arvestame kulud, mis tekivad 630 kVA suuruse pingestabilisaatori paigaldamisel uuritavasse tootmisettevõttesse. Kogukulud 630 kVA seadme paigaldamisel sisetingimustesse on toodud tabelis 4.1. Antud ettevõttes oli majanduslikult otstarbekam paigaldada üks suur pingestabilisaator seadmepargi ette, mitte jagada liinid ja seadmed gruppideks ja toita neid läbi üksikute eraldiseivate pingestabilisaatorite. Seda põhjusel kuna seadmepark koosneb 15 ekstruuderist ja 20 konverteerimisseadmest, üksikute seadmete paigaldus iga plasti käitleva seadme ette oleks majanduslikult kallim, kui üks suur seade kogu masinapargile uuritavas olukorras.

Lõputöös kasutatud tootmisettevõtte tegeleb plastitootmisega, täpsemalt prügikotid, erinevad kilekotid, plastiklindid ja plastiktorud. Katkestustest tekkiva kulu saame otsekulust mis tekib materjali hävinemisest seadmete lühiajalise seiskumise tõttu, lisaks tööaja kadu ja kaasnev toodangu puudus.



Joonis 4.1. Ettevõtte osaline seadmepark

Fotolt näeme ühte ekstruuderit ja tootmises kasutatavat juhtpaneeli.

Tabelis 4.1 on toodud indikatiivne hind 630 kVA pingestabilisaatorile ja paigaldusele. Tabelis toodud kulud on ligikaudsed ning ei ole otseses vastavuses tootja hinna- ja müügistrateegiaga. Samuti on toodud ka välja 90 A aktiivfilter koos paigaldusega, kuna meie uuritavas tootmises tagamaks pingestabilisaatori täpsus tuleb lahendada ka hetke pinge harmoonikute olukord.

Tabel 4.1. Pingestabiliseerimisest tingitud kulud

Nr.	Tootegrupi nimetus	Kogus	Maksumus	Kokku,eur
1	Pingestabilisaator 630 kVA	1tk	86000/tk	86000
2	Toitekaabel 3x(4xAXPK300mm ²)+kaabliredel 60x600	30m	15.30eur/m	459
3	Transport	1tk	2000/tk	2000
4	Tööjõud, paigaldus/häälestus	120h	40eur/h	4800
5	Aktiivfilter 90 A PQFS koos toitepunkti väljaehitamise	1tk	12800/tk	12800
			Kokku:	106 059

4.2 Pingelohkudest tekkiv kulu tootmises

Pingekatkestustest tekkiv ligikaudne kulu tootmises, andmed on edastanud tootmisettevõtte.

01.05.2019-31.08.2019 juhtumeid 50tk 3.2 tabel, eeldame et aasta peale on juhtumeid ligikaudu arvestades ka SEMIF47 joonis 1.2 standardit ligikaudu 15tk mis mõjutavad tootmist.

Tabel 4.2. Pingelohkudest tulenevad kulud

Nr.	Tootegrupi nimetus	Kogus	Maksumus	Kokku,eur
1	Materjali kulu seadmete seiskumisest, seadmeid töös üheaegselt ligikaudu 20tk.	15katkestust	4000	60000

2	Tööjõukulu mis tekib olukorra taastamiseks (tehnik, operaator, töödejuht, tootmisjuht, kontor ja transport).	500h	40eur/h	20000
3	Toodangu puudus, järgmise toote tootmise hilinemine.	500h	4200	4200
4	Remondikulud, seadmete riknemisest tekkivad kulud, uued seadmed (kontrollerid, masinad, elektroonika jne).	1	6000	6000
			Kokku:	90200

Pingestabilisaatori tasuvusaeg tuleb eelkõige pingelohkudest tingitud tootmise seisakutest ja seal tekkivatest kuludest tabel 4.2.

Tabel 4.3. Pingestabilisaatori paigaldusest tekkivad lisakulud ühe aasta arvestuses.

Nr.	Tootegrupi nimetus	Kogus	Maksumus	Kokku,eur
1	Pingestabilisaatori hooldus kord aastas	1tk	800eur	800eur
2	Tekkiv soojuskadu pingestabilisaatorist	9 kW/h;5 kW/h	6059eur	6059eur
3	Tootmisruumi rent mis on kaetud seadmega.	5eur/m2	18.2eur	18.2eur
			Kokku:	6877.2

4.3 Tasuvusaeg

Seadme efektiivsus tootja andmete järgi on >98%, mõõtmistulemuste põhjal on võetud keskmiseks koormuseks 400 kVA vahemikus 06:00-18:00, sealt edasi langeb koormus 250 kVA-ni.

Elektrihind 6-35 kV liinil on 1,16senti/kWh ilma käibemaksuta päeval ja 0,67 senti kWh öösel ilma käibemaksuta. Arvestades, et 10 tundi päevas tarbitakse päevase hinna järgi

soojuskaoga 9 kWh, 6 tundi päevas tarbitakse päevase hinna järgi soojuskaoga 5 kWh ja 8 tundi päevas tarbitakse öise hinnaga ja soojuskaoga 5 kWh. [8] Saame päeva keskmise soojuskao kulu päeval 16,6 EUR ja aastaseks kuluks 6059 EUR. Seadme suurus ruutmeetrites on 3,64m² [4].

Saame aastaseks ligikaudseks kuluks seadme seisukohalt 6877,2EUR, seadme eluiga on ligikaudu 10 aastat.

Võttes arvesse seadme maksumust koos aktiivfiltriga 106 059 EUR ja aastase kulu 6877,2 EUR ja pingelohkudest tekkiv kulu tootmises 90 200 EUR, saame väita, et seadme tasuvusaeg jääb antud näite põhjal vahemikku 14-16 kuud.

