TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Alternatiivsete tehniliste lahenduste kasutamine pingeprobleemide lahendamisel madalpingevõrgus

UURIMISTÖÖ LEP16048 Vahearuanne

Argo Rosin (projektijuht),

Tallinn 2017

UURIMISTÖÖ LEPING nr LEP16048 Alternatiivsete tehniliste lahenduste kasutamine pingeprobleemide lahendamisel madalpingevõrgus

Projekti tellija: Elektrilevi OÜ
Reg. kood 11050857
Aadress: Kadaka tee 63, 12915 Tallinn

Projekti täitja: Tallinna Tehnikaülikool Elektroenergeetika instituut
Reg. kood 74000323
Aadress: Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn

Projekti algus: 20. aprill 2016
Projekti lõpp: 27. veebruar 2017

Projekti juht: Argo Rosin, vanemteadur, tehnikateaduste doktor
Projekti põhitäitjad: Toomas Vinnal, Hardi Hõimoja, Victor Astapov, Helmuth Biechl, Kuno Janson
Projekti tellijapoolsed eksperdid/konsultandid/täitjad: Ott Antsmaa, Kaija Vill, Andres Pihlak

Sisukord

1 Madalpingevõrk ja pingeprobleemid ... 6
1.1 Madalpingevõrgu pingeprobleemi olemus ning selle teoreetilised alused ... 6
1.1.1 Elektri varustuskindlus ... 7
1.1.2 Toitepinge parameetrite mõju elektriseadmetele ... 8
1.1.3 Ideaalne ja reaalne toitepinge ... 9
1.1.4 Tarbija mõju pinge kvaliteedile ... 9
1.1.5 Pingekvaliteedi ja tarbijate koormuste mõõtmine ... 11
1.1.6 Pingekvaliteedi parameetrid ... 12
1.1.7 Toitepinge suurus ja pingenivoo ... 14
1.1.8 Toitepinge sagedus ... 19
1.1.9 Siirdeliigpinged ... 19
1.1.10 Võrgusageduslikud pingelohud ja -muhud, sh lühiajalised katkestused ... 20
1.1.11 Toitepinge ja –voolu harmoonilised moonutused ... 24
1.1.12 Värelus ehk flikker ... 25
1.1.13 Toitepinge asümmeetria ja neutraalinihe ... 26
1.1.14 Kolmefaasiliste trafode mähiste ühendusskeemi mõju pinge kvaliteedile ... 29
1.2 Pikaajalise võrguinvesteeringu tegemise riskid ja puudused Eesti hajaasustuse rahvastikuprotsesside taustal ... 31
1.2.1 Pikaajalisi investeeringuid mõjutavad tegurid ... 31
1.2.2 Varustuskindluse piirkondade lähenemisviis ... 32
1.2.3 Pikaajalised võrguinvesteeringud rahvastikuprotsesside taustal ... 33
1.2.4 Kohaliku hajatootmise areng ... 39
1.3 Elektrilevi OÜ hajavarustuspiirkonna madalpingevõrgu tüüpstruktuurid ja tüüpsed tarbimiskohtade arvud ... 42
1.3.1 Hajapiirkonna madalpingevõrgu fiidrite analüüs ... 44
1.3.2 Hajapiirkonna pingeprobleemse madalpingevõrgu analüüs ... 48
2 Ülevaade alternatiivsetest meetoditest pingeprobleemi lahendamisel mobiilsete seadmetega ... 56
2.1 Akudel põhinev energiasalvestus ... 57
2.1.1 Enamlevinud akude liigid ... 58
2.1.2 Akude jada-, rööp- ja segaühendus ... 61
2.1.3 Akude talitlus- ja laadimisviisid ... 61

2.1.4 Laadimiskiirused ja nende kasutamine ... 63
2.1.5 Temperatuuri mõju akude laadimisel- jatühjendamisel ... 63
2.1.6 Juhised akude hoiustamiseks ja ladustamiseks ... 65
2.1.7 Juhised laadimisele ... 65
2.1.8 Olulisemad akude eluiga mõjutavad tegurid ... 65
2.1.9 Katkematu toite allikad (UPS) ... 66
2.1.10 Soovitused UPSide kasutamisel ja valikul ... 70
2.1.11 Akude ja energiasalvestuslahenduste hinnad ... 70
2.2 Elektromagnetilised pingetõstjad ... 73
2.3 Elektromehaanilised ja elektroonilised pingestabilisaatorid ... 75
2.3.1 Sujuvalt muudetava väljundpingega pingestabilisaator ... 75
2.3.2 Astmeliselt reguleeritava väljundpingega pingestabilisaator ... 78
2.3.3 Hübriidsed pingestabilisaatorid ... 81
2.3.4 Soovitused pingestabilisaatorite kasutamiseks ... 82
2.4 Dünaamilised pingeregulaatorid ehk dünaamilised pingetaastajad ... 83
2.4.1 Tööpõhimõte ... 83
2.4.2 DVR alamkoostud (komponendid) ... 84
2.4.3 Energiasalvestita DVR ... 85
2.4.4 Energiasalvestiga DVR ... 87
2.4.5 Kompensatsioonimeetodid ... 89
2.4.6 Ülikondensaatorpatarei energiamahutavuse vajaduse arvutus DVR seadmele ... 91
2.5 Faasikoormusi ühtlustavad seadmed ... 92
2.5.1 Tasakaalustusseadme kasutamine praktikas ja senised saadud kogemused ... 95
2.6 Muud seadmed ja lahendused ... 97
2.6.1 Staatilised sünkroonkompensaatorid ... 97
2.6.2 DVR ja STATCOM toimekiirusest ... 99
2.6.3 Ferroresonantstrafod ... 99
2.7 Majandusliku otstarbekuse hindamine ... 100
3 Salvestusseadmete tüüpsed moodulid välitingimustes pingeprobleemide lahendamiseks ja leevendamiseks ... 105
3.1 Väikesed madalpinge salvestusseadmed ... 105
3.2 Suured madalpinge salvestusseadmed ja nende komponendid ... 106

3.2.1 Perspektiivsete salvestusseadme tehnilised parameetrid ja näidisnõuded 108
3.2.2 Tehnilised kirjeldused juhtimisele, andmehõivele ja andmesidele..... 111
4 Lahendusalternatiivide tõepärasuse võrdlus 114
4.1 Objektide tehniline kirjeldus 114
4.1.1 Objekt 1, Leanderi 10/0,4 kV alajaama F4..... 114
4.1.2 Objekt 2, Vastja 10/0,4 kV alajaama F2..... 115
4.1.3 Objekt 3, Tolla 10/0,4 kV alajaama F3..... 117
4.1.4 Mõõdetud objektide tarbimise võrdlus..... 118
4.1.5 Objektide varustuskindlus 120
4.2 Objektide pinge kvaliteedi analüüs 120
4.2.1 Analüüsi tulemused Objektil 1, Leanderi 10/0,4 kV alajaama F4..... 120
4.2.2 Analüüsi tulemused Objektil 2, Vastja 10/0,4 kV alajaama F2..... 126
4.2.3 Analüüsi tulemused Objektil 3, Tolla 10/0,4 kV alajaama F3 130
4.3 Lahendusalternatiivide võrdlus 134
4.3.1 Simulatsiooni tulemused Objektil 1, Leanderi 10/0,4 kV alajaama F4..... 135
4.3.2 Simulatsiooni tulemused Objektil 2, Vastja 10/0,4 kV alajaama F2..... 137
4.3.3 Simulatsiooni tulemused Objektil 3, Tolla 10/0,4 kV alajaama F3 139
4.3.4 Järeldus simulatsioonidest 140
5 Soovitused sobiva tehnilise lahenduse valikuks..... 141
5.1 Seadmete peamised eripärad millega hankel arvestada 141
5.2 Lahenduse valikuks vajalike algandmete määramine 141
5.3 Algoritm tehnilise lahenduse valikuks pingeprobleemi lahendamisel..... 142
5.3.1 Algandmete analüüs ja eelhinnang 142
5.3.2 Mõõtmised ja pingeprobleemi detailne analüüs 143
5.3.3 Pingetasandusseadme valik ja asukoht..... 143
5.4 Lihtsustatud pingeprobleemide lahendusalgoritmid kirjanduses..... 144
6 Kasutatud kirjandus..... 146

1 Madalpingevõrk ja pingeprobleemid

1.1 Madalpingevõrgu pingeprobleemi olemus ning selle teoreetilised alused

Elektrivõrk on seadmete ja rajatiste kogum elektrienergia ülekandmiseks ja jaotamiseks. Madalpingevõrk on osa elektrivõrgust, kus võrgu nimipinge on alla 1 kV, Eestis enamasti 230/400 V. Ideaalsel juhul peaks pinge väärtus vastama nimipingele, tegelikkuses erineb pinge väärtus elektrivõrgu üksikutes osades. Samuti erinevad ka teised pinge parameetrid ideaalse siinuskujulise sümmeetrilise pinge parameetritest.

Antud töös vaadeldakse pingeprobleeme ja nende leevendamise võimalusi ühendatud elektrivõrgus. Eraldatud või saarestunud elektrivõrgus, näiteks Eesti väikesaartel on soovituslikud normid pinge kvaliteedile tunduvalt leebemad kui ühendatud elektrivõrgus. See on põhjendatud, kuna väikeses võrgus on tehniliselt keerukas hoida pinge parameetreid (näiteks sagedust) kindlas vahemikus.Millal on tegemist pingeprobleemiga? Rangelt võttes on pingeprobleemiga tegemist juhul, kui pinge parameetrid ei vasta pingestandardi EVS-EN:50160 nõuetele. Samas ei ole Eesti seadusandluse järgi jaotusvõrgu ettevõtetel kohustust tagada standardikohast pingekvaliteeti. Majandus- ja kommunikatsiooniministri (MKM) 06.04.2005 määrus nr 42, „Võrguteenuse kvaliteedinõuded ja võrgutasude vähendamise tingimused kvaliteedinõuete rikkumise korral“ sätestab, et jaotusvõrgu pingekvaliteedi tagamisel on soovitatav lähtuda standardist EVS-EN:50160. Elektrilevi OÜ on võtnud endale kohustuse tagada standardi EVS-EN 50160 nõuete täitmine aeglaste pingemuutuste osas.

Praktikas võib esineda olukordi, kus pinge igal ajahetkel küll ei vasta kõigile standardis toodud parameetritele, kuid see jääb praktiliselt märkamatuks nii tarbijale kui ka võrguettevõttele. Seega võib väita, et pingeprobleemi ei ole või antud juhul on probleem väheoluline. Teiselt poolt võib esineda olukordi, kus pinge küll vastab standardile, kuid pingekvaliteeti mõjutavate sündmuste tõttu tunneb tarbija häirivat mõju ja seega on selle tarbija jaoks olemas pingeprobleem.

Seega, oluliseks **pingeprobleemiks** võime lugeda olukorda, kus tarbija või võrguettevõte märkab probleemi pingega, see probleem on korduv, häiriv ja kutsub esile rahulolematust kas tarbijas või sama madalpingevõrgu naabrites või kui see probleem ei ole küll häiriv, kuid põhjustab arvestatavaid lisakadusid võrguettevõtte madalpingevõrgus.

Kui esineb selliseid probleeme pingega, siis võib öelda, et toitepinge ei ole kvaliteetne. **Toitepinge kvaliteet** on osa laiemast valdkonnast - **elektrivarustuse kvaliteet**. See lai valdkond hõlmab nii tehnilisi, majanduslikke kui ka õiguslikke küsimusi. Osa neist on Eestis reguleeritud elektrituruseadusega, elektrituruseaduse alusel kehtestatud määrustega ning vastavate standarditega, osa aga võrguteenuse osutaja ja ostja vaheliste lepingutega ning osa elektrienergia ja võrguteenuse hinnakujundusega. Tavaliselt eeldatakse, et toitepinge kvaliteet turuosalise liitumispunktis võrguettevõtjaga peab vastama standardile EVS-EN:50160, kuid seejuures ei eristata selle turuosalise mõju toitepinge parameetritele ja ei tooda välja vastutavat osapoolt.

Toitepinge kvaliteet tarbija liitumispunktis sõltub järgmistest teguritest.

- Tarbijate koormused (aktiiv- ja reaktiivvõimsus, liinivoolud, voolutõuked, voolu harmoonilised moonutused, liinivoolude tasakaalustatus kolmes faasis).
- Jaotusvõrgu seadmete parameetrid - läbilaskevõime (vastavalt elektrituruseadusele), võrgu aktiiv- ja induktiivtakistus, pingenivoo keskpingevõrgus, pingete sümmeetria.
- Juhuslikud tegurid (loodusnähtused, avariid kas tarbija elektrisüsteemis või keskpingevõrgus, lülitused kesk- ja ülekandevõrgus).
- Teiste tarbijate koormused ja avariid samas või lähedases MP võrgupiirkonnas.

Tarbijate koormus (koormusvool) on ajas juhuslik suurus ja muutub pidevalt. Seetõttu on madalpingevõrgus, kuhu on ühendatud mitu tarbijat keeruline täpselt prognoosida eri faaside koormusvoolu ajas. Seega saab lähtuda tarbijate tõenäolistest tarbimismustritest ning koormuste jagunemise tõenäosusest faaside vahel. Elektrivõrk planeeritakse lähtuvalt tõenäolistest koormustest MP fiidri lõikes ning pingekvaliteet ei pruugi teatud eriolukordades olla tagatud (näiteks juhul kui sama MP fiidri tarbijad lülitavad koormuse ühte faasi).

Toitepinge parameetrid mõjutavad samaaegselt nii tarbijaid kui ka elektrivõrku. Mõju tarbijatele avaldub kasutusvõimsuse muutustes, täiendavates võimsuskadudes ja tarbija seadmete ning tarvitite töö häiringutes. Mõju elektrivõrgule avaldub peamiselt võimsuskadudes MP liinides ja trafodes.

1.1.1 Elektri varustuskindlus

Tarbija seisukohalt on oluline **elektri varustuskindlus** ehk **toitepinge pidevus**, eriti just etteteatamata katketuste arv ja summaarne ajaline kestus. Võrgulepingus tuuakse tavaliselt välja riketest põhjustatud (etteteatamata) katkestuste lubatud summaarne kestus aastas ja ka üksiku rikkest põhjustatud katkestuse maksimaalne kestus, mille väärtused on määratud MKM 06.04.2005 määruses nr 42. Toitekatkestuste koguarv ja esinemissagedus pole seejuures fikseeritud. Ootamatuid katkestusi põhjustavad kõige sagedamini loodusnähtused, kooskõlastamata kaevetööd või võrguseadmete (liinide, jaotusseadmete) rikked.

Varustuskindlust hinnatakse järgmiste näitajate alusel:

- SAIFI ehk toitekatkestuste erisagedus, (SAIFI - *system average interruption frequency index*),
- SAIDI ehk toitekatkestuse keskmine kestus kliendi kohta, (SAIDI -*system average interruption duration index*),
- CAIDI ehk kliendi toitekatkestuse keskmine kestus, (CAIDI -*customer average interruption duration index*).

Varustuskindluse näitajad leitakse elektrikatkestuste statistiliste andmete alusel. Need näitajad võimaldavad võrrelda jaotusvõrke ja võrgupiirkondi ning töökindluse parendamiseks rakendatud meetmete tõhusust.Toitepinge katkestuse tõlgendamise juures on ka üks probleem. Nimelt on toitekatkestus standardi EVS-EN 50160 kohaselt seisund, kus pinge on liitumispunktis väiksem kui 5% lepingulisest pingest. Praktikas selline säte kahjuks ei sobi, sest suure osa elektriseadmete töö katkeb, kui pinge on teatava ajavahemiku (0,1 s) vältel väiksem kui 40% nimipingest.

Eesti elektrituruseaduse alusel kehtestatud võrguteenuse kvaliteedinõuete MKM 06.04.05 määruse nr 42 kohaselt ei käsitata katkestusena kuni 3-minutist elektrivarustuse katkemist avariiautomaatikaseadme toimimise ajal.

1.1.2 Toitepinge parameetrite mõju elektriseadmetele

Kõige olulisemad toitepinge parameetrid on (sagedust antud juhul ei tooda välja, kuna see on ühendatud elektrivõrgus väga püsiv):

- pinge suurus, keskmine pingenivoo ja selle hajuvus;
- pinge sündmused, st pingelohud ja –muhud ning toitekatkestused;
- harmoonilised moonutused toitepinges ja toitevoolus;
- pingete asümmeetria kolmefaasilises pingesüsteemis.

Energiatarbimise seisukohast on kõige olulisem pinge suurus, keskmine pingenivoo ja selle hajuvus. Sellest sõltub tarbitav võimsus ja vool.

Pingesündmused – pingelohud, pingemuhud ja lühiajalised katkestused on sageli tarbija jaoks kõige häirivam probleem. Pingelohud tekivad näiteks mootorite jm seadmete käivituste tagajärjel või on nende põhjused seotud jaotus- või ülekandevõrgus toimuvate sündmustega. Pingelohkude arvu, sügavuse ja mõju vähendamiseks on võimalusi nii tarbijal kui ka jaotusvõrgul.

Toitepinge ja -voolu harmooniliste moonutuste tõttu tekivad täiendavad lisakaod elektrimootorites, trafodes, kaablites ja kondensaatorites ning on võimalikud ka häiringud elektroonikaseadmete ning andmeside töös. Harmooniliste moonutuste vähendamiseks on erinevaid võimalusi, eeskätt kvaliteetsete seadmete valik tarbija elektrisüsteemis ning toiteahela edastusvõime (trafo võimsuse ja liinide ristlõike) suurendamine võrguettevõtte poolt.

Toitepinge kvaliteedi hälbeid põhjustavad tarbijate elektriseadmete endi koormused ja nende koormuste kiired muutused, samuti lülitused ülekande- ja jaotusvõrgus, aga ka avariid ning loodusnähtused nagu äike ja tormituuled. Enamasti jääb toitepinge kvaliteedi mõju elektriseadmetele märkamatuks seni, kuni ei teki häiringuid või tõrkeid nende töös.

Pingeprobleemid väljenduvad tavatarbijale toitekatkestuste või pingelohkude poolt põhjustatud seadmete seiskumise, valgustite heleduse kõikumises, kuid järjest kasvav elektroonikaseadmete kasutamine kodudes ja trend töötada kodus sh kaugtööd tehes, muudab lõpptarbijad sarnaselt ärisektoriga nõudlikumaks pingekvaliteedi osas. Pinge probleemid väljenduvad tänastel kodutarbijatel peamiselt järgmiste seadmete töö katkestuste, rikete või talitluse hälvetena [CHA10]:

- kütte- ja jahutusseadmed
- pumbad
- köögiseadmed
- arvutid, meediaseadmed, andmesideseadmed
- suuremad võimsuskaod nii tarbija elektriseadmetes kui ka elektrivõrgu seadmetes
- väreluse häiriv mõju valgustuses

1.1.3 Ideaalne ja reaalne toitepinge

Ideaalne toitepinge ehk ideaalse kvaliteediga toitepinge on pinge, mida madalpingevõrgus iseloomustavad järgmised omadused:

- pinge sagedus on võrgu nimisagedus, Eestis 50 Hz;
- pinge suurus vastab võrgu nimipingele, Eestis 230/400 V (st faasipinge 230 V ja liinipinge 400 V);
- pinge lühiajalised võrgusageduslikud hälbed (pingelohud ja pingemuhud) puuduvad;
- pinge etteteatamata katkestused puuduvad;
- pinge harmoonilised moonutused on tühised, pingekõver on siinusekujuline;
- faasipinged kolmefaasilises süsteemis on täiesti sümmeetrilised.