KOKKUVÕTE

Antud lõputöö eesmärk oli kirjeldada uuritava tootmisettevõtte põhjal pingestabilisaatori valikut sõltuvalt elektrimõõtmistele ja võrguandmetele, sealjuures tuues välja ka seadme tasuvusaeg. Esiteks vaadeldi seadme vajadust ja mõningaid pingekvaliteedi näitajaid tootmise madalpingevõrgus. Edasi vaadati otseseid võrgumõõtmisi, mis sai tehtud ühes tootmise liitumispunktis tootmise madalpingevõrgus. Samuti analüüsiti võrguettevõtja poolt edastatud andmeid ning hinnati saadud mõõtetulemusi. Seadme valiku tegemisel lahendati ka mõõtmistel tuvastatud häiringutest tingitud probleem, kirjeldati häiringuid üldiselt kui ka häiringutest kaasnevaid probleeme tootmisettevõttes. Häiringud mõjutavad otseselt ka pingestabilisaatori tööd, kuna mõjutavad seadme pingemõõtmisi ja täpsust, seda sellepärast et tootja lubab vastavat reageerimist ja täpsust harmoonikute pinge kogumoonutuseks kuni 8%, saadud mõõteandmete järgi ületati antud näitajad. Üheks võimalikuks lahenduseks pakuti töö käigus aktiivfiltrit, aktiivfiltri suuruse leidmiseks kasutati ABB tarkvara PQFLink. Eesmärgiks võeti aktiivfiltri suuruse valikul saavutamaks harmoonikute pingetase alla 8% THD_U . Tasuvusaeg arvestati seadmete maksumuse järgi ning tekkiva aastase kulu järgi. Tööst järeldub, et pingestabilisaatori tasuvusaeg on sõltuvuses pingelohkude esinemisega nii võrgus kui ka tootmisvõimsustest ja seadmetest. Mida rohkem esineb pingelohkusi võrgus, seda tasuvam tuleb ka pingestabilisaator.

Antud näite põhjal on tasuvusaeg väga lühike, 14-16 kuud. Sellisele tulemusele ei pruugi iga projektiga jõuda, pingelohkude esinemine valitud liitumispunktis oli suur. Hinnates ka pingelohkude sügavust ja näitena toodud pingestabilisaatori tehnilisi parameetreid oli näha, et tänapäeval pakutavad pingestabilisaatorid on võimelised kompenseerima väga suure osa võrgus esinevaid pingelohkusi. Seadmed suudavad kompenseerida pingelohkusi kuni 50% nimipingest andes välja 100%-se väljundpinge ühe minuti jooksul. Uuritud võrguandmete järgi kompenseerib valitud seade vähemalt 78% esinevatest pingelohkudest uuritavas tootmises.

Võib öelda, et pingestabilisaator tasub ennast ära ja suudab kompenseerida võrgus tekkivatest pingelohkudest enamuse, vaatamata sellele tuleb vaadata iga olukorda individuaalselt, kas investeerida pingestabilisaatorisse või mitte. Lõppotsuse määrab seejuures ettevõtte strateegia ja tasuvusaja poliitika.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] R. Teemets, Ainekursus Elektrivarustus 2011 ainematerjal Elektri kvaliteet konspekt. – 384 lk.
- [2] T. Vinnal, A. Kilk, Aruanne Nr 19062 Toitepinge kvaliteet Eesti 0.4kV madalpingevõrkudes ja tarbijapaigaldiste liitumispunktides. – 54 lk.
- [3] Artikkel erinevatest pingestabilisaatorite tüüpidest Newtravedars.ru. - <https://newtravelers.ru/et/televizory-lg/chto-daet-stabilizator-napryazheniya-stabilizator-napryazheniya-i-stabilizator.html> Vaadatud 12.01.2021
- [4] Ortea tootja staatilise pingestabilisaatori tehniline kirjeldus - https://www.ortea.it/en/categorie_prodotti/sag-compensator-en/ Vaadatud 18.01.2021
- [5] CT-ORTEA OXY-02EN-20201105 manual. - <https://www.ortea.it/wp-content/uploads/2020/11/CT-ORTEA-OXY-02EN-20201105.pdf> Vaadatud 20.01.2021
- [6] Ortea tootja praktilised näited <https://www.voltagesag.ortea.com/assets/Oxygen%20-%20case%20study.pdf> Vaadatud 21.01.2021
- [7] Artikkel Science Direct aktiivfiltrid - <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/active-power-filter> Vaadatud 25.01.2021
- [8] Elektrilevi võrguteenuste hinnakiri - https://www.elektrilevi.ee/doc/6305157/kliendile/el_hinnakiri_vorguteenused_01112017_est.pdf vaadatud 02.13.2021 Vaadatud 12.02.2021
- [9] EVS-EN 50160:2010 Avalike elektrivõrkude pinge tunnussuurused. – 44 lk.
- [10] Eesti ettevõtete elektritarbimise uurimine ja soovitude väljatöötamine tarbimise optimeerimiseks T. Vinnal Doktoritöö. – 216 lk.
- [11] Ortea tootja aktiivfiltri Activematic manual - <https://icar.ortea.com/wp-content/uploads/2019/07/MAT212-feb18-ACTIVEmatic-FA40-EN.pdf> Vaadatud Vaadatud 20.02.2021
- [12] Tootja ABB aktiivfiltri tööpõhimõtte kirjeldus - <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1SXP984001L0200&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> Vaadatud 10.04.2021
- [13] Tootja Janitza võrguanalüsaatorid - <https://www.janitza.com/files/download/Datenblaetter/Janitza-Datenblatt-Kapitel02-UMG-512-en.pdf> Vaadatud 15.04.2021