Kuigi ideaalset toitepinget praktikas ei esine, võib teatud mööndustega ideaalseks lugeda pinget elektrijaama võimsa generaatori klemmidel. Mida kaugemale võimsast elektrijaamast ja mida lähemale tarbijale minna, seda enam on pingekvaliteet hälbinud ideaalsest (siinkohal ei ole mõeldud väikesi elektritootjaid ja mikrotootmisjaamu).

1.1.4 Tarbija mõju pinge kvaliteedile

Elektrienergia tootmist ja jaotamist saab kõige väiksemate kadudega korraldada juhul, kui tarbijad on elektrivõrgu suhtes ideaalsete omadustega ja jaotatud kogu jaotusvõrgu ulatuses vastavalt võrgu läbilaskevõimele. Ilmselt talitleks kogu elektritootmise ja -jaotamise ahel minimaalsete kadudega, kui generaatorid töötaksid oma parima kasuteguri piirkonnas, ülekande- ja jaotusvõrk oleks optimaalselt koormatud ning koormuseks oleksid ideaalsed tarbijad.

Reaalne tarbija erineb oluliselt ideaalsest. Tarbitav võimsus on ajas kiiresti muutuv, hüplev või pulseeriv ja asümmeetriline (tulenevalt laialt levinud ühefaasilistest elektriseadmetest, mida kasutatakse kodumajapidamistes). Tarbija võimsustegur võib olla väga madal ($\cos\varphi = 0{,}3 \ldots 0{,}7$). Suur osa elektriseadmetest on mittelineaarsed, kus tarbitava voolu moonutustegur võib olla kuni 150%. Tarbija koormus võib olla jaotusvõrgu optimaalse koormuse suhtes liiga väike või liiga suur.

Kõik tarbija koormusvoolu hälbed ideaalsest põhjustavad ka toitepinge kvaliteedi langust. Näiteks, tarbitava voolu suured kõikumised põhjustavad pinge kõikumisi ja värelust. Madal võimsustegur põhjustab lisakadusid liinides ja trafodes ning pingetaseme hajumist. Asümmeetriline koormus põhjustab faasipingete erinevusi ja sellest tulenevalt ka voolu neutraaljuhis. Moonutused tarbitava voolu kujus tekitavad moonutusi toitepinges, lisakadusid tarbija seadmetes ja jaotusvõrgus.

1.1.4.1 Elektromagnetiline ühilduvus tarbija elektriseadmete ja elektrivõrgu vahel.

Elektromagnetiline ühilduvus (EMÜ) tähendab seda, et tarbija elektriseadmed peavad kokku sobima ehk ühilduma elektrivõrguga nii juhtivuslikul teel kui ka kiirguse teel mõlemas suunas ülekantavate häiringute osas.

Kuidas on praegu reguleeritud nõuded tarbija elektriseadmetele EMÜ osas? Elektriseadmed peavad olema varustatud CE-märgiga. Kes seda kontrollib?

Elektriseade/paigaldis ei tohi tekitada häiringuid ja peab olema ise piisavalt häirekindel. Elektriseadmete ja -paigaldiste elektromagnetilise ühilduvuse nõuetele vastavuse järelevalvet teostab Tehnilise Järelevalve Amet.

Nõuded elektriseadmetele on seadmegruppide kaupa erinevates standardites. Näiteks nõuded tarbitava voolu harmoonilistele moonutustele on esitatud standardites IEC 61000-3-2 ja 61000-3-12.

Tarbija elektriseadmete elektromagnetilise ühilduvusega seotud probleemid ei ole praegu piisavalt reguleeritud. Elektrivõrk vajab õiguskaitset pingeprobleemide lahendamisel vastasel juhul toimub see teiste klientide arvelt. Elektromagnetilise ühilduvuse valdkond vajab täpsemaid ja selgemalt väljendatud tingimusi seadmete võrkuühendamisel, võrguühenduse lepingutingimustes, võib-olla ka seadmete maaletooja vastutuses. Probleem vajab lahendamisel regulaatori toetust.

CE-märk viitab toodete ohutusele. CE-märk peab olema toodetel, mis võivad olla kasutajale ohtlikud – nagu näiteks elektrikaubad, masinad, mänguasjad ja isikukaitsevahendid. Kui tootel puudub CE-märk, siis võib see osutada, et toode võib olla ohtlik või et tootja ei tunne tootele esitatavaid nõudeid. CE-märk võeti kasutusele 1990. aastate alguses võimaldamaks tootjal näidata, et toode vastab direktiivide nõuetele. Lisak võimaldab CE-märk müüa toodet vabalt EL piires, ilma et iga liikmesriik peaks seda täiendavalt katsetama.

Kas CE-märk tagab tarbija seadmete piisava elektromagnetilise ühilduvuse elektrivõrguga? Tagab, aga etteantud võrgu takistuse juures. Kui võrgu takistus on sellest suurem, siis enam ei taga.

Seega, pinge kvaliteet tarbija liitumispunktis sõltub peamiselt tarbija enda koormusest (liinivoolud, voolutõuked, voolukõvera kuju moonutused, liinivoolude sümmeetria), jaotusvõrgu parameetritest (võrgu aktiiv- ja induktiivtakistus) ning teiste tarbijate koormusest samas võrgupiirkonnas.

Pinge kvaliteedinäitajad võib jaotada kolme järgmisse rühma:

- Äärmuslikult lubatavad kvaliteedihälbed, mis on määratud tarbija ning elektrivõrgu elektrisüsteemi, selle koostisosade ja seadmete tehniliste tingimuste ja kasutusjuhenditega. Nendest juhinduvad elekteriseadmete tootjad ja tarnijad.
- Normeeritud kvaliteedihälbed, mis on sätestatud pingekvaliteedi standardite, normide ja lepingutega. Normeeritud hälvetest juhinduvad võrguettevõtted oma töös.
- Optimaalsed ehk majanduslikult soodsaimad pinge parameetrid, mis arvestavad nii tarbija kui ka võrguettevõtte investeeringute, käidu, tõrgete, võimsuskadude ja seadmete tööeaga seotud kulusid. Selles osas peaks tegema koostööd nii võrguettevõte kui ka tarbija, et saavutada optimaalset pingekvaliteeti antud võrgus või võrguosas. Optimalse pinge parameetrite kirjeldamisel ja soovituste väljatöötamisel on vaja otsuseid majanduskomisjonilt ja/või valitsuselt?

Käesolev uurimistöö keskendub tehniliste lahenduste võrdlusele ja analüüsile selleks, et tagada normeeritud pingekvaliteet tarbijate liitumispunktides.

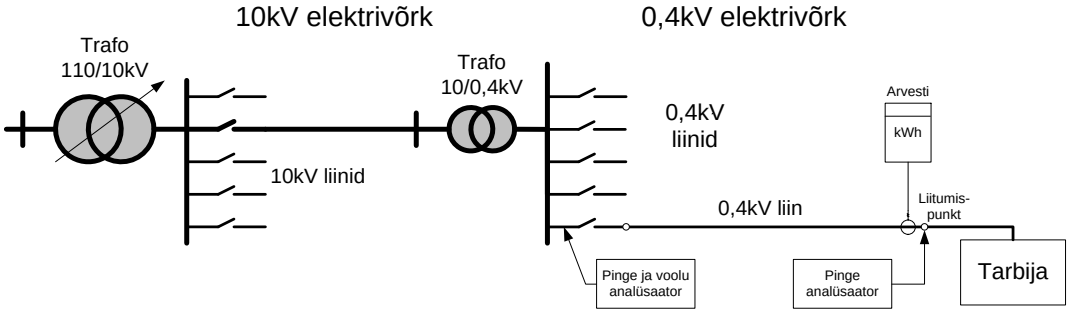
1.1.5 Pingekvaliteedi ja tarbijate koormuste mõõtmine

Pingekvaliteedi ja tarbijate koormuste mõõtmistel on esiteks oluline määrata, kas pinge vastab standardi nõuetele ja kas pingekvaliteedi hälbed võivad põhjustada häireid elektriseadmete töös. Teiseks eesmärgiks on välja selgitada, kas antud parameetritega toitepinge on energiatarbimise ja võimsuskadude seisukohast sobiv (optimaalne), kas toitepinge tagab tõhusa ja säästliku energiakasutuse ning kas ja kuidas saab toitepinge parameetreid mõjutada või muuta. Kolmandaks, millest on tingitud pinge parameetrite hälbed, kas neid põhjustavad tarbijate elektriseadmed ja kas tarbija saaks või peaks midagi ette võtma, et pinge kvaliteeti parendada? Neljandaks, kas peab elektrivõrku täiendama või seadistama ning kuidas hinnata nende täienduste võimalikke tulemusi?

Mõõtepunktiks ehk kontrollpunktiks on tavaliselt tarbija liitumispunkt või kui sinna pole võimalik mõõteseadet ühendada, siis tarbijale lähim punkt madalpinge poolel, näiteks:

- klemmid liitumiskilbis või mastil;
- tarbija mõõtekilp (arvestikilp);
- hoone sisestuskilp või peakilp;
- muu jaotuskilp või klemmid, milles võib pinge lugeda võrdseks liitumispunkti pingega.

Lisaks annab kasulikku infot pinge mõõtmine uuritava fiidri trafo madalpinge klemmidel. Pinge mõõtmiseks soovitatavad punktid 0,4 kV fiidri pingekvaliteedi uurimisel on esitatud järgneval joonisel (Joonis 1.1). Madalpinge tarbija (kliendi) elektrivarustuse toiteahelas võib välja tuua järgmised lülid (Joonis 1.1). Põhivõrgu viimane lüli on põhivõrgu alajaam ehk toitekeskus, mille trafo on üldjuhul varustatud automaatse astmelülitiga ja mille lattidele on ühendatud jaotusvõrgu keskpinge 6…35 kV väljuvad fiidrid. Ühe keskpingeliini kaudu tuleb toitepinge tarbija 10/0,4 kV alajaama (kesk-/madalpinge alajaama) või trafopunkti, millest omakorda saavad toite madalpinge tarbijad.



Joonis 1.1. Toitepinge registreerimise mõõtepunktid pinge kvaliteedi uurimisel MP võrgus

Pinge kontrollmõõtmistega MP võrgus saame vastused küsimustele, millise kvaliteediga on pinge ja mis põhjusel pinge kvaliteet ei vasta nõuetele või ei ole tarbijale sobiv. Järgnevalt on võimalik analüüsida, milliseid meetmeid pinge kvaliteedi parendamiseks rakendada ning milliseks kujuneb pinge kvaliteet peale meetmete rakendamist. Kasulikku lisainfot annab voolude registreerimine samal MP fiidril.

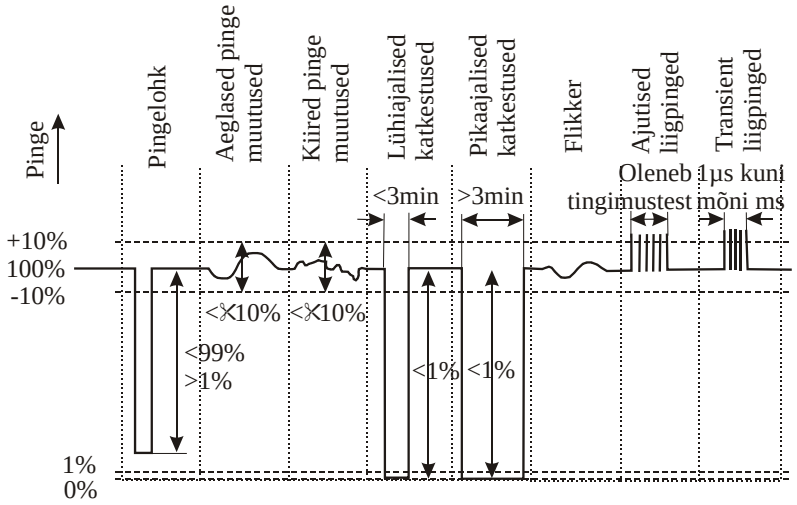
Võrreldes erinevate kontrollpunktide pingeid, saab välja selgitada probleemi põhjused ja kavandada meetmed pingekvaliteedi parendamiseks. Seega saab MP elektrisüsteemi kontrollpunktide pinge parameetrite alusel anda vastused järgmistele küsimustele:

- kas pinge kvaliteet vastab standardis EVS-EN:50160 toodud parameetritele ja millistele;
- kui suur on tõenäosus, et pinge mingi parameeter on lubatavas või soovitatavas vahemikus;
- kui suur on ühe või teise parameetri väärtuste hajuvus ja kas see vastab soovitule;
- mis on mittesoovitava või ebasoodsa pingekvaliteedi põhjused ja kuidas olukorda muuta;
- missugused on pingekvaliteedi parameetrid vastavate parendusmeetmete rakendamisel.

1.1.6 Pingekvaliteedi parameetrid

Vastavalt IEC klassifikatsioonile kuuluvad toitepinge kvaliteedi küsimused madalsageduslike juhtivusnähtuste alla. Pinget iseloomustatakse erinevate parameetritega ja kirjeldatakse nende hälvet ideaalsest toitepingest. Pinge kvaliteeti kolmefaasilises võrgus iseloomustavad:

- toitepinge sagedus ehk võrgusagedus;
- toitepinge suurus ja pingenivoo;
- toitepinge võrgusageduslikud hälbed nimipingest (nn pingelohud ja pingemuhud);
- toitepinge katkestused (lühi- ja pikaajalised toitekatkestused);
- siirdeliigpinged (transientliigpinged);
- toitepinge harmoonilised moonutused,
- toitepinge värelus (flikker);
- pingete asümmeetria kolmefaasilises süsteemis.

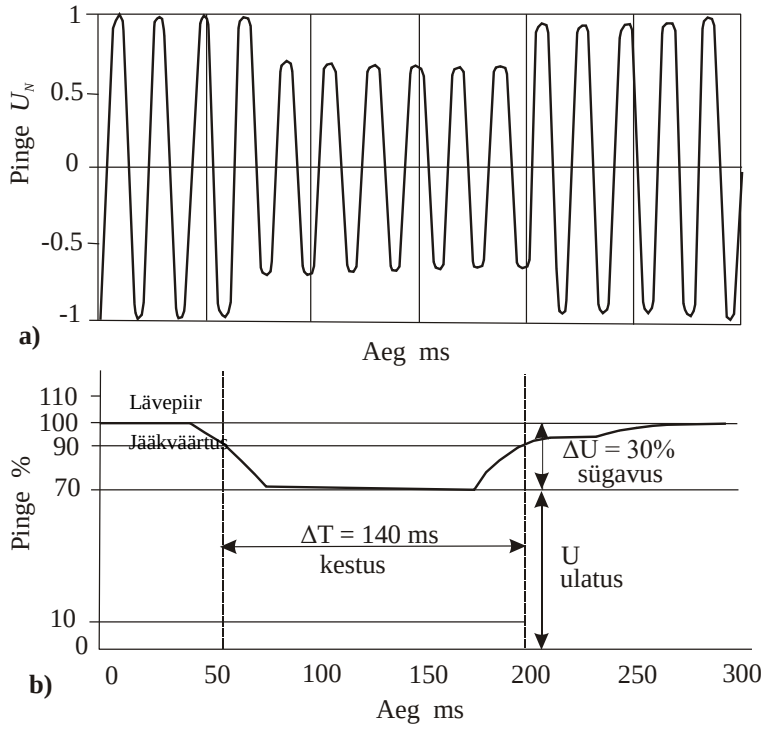


Joonis 1.2. Elektri kvaliteedinäitajate lihtsustatud ülevaade [MEL07]

Standardi EVS-EN 50160:2010+A1:2015 kohaselt on nimetatud parameetrid defineeritud järgnevalt:

- **Nimipinge** (*nominal voltage*) $\boldsymbol{U_n}$ pinge, millega tähistatakse või tuvastatakse elektrivarustusvõrku ja millega seostatakse teatud talitluse tunnussuurusi.

- **Lepinguline toitepinge (elektrivõrgu nimipinge)** (*declared supply voltage*) $\boldsymbol{U_c}$ elektrivõrgu käitaja ja elektrivõrgu kasutaja poolt kokku lepitud toitepinge U_c. Tavaliselt on lepinguline toitepinge U_c elektrivõrgu nimipinge U_n, kuid see võib olla ka erinev vastavalt elektrivõrgu käitaja ja elektrivõrgu kasutaja omavahelisele kokkuleppele.
- **Toitepinge sagedus** (*frequency of the supply voltage*) – etteantud ajavahemiku kestel mõõdetud toitepinge põhilaine kordumissagedus
- **Värelustugevus** (*flicker severity*) – väreluse häiriva toime intensiivsus ehk nägemisaistingu ebastabiilsuse mulje intensiivsus, mille kutsub esile elektervalgustuse heleduse või spektraaljaotuse ajaline kõikumine. mida hinnatakse järgmiste suurustega:
    - 10-minutilises ajavahemikus mõõdetud **lühiajaline värelustugevus** (P_{st});
    - **pikaajaline värelustugevus** (P_{lt}), mis arvutatakse 2-tunnises ajavahemikus mõõdetud 12-st P_{st} väärtusest valemiga:
- **toitekatkestus** (*supply interruption*) – seisund, milles pinge liitumispunktis on alla 5 % etalonpingest. Toitekatkestus võib olla **plaaniline**, millest elektrivõrgu kasutajaid on eelnevalt teavitatud, või **avariiline**, mille põhjuseks on enamasti väliste sündmustega, seadmete tõrgetega või häiringutega seotud püsiva või mööduva iseloomuga rikked. Avariilised katkestused liigitatakse pikkadeks katkestusteks (kestusega üle 3 min) ja lühikesteks katkestusteks (kestusega kuni 3 min).
- **Transient- ehk siirdeliigpinge** (*transient overvoltage*) – tavaliselt kiiresti sumbuv lühiajaline võnkuv või mittevõnkuv liigpinge kestusega mõni millisekund või vähem. Transientliigpingeid põhjustavad tavaliselt välk, lülitamine või sulavkaitsmete läbipõlemine. Transientliigpinge frondi kestus võib olla alla mikrosekundi, kuid võib ulatuda ka mõne millisekundini.



Joonis 1.3. Pinge hetk- (a) ja efektiivväärtused (b) pingelohu korral [MEL07]

- **Pingelohk** (*voltage dip*) – pinge efektiivväärtuse ajutine vähenemine allapoole elektrivarustussüsteemi punktis määratletud alguse lävepiiri. Standardi EVS-EN 50160:2010+A1:2015 tähenduses on lohu alguse lävepiir võrdne 90 protsendiga etalonpingest. Tavaliselt on lohk seotud lühise või mõne muu ülisuure voolu tekkimise ja lõppemisega süsteemis või sellesse ühendatud paigaldistes. Pingelohk on kahemõõtmeline elektromagnetiline häiring, mille tase on määratletud nii pinge kui ka ajaga (kestusega). Standardi tähenduses on pingelohu kestus alates 10 ms kuni 1 min. Mitmefaasiliste sündmuste korral algab lohk, kui üks pinge langeb alla lohu alguse lävepiiri, ja lõpeb, kui kõik pinged on lohu lõpu lävepiiriga võrdsed või sellest ülalpool. Pingelohu kestel mõõdetud pinge efektiivväärtuse vähim väärtus. Standardi tähenduses väljendatakse jääkpinget protsendina etalonpingest.
- **Pingemuhk** (*voltage swell*) ehk **võrgusageduslik ajutine liigpinge** (*temporary power frequency overvoltage*) – pinge efektiivväärtuse ajutine suurenemine ülespoole elektrivarustussüsteemi punktis määratletud alguse lävepiiri. Standardi tähenduses on muhu alguse lävepiir võrdne 110 % etalonpingest (lisateavet saab standardist CLC/TR 50422, peatükk 3). Pingelohk on kahemõõtmeline elektromagnetiline häiring, mille tase on määratletud nii pinge kui ajaga (kestusega). Pinge muhk võib esineda pingestatud juhtide vahel või pingestatud juhi ja maa vahel. Sõltuvalt neutraali talitlusest võivad maaühendused põhjustada liigpingeid tervete faaside ja neutraali vahel. Standardi tähenduses on pingemuhu kestus alates 10 ms kuni 1 min.
- **Pinge asümmeetria** (*voltage unbalance*) – mitmefaasilise süsteemi seisund, milles kõik faasidevaheliste pingete (põhikomponentide) efektiiväärtused või järjestikuste faasidevaheliste pingete faasinurgad ei ole võrdsed. Ebavõrdsuse määra väljendatakse tavaliselt vastujärgnevus- ja nulljärgnevuskomponentide suhtega pärijärgnevuskomponenti. Standardis EVS-EN 50160:2010+A1:2015 käsitletakse pinge asümmeetriat ainult kolmefaasiliste süsteemide ja vastujärgnevuse seisukohast.

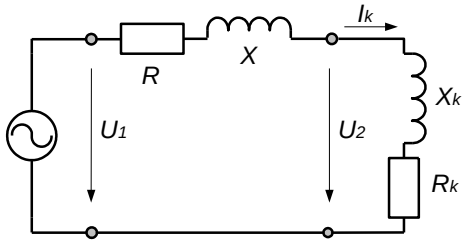
Nimetatud standardis on kirjeldatud ka nõuded eelnimetatud parameetritele.

1.1.7 Toitepinge suurus ja pingenivoo

Toitepinge suurus on pinge efektiivväärtus teatud ajavahemikus. Vähim ajavahemik, milles saab määrata pinge efektiivväärtuse on poolperiood ehk 10 ms. Pinge efektiivväärtus U ühe perioodi kohta (U_{rms}) arvutatakse ruutkeskmise (*rms - root mean square*) väärtusena järgmiselt:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2 dt} \qquad \textbf{(1.1)}$$

Tarbija liitumispunktis on pinge pidevalt muutuv suurus, mis sõltub tarbija koormusest, teiste samal fiidril paiknevate tarbijate koormusest ning pingest keskpingevõrgus. Tarbija vool I_k põhjustab toiteahelas pingelangu, mis sõltub toiteahela takistustest ning tarbitava voolu suurusest (Joonis 1.4).



Joonis 1.4. Pinge tarbija liitumispunktis tulenevalt tarbija koormusvoolust

Kõige lihtsamal juhul saab pingelangu (mis on vektorsuurus) toiteahelas arvutada järgmiselt:

$$\underline{U}_1 - \underline{U}_2 = \underline{I}_k (R + jX) \qquad \textbf{(1.2)}$$

kus I_k – tarbitav vool;

R – toiteahela aktiivtakistus ehk elektrisüsteemi aktiivtakistus liitumispunktis ilma tarbijapaigaldise mõjuta;

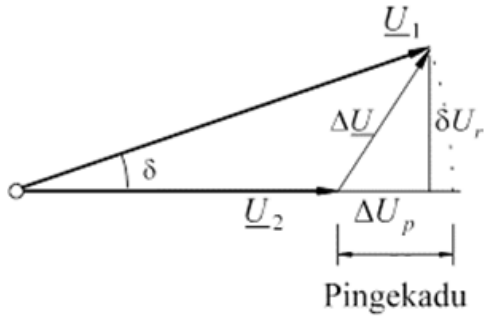
X – toiteahela reaktiivtakistus.

Kuna sageli aetakse segamini pingelangu ja pingekao mõisted, siis järgnevalt on lisatud täpsustav selgitus nende mõistete kohta.

Pingelang - pingete vektoriaalne vahe: $\Delta\underline{U} = \underline{U}_1 - \underline{U}_2$,

Pingekadu - pingete aritmeetiline vahe ehk pingemoodulite vahe: $\Delta U = U_1 - U_2$.

Nagu alltoodud jooniselt (Joonis 1.5) on näha, **pole pingekadu pingelangu moodul** $\Delta U \neq |\Delta\underline{U}|$.



Joonis 1.5. Pingelang ja pingekadu elektrivõrgu elemendis

Kuna jaotusvõrgu mis tahes elemendi sisend- ja väljundpinge vektorite vaheline nurk δ on väike (vt Joonis 1.5), siis pingete arvutamisel ei arvestata pingelangu ristkomponenti ja pingekadu leitakse kui pingelangu pikikomponent:

$$\Delta U = \Delta U_p \qquad \textbf{(1.3)}$$

Praktikas reeglina nendel kahel vahet ei tehta. Ka inglise keeles tõlgitakse mõlemat, kui ***voltage drop***. Seega kokkuvõttes, **pingelang** on vektorsuurus, **pingekadu** on skalaarsuurus ehk lihtsalt arvväärtus, mis alalispinge puhul langeb pingelanguga kokku. Segadust võib tekitada ka see, et ülaltoodud mõisted viitavad

olukorrale, kus pinge suunal trafo poolt tarbija poole väheneb. Tegelikult võib esineda ka vastupidine olukord, kus pinge tarbija liitumispunktis on kõrgem kui pinge trafo klemmidel, näiteks juhul kui tarbija paigaldises on elektriallikas (tuulegeneraator või päikesepaneel) või tarbija koormus on tugevasti mahtuvuslik. Sellistel juhtudel on pingelang miinusmärgiga ja sõna pingelang asemel sobiks hoopis pingetõus.

Normaaltalitlustingimustes, väljaarvatud katkestused, ei tohi toitepinge aeglased muutused ületada ±10% nimipingest U_n. Ülekandevõrkudega mitte ühendatud elektrivarustusvõrkudes või eriliste kaugel asuvate elektrivõrgu kasutajate jaoks ei tohi pinge aeglased muutused ületada +10 % / –15 % nimipingest U_n. Elektrivõrgu kasutajaid tuleb sellisest olukorrast teavitada.

Standard sätestab tõenäosuse *P*, mille järgi toitepinge keskmised väärtused peavad olema etteantud vahemikus. Igas nädalases ajavahemikus toitepinge U_i 10-minutilistest keskmistest efektiivväärtustest 95% peavad olema vahemikus ± 10 % nimipingest 230 V:

$$P\,(207 \le U_i \le 253) \ge 0{,}95 \qquad \textbf{(1.4)}$$

Lisaks peavad kõik toitepinge 10-minutilised keskmised väärtused U_i igas intervallis olema 100% tõenäosusega vahemikus +10% kuni –15%:

$$P\,(196 \le U_i \le 253) \ge 1 \qquad \textbf{(1.5)}$$

Pingenivoo kirjeldamiseks on ülevaatlikud graafilised esitusviisid:

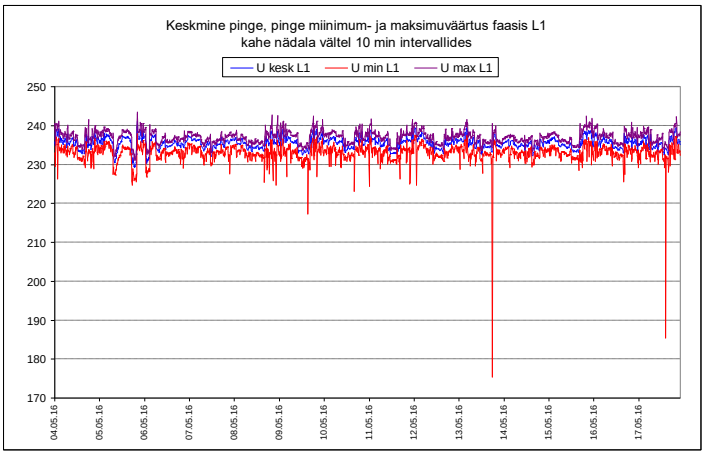
- pinge suurus graafiliselt ühe nädala vältel (Joonis 1.6);
- pinge histogramm valitud pingevahemikega, näit. 1V; 2V; 5V (Joonis 1.7);
- pinge tõenäosustiheduse jaotuskõver (Joonis 1.8);
- pinge integraalne (kumulatiivne) jaotuskõver.

Pinge suurust igas intervallis saab iseloomustada kolme parameetriga – keskmise pingega ja intervalli pinge miinimum- ning maksimaalväärtusega. Joonis 1.6 on esitatud näide pinge muutumise ulatusest tarbija liitumispunktis. Tegelik pinge jääb igas intervallis kahe kõvera, s.o. U_{min} ja U_{maks} vahele. Pinge tõenäosustiheduse jaotuskõverat (Joonis 1.8) on lihtne võrrelda pinge soovitatava jaotuskõveraga ja standardikohase jaotuskõveraga antud MP võrgus.

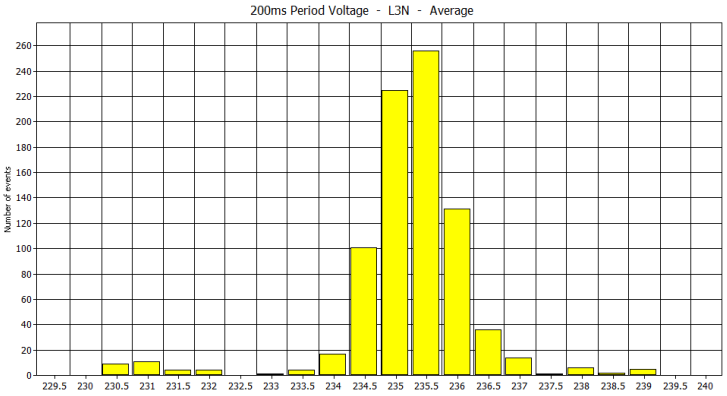
Pingenivoo analüüsil tekib küsimus, missugune peaks olema optimaalne pingenivoo, selle keskmine väärtus ja hajuvus. Üheks võimaluseks on lähtuda pingekvaliteedi standardist ja hinnata pingenivood standardis toodud pinge piirväärtustest lähtuvalt. Pinge kvaliteedi kõrgtase seab kitsamad piirid, pinget loetakse väga heaks juhul, kui nädala keskmine pinge jääb vahemikku 225…235 V ja kõigi intervallide pinge on piirides 220…240 V. See vastab standardhälbe väärtusele σ = 3 V ehk 1,25%.

Energiatarbimise optimeerimisel on soovitatav lähtuda veelgi kitsamast vahemikust, kus nädala keskmine pinge on vahemikus 225…232 V ja iga intervalli pinge piirides 221…235 V ehk 230V +2%, –4%. See vastab ligikaudu pinge keskmisele väärtusele 228 V ja standardhälbele σ = 2,3 V ehk 1%. Niisugune asümmeetriline valik nimipinge suhtes tuleneb asjaolust, et nimipingest kõrgem pinge suurendab märgatavalt energiatarbimist ja võimsuskadusid, eriti mootorites ja trafodes. Pinge jaotuskõverad

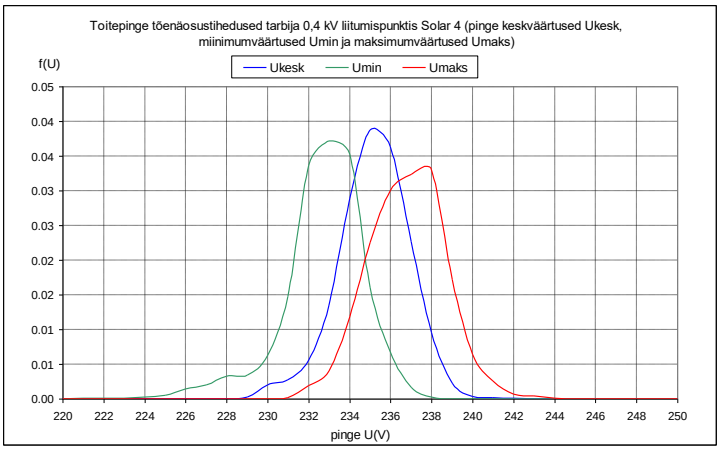
kõrgtaseme, optimaalse taseme ja standardikohase taseme puhul on esitatud järgneval joonisel (Joonis 1.9).



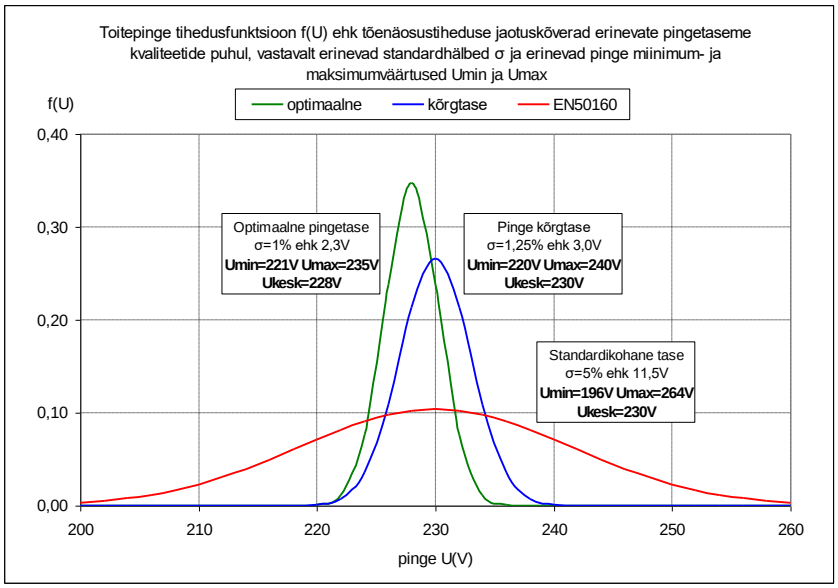
Joonis 1.6. Näide toitepinge keskmise väärtuse ja miinimum- ning maksimuväärtuste muutumisest kahe nädala vältel



Joonis 1.7. Näide pinge histogrammist, mõõtetulemused on jaotatud intervallidesse 0,5 V



Joonis 1.8. Toitepinge tihedusfunktsioonid ehk tõenäosustihedused mõõtetulemuste alusel, näide vastab joonisele (Joonis 1.6)



Joonis 1.9. Toitepinge tõenäosustihedused f(U) erinevate pingenivoode puhul, vastavad standardhälbed σ ja pinge piirväärtused Umin ja Umax

1.1.7.1 Toitepinge mõõtetulemuste analüüsi metoodika

Toitepinge suuruse mõõtmisest (registreerimisest) ühe nädala vältel üksi on vähe. Kuna mõõtetulemusi nädalase mõõtmise puhul kujuneb suur hulk (näiteks kolme faasipinge puhul 3072 arvväärtust), siis mõõtetulemused vajavad järelduste tegemiseks analüüsi. Seejuures tuleb arvestada, et pinge suurus on juhuslik väärtus, mis oleneb paljudes teguritest, näiteks aastaajast, kellaajast, tarbijate poolt antud ajavahemikus kasutatud elektriseadmetest jms. Võib juhtuda, et mõõteperioodiks valitud nädalal ongi pinge standardiga ettenähtud vahemikus, kuna tarbijad sel nädalal ei kasutanud võimsamaid elektriseadmeid ja ka keskpinge jaotusvõrgus ei esinenud pingelohkusid või katkestusi. Mingil teisel ajavahemikul aga võib pingeolukord olla teine.

Siiski näitab ühenädalane mõõteperiood ära tõenäolise olukorra, kas antud mõõtepunktis pinge väljub lubatud vahemikust suurema koormuse olukorras.

Pinge ja koormuste mõõtetulemuste analüüs võimaldab teha mitmeid olulisi järeldusi elektrisüsteemi olukorra, elektritarbimise ja toitepinge kvaliteedi kohta ning samuti anda soovitusi toitepinge taseme ja hajuvuse optimeerimiseks toiteahela seadistamise ja täiendamise teel. Seega tuleb saada vastused järgmistele küsimustele:

- kui suur on keskmine pingenivoo ja selle hajuvus;
- kui suured on pingenivoo minimaal- ja maksimaalväärtused;
- kas toitepinge nivoo ja selle hajumine vastab standardile EVS EN:50160;
- kas toitepinge on sobiv energiatarbimise ja võimsuskadude seisukohast;
- kas pinge automaatne reguleerimine keskpingevõrgus vastab koormuse ööpäevasele muutusele;
- kas toitetrafo võimsus ja lülitusgrupp on antud koormuste puhul sobivad;
- kas trafo astmelüliti asend on sobivalt valitud;
- kas faasipinged ja koormused on sümmeetrilised.

Pingenivoo analüüsil on sobiv kasutada erinevaid arvulisi või graafilisel kujul esitatud statistilisi parameetreid. Arvulistest parameetritest on kasulik välja tuua järgmised:

- keskmised faasipinged kolmes faasis U_{L1}, U_{L2} ja U_{L3};
- keskmine pinge ehk kolme faasi keskmine faasipinge U_L;
- pinge keskmine absoluuthälve K keskmisest pingest;
- keskmine hälve pinge nimiväärtusest ΔU;
- pinge mõõtetulemuste dispersioon D ja standardhälve σ;
- pinge miinimumväärtus (10 minutilise intervalli vähim 10 ms väärtus) U_{min};
- pinge maksimumväärtus (10 minutilise intervalli suurim 10 ms väärtus) U_{max}.

Pingenivood iseloomustavatest parameetritest on olulised järgmised:

- faasipinged kolmes faasis vaatlusvahemiku vältel;
- keskmiste faasipingete tõenäosustihedused pinge absoluutväärtusskaalal koos standardikohase pingejaotuskõveraga.

1.1.8 Toitepinge sagedus

Toitepinge sagedus on etteantud ajavahemiku jooksul mõõdetud toitepinge põhiharmoonilise sagedus. Eestis on toitepinge nimisagedus 50 Hz. Normaaltalitlusoludes peab pinge põhiharmoonilise komponendi sageduse keskväärtus 10-sekundilises vahemikus olema:

- 50 Hz ± 1% (s.t 49,5…50,5 Hz) 99,5% kestel aastast;
- 50 Hz –6% / +4% (st 47…52 Hz) 100% ajast.

Ühendelektrisüsteemiga ühendamata võrkudes, näiteks saarte lokaalsetes elektrivõrkudes on lubatud tunduvalt suuremad sageduse hälbed:

- 50 Hz ± 2% (s.t 49…51 Hz) 95% kestel nädalas;
- 50 Hz ±15% (st 42,5…57,5 Hz) 100% ajast.

Sagedus ühendenergiasüsteemis on määratud generaatorite ja turbiinide pöörlemiskiirusega. Koormuse kasvades generaatorite pöörlemiskiirus väheneb ja see tuleb kompenseerida. Sagedust saab reguleerida ainult aktiivvõimsuse reservi korral ja pingenivoo reguleerimisega teatud ulatuses. Sageduse hälve arvutatakse järgmiselt:

$$\Delta f = \frac{f - f_{nimi}}{f_{nimi}} 100\% \qquad \textbf{(1.6)}$$

1.1.9 Siirdeliigpinged

Ülevaade siirdeliigpingete kestusest ja põhjustest annab ülevaate allolev tabel (Tabel 1.1), mis põhineb IEC 2006 aasta standardil TR 61000-2-14 ja EN 50160 rakendusjuhendil CLC/TR 50422:2013.

Tabel 1.1. Siirdeliigpingete liigitus

Tõusu aeg	Põhjus
> 100 µs	• voolu piiravate sulavkaitsete töötamine (üldiselt: amplituud: kuni 2 kV, lainekuju: unipolaarne, suure energiasisaldusega, amplituudiga kuni 1kV...2kV); • võimsustegurit parendavate kondensaatorpatareide lülitamine (üldiselt: amplituud: kuni 1,8-kordne nimipinge tippväärtus, lainekuju: võnkuv sagedusega kuni mõni kHz, suur energiasisaldus). Kui liitumispunkti läheduses on teine trafo, siis võib aset leida võimendumine, mille tulemusena võivad pinge väärtused tõusta kuni 3-kordse nimipinge tippväärtuseni; • elektromagnetilise sidestuse vahendusel transientliigpingete üle kandumine trafo keskpinge poolelt madalpinge poolele (üldiselt: amplituud: kuni 1 kV, lainekuju: võnkuv sagedustega kuni mitukümmend kHz).
1 µs kuni 100 µs	• äikese otselöök madalpingeliini (puuduvad määratletud impulsid: amplituud: kuni 20 kV, lainekuju: unipolaarne, suure energiasisaldusega). Kõrgeimad amplituudid on reeglina madalpinge õhuliinides. Tüüpilised suurimad pinge amplituudväärtused on kodumajapidamistes ja kontorihoonetes tunduvalt väiksemad, jäädes vahemikku 2kV...3kV (IEC 62066) • madalpingeliini lähedase välgulöögi induktiivne sidestus. Üldiselt ei ületa amplituud 6 kV, kuid see võib ulatuda kuni 20 kV, lainekuju on tavaliselt unipolaarne ja mõnikord unipolaarne võnkuv. • elektrivõrgu maanduspaigaldises äikesest põhjustatud maandusvooludega seotud takistuslik sidestus. Tavaliselt ei ületa amplituud 10 kV, lainekuju on suure energiasisaldusega ja on tavaliselt unipolaarne või mõnikord unipolaarne võnkuv. • trafo mahtuvuslikust sidestusest tingitud impulsside ülekandumine keskpinge poolelt madalpinge poolele. Äikese otselöögist keskpinge poolele põhjustatud impulss võib tingituna rikke likvideerimiseks kasutatava sädevahemikuga liigpingepiiriku töötamisest põhjustada pinge järsu languse. Liigpinge amplituud madalpingeelektrivõrgus ei ületa üldiselt 6 kV, tavaliselt on see unipolaarne või mõnikord võnkuv. • Kaitseahelate rakendumine võib põhjustada liigpingeid amplituudiga, mis ületavad mitmekordselt nimipinget. Tavaliselt need ei ületa 2kV, kuid erijuhtudel võivad ületada 10 kordselt nimipinget. Selliste liigpingete energiasisaldus on reeglina madal ja väheneb kiiresti distantsi suurenedes. • madalpingeelektrivõrgu lülitamistega kaasnevad kaareprotsessid võivad minna resonantsi kohaliku elektrivõrgu loomuliku sagedusega. Tekkiva liigpinge amplituud võib ulatuda nimipinge mitmekordse väärtuseni. Lainekuju on tavaliselt võnkuv sagedustega vahemikus mõnekümnest kHz kuni 1 MHz. • kiiretoimeliste võimsuslülitite lülitamine, < 2 µs. Tekkiva liigpinge amplituud ulatub tavaliselt mitmekordse nimipingeni. Lainekuju on võnkuv sagedustega vahemikus mõnekümnest kHz kuni 1 MHz. • lülitusseadmete toimimine tarbija elektripaigaldises. Nendel liigpingetel on üldiselt madal energiasisaldus ja need sumbuvad vahemaa suurenedes kiiresti. Tavaliselt ei ületa need 2,5 kV.
< 1 µs	• lühikese ahela ja kohalike väikese induktiivsusega koormusvoolude lülitamine (amplituud üldiselt kuni 1 kV...2 kV, võnkuv lainekuju sagedusega mõnest MHz kuni mitmekümne MHz); • madalpingeliste õhkvahemikega lülitite (releed ja kontaktorid) lülitamisega kaasnevad kaare kustumisest ja taassüttimisest põhjustatud kiired transiendid (mitmed impulsid, üks impulss: tõusuaeg ligikaudu 5 ns, kestus ligikaudu 50 ns).

1.1.10 Võrgusageduslikud pingelohud ja -muhud, sh lühiajalised katkestused

Enamike lühiajaliste katkestuste kestus võib olla alla mõne sekundi. Pidesuurusi, millede eesmärgiks on anda lugejatele informatsiooni oodatavate väärtuste vahemike kohta, võib leida tehnilisest aruandest IEC/TR 61000-2-8 (UNIPEDE statistika).

Võrreldes lühiajaliste katkestuste statistilisi väärtusi tuleb arvestada järgnevaga:

- sündmuste koondamise põhimõtted;
- väga lühikeste katkestuste (VSI) või hetkeliste katkestuste võimalik kõrvaldamine.

Mõnedes dokumentides arvestatakse, et lühiajaliste katkestuste kestus ei ületa 1 minutit. Mõnikord on kasutusel juhtimisskeemid, mis pikkade pinge katkestuste vältimiseks vajavad talitlusaega kuni 3 minutit.

Pingelohk (*voltage dip, voltage sag*) on toitepinge äkiline langus alla 90% nimipingest ja sellele järgnev pinge taastumine kestusega 10 ms kuni 1 min. Tööstusettevõtete elektrisüsteemis lubatakse pinge vähenemist kuni –15% nimipingest ehk nimipinge 230 V puhul kuni pingeni 196 V. Pingelohkude hulk ühe aasta jooksul võib ulatuda mõnekümnest kuni tuhandeteni.

Pingelohkude liigitus koos võimalike põhjustega on:

- Lühistest põhjustatud lühiajalised (tavaliselt u 50 … 100 ms) lohud jaotusvõrgus;
- Kaugelasuvate jaotusvõrkude pingelohud, sügavusega kuni 80 … 90% nimipingest ja kestusega ühest perioodist kuni mitme sekundini;
- Kohalike jaotusvõrkude pingelohud, sügavusega 40 … 70% nimipingest;
- Mootorite käivitamisel tekkivad pingelohud sügavusega kuni 85 … 90% nimipingest ja kestusega 0,2 … 20 s;
- Sularite rakendumisest tingitud väga lühiajalised pingelohud kestusega 10…100 ms.

Asünkroonmasinate käivitusest põhjustatud pingelohud esinevad sageli ettevõtetes, kus kasutatakse võimsaid asünkroonmootoreid, nt saed, höövlid ja hakkurid puidutööstuses, suruõhu- ja külmutuskompressorid toiduainete-tööstuses, veskite ja konveierite ajamid sh asünkroongeneraatoritega hüdro- ja tuuleelektrijaamad jne. Asünkroonmootorite käivitusvool on tavaliselt (5…7) I_n. Sellest põhjustatud pingelohu sügavus sõltub mootori võimsusest, käivitusmeetodist, mootori ning töömasina inertsist ja koormusmomendist antud olekus, kuid ka jaotusvõrgu parameetritest. Nende pingelohkude sügavus on tavaliselt kuni 85% nimipingest ja kestus 0,2 … 20 sekundit. Mootorite põhjustatud pingelohud on sümmeetrilised, kõigis kolmes faasis langeb pinge võrdselt ja taastub seejärel sujuvalt. Selliseid pingelohke saab siluda sobiva kondensaatori lülitamisega mootori klemmidele.

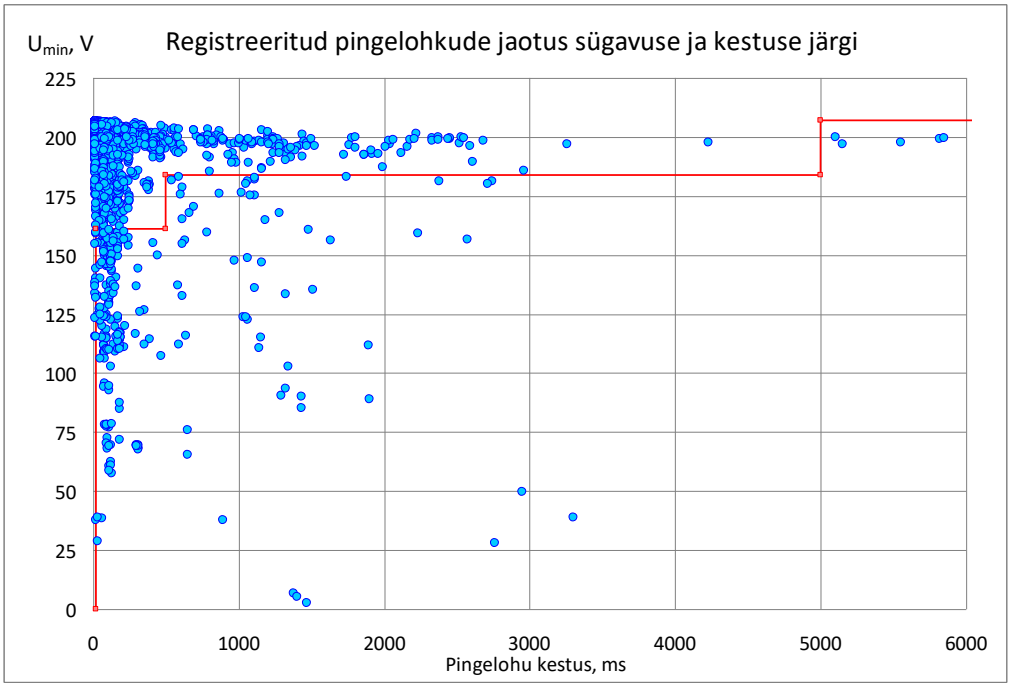
Lühistest tingitud pingelohud võivad olla sümmeetrilised või asümmeetrilised sõltuvalt sellest, kas lühis on faasijuhi ja neutraaljuhi või faasijuhtide või faasijuhi ja maa vahel. Lühised võivad esineda nii keskpingevõrgus kui ka madalpingevõrgus. Mida lähemal on lühis tarbija liitumispunktile, seda sügavam on pingelohk. Samuti, mida suurem on toiteahela näivtakistus lühisekoha ja võrgu vahel, seda sügavam on pingelohk. Keskpingevõrgu lühiste puhul sõltub niisuguste pingelohkude kestus keskpingevõrgu kaitseaparaatide tundlikkusest rakendumiskiirusest.

Trafode sisselülitamine tekitab samuti pingelohke. Põhjuseks on sisselülitamisel esinev magnetahela ajutine küllastumine, mis põhjustab suuri magneetimisvoolusid. Need voolud on tugevasti asümmeetrilised ja vähenevad siirdeprotsessi käigus eksponentsiaalselt. Pingelohu sügavus sõltub pinge hetkväärtusest trafo sisselülitamise ajahetkel, toiteahela takistusest ja trafo jääkmagneetumusest. Seda tüüpi pingelohud esinevad trafode pingestamisel ning korduvlülitamisel pärast lühise kõrvaldamist. Niisuguste pingelohkude kestus on tavaliselt 0,06 … 0,2 s ja sügavus kuni 80%.

Enamik pingelohke on kestusega alla 1 sekundi ning jääkpingega üle 40 %. Siiski võivad harva esineda madalama jääkpinge ja pikema kestusega pingelohud. Mõnedes piirkondades võivad elektrivõrgu kasutajate paigaldistes koormuste lülitamiste tõttu sageli esineda pingelohud jääkpingega vahemikus 90 % ja 85 % lepingulisest pingest U_c. Pidesuurusi, millede eesmärgiks on anda lugejatele teavet oodatavate väärtuste vahemike kohta, võib leida tehnilisest aruandest IEC/TR 61000-2-8 (UNIPEDE statistika).

Pingehälvete andmed on hea esitada ulatuse ja kestuse järgi graafiliselt ulatus-kestus diagrammil (*magnitude-duration plots*). Niisugune esitusviis on ülevaatlik ja võimaldab saadud mõõtetulemusi võrrelda näiteks nn ITIC (ITIC - *Information Technology Industry Council*) pingetaluvuskõveraga.

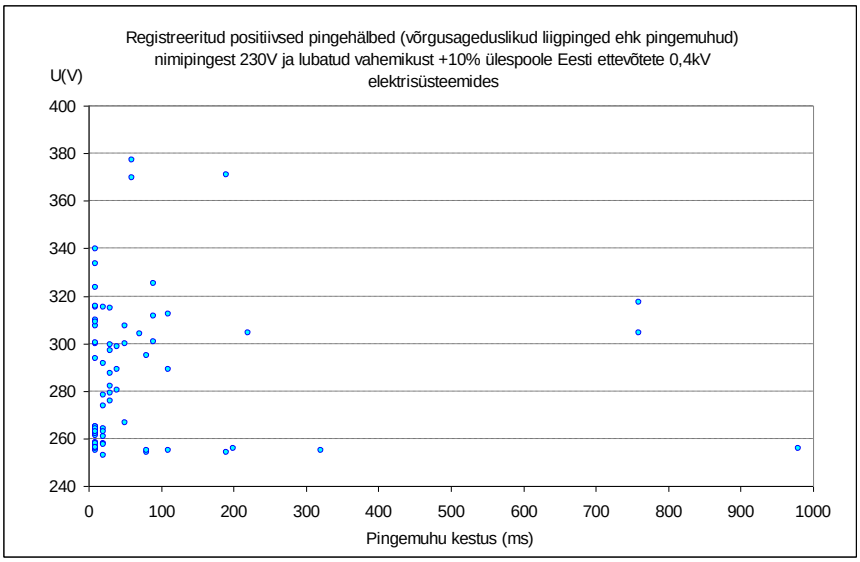
Näitena on pikaajalistel mõõtmistel (viimasel 10 aastal erinevates mõõtepunktides) Eestis registreeritud **pingelohud** esitatud joonisel Joonis 1.10, kus igale pingehälbele vastab üks punkt diagrammil. Probleeme tarbijate elektriseadmetes võivad eelkõige põhjustada pingelohud, mis on sügavamad kui 184 V ja suurema kestusega kui 0,1s. Punase joonega on näidatud pingelohkude talumisala vastavalt standarditele IEC 61000-4-11 ja IEC 61000-4-34.



Joonis 1.10. Eesti 0,4 kV elektrivõrkudes registreeritud pingelohud kestusega kuni 6 s

Pingemuhk ehk võrgusageduslik liigpinge (*voltage swell, temporary power frequency overvoltage*) on ajutine võrgusageduslik liigpinge kestusega 10 ms kuni 1 min. Pingemuhud on suhteliselt pika kestusega liigpinged, mis tekivad tavaliselt lülituste või rikete tõttu (koormuskaol, ühefaasilisel lühisel, maalühisel, trafo pingestamisel, neutraaljuhi suure takistuse korral või liigsuure mahtuvusliku koormuse tõttu). Võrgusageduslike liigpingete alla ei kuulu impulssliigpingeid ehk siirdeliigpinged (*transient overvoltages*).

Võrgusageduslike liigpingete põhjuseks on sageli keskpinge toitekatkestused ja järgnevad asümmeetrilised siirdeprotsessid trafo(de) sisselülitamisel, kus faasipinge võib mõne perioodi vältel olla lähedane liinipingele. Teiseks, ajutised liigpinged võivad olla tingitud neutraalpunkti nihkest. Näitena on Eesti võrgusageduslike liigpingete mõõtetulemused esitatud ka pingehälbe ulatuse-kestuse diagrammil (Joonis 1.11).



Joonis 1.11. Eesti 0,4 kV elektrivõrkudes registreeritud pingemuhud kestusega kuni 1 s

Toitepinge hälvete määramisel mõõdetakse igal poolperioodil pinge efektiivväärtust. Kui tegelik pinge väljub lubatud vahemikust, siis on tegemist pingehälbe ehk pingesündmusega ja selle suurus ning kestus salvestatakse. Toitepinge hälvete statistiliseks analüüsiks on rahvusvahelise elektrotehnikakomisjoni (IEC) töögrupi poolt välmitud vastav tabelimall. Järgnevalt on niisugusel kujul esitatud Eestis mõõdetud pingehälvete andmed (Tabel 1.2).

Tabel 1.2. Registreeritud pingehälbed vastavalt IEC pingehälvete liigitusele

Pingehälbe kestus	<20 ms	20...100 ms	100...500 ms	0,5...1 s	1...3 s	3...60 s	> 60 s
Pingemuhud	453	31	1648	83	77	43	2
Pingelohud							
10 ... < 15%	33262	14788	8416	364	393	227	22
15 ... < 30%	167	73	52	13	48		3
30 ... < 60%	10	30	23	6	4		
60 ... < 99%	2	28	10	4	1	15	4
Katkestused		3		1	6	27	54

Lühiajaliste pingehälvete esinemise kohta saab öelda järgmist.

- Pingehälvetest on suures ülekaalus pingelohud 0,85…0,9 U_{nimi}, mille kestus on kuni 500 ms. Elektriseadmetele need tavaliselt probleeme ei põhjusta.
- Lühiajalisi pingelohke kestusega 20…100 ms ja sügavusega alla 0,85 U_{nimi} esineb küllalt sageli. Nende tõenäoliseks põhjuseks on lühised edastus- või jaotusvõrgus. Samuti esineb ka kestvamaid, 100…500 ms pingelohke, mis võivad põhjustada probleeme paljudes seadmetes.
- Suhteliselt harva esineb pingelohke, kus pinge langeb alla 0,4 U_{nimi}. Niisugust olukorda võib pidada ka katkestuseks, sest elektriseadmete töö tavaliselt katkeb.

- Pingelohud kestusega 1…3 s ja sügavusega 0,7…0,85 U_{nimi}, on ilmselt tingitud lühistest ja taaslülitustest kaugemal asuvate jaotus- või edastusvõrgu osades.
- Pingemuhkudest on kõige sagedasemad kestusega kuni 1 s ja ulatusega 1,1…1,3 U_{nimi} ning lühiajalised pingemuhud kestusega kuni 20 ms ja ulatusega kuni 1,7 U_{nimi}. Probleeme on tekitanud just teist liiki pingemuhud, mis on põhjustanud elektroonsete seadmete toiteahelate riknemist.

Järeldused: Tarbijate jaoks on kõige suuremaks probleemiks just pingelohud ja lühiajalised katkestused (sh faasikatkestused) kestusega kuni 3min. Seejuures on suur enamus pingelohkudest kestusega kuni 3 sekundit, samuti on enamus katkestustest kestusega ainult mõni sekund.

1.1.11 Toitepinge ja –voolu harmoonilised moonutused

Kui ideaalsel juhul on pinge ja vool siinuselise lainekujuga, siis reaalselt on nii pinge kui ka vool vähem või rohkem siinuslainest erineva kujuga perioodilised protsessid.

Kõiki perioodilisi protsesse saab esitada Fourier' teisenduse abil reana, mis koosneb eri sagedusega siinuskomponentidest. Põhikomponendi sagedus on 50 Hz. Ülejäänud pinge või voolu harmoonilised komponendid on põhisageduse kordse sagedusega. Igal komponendil on oma amplituudväärtus ja algfaasinurk. Seega avaldub pinge ja voolu hetkväärtus harmooniliste komponentide summana:

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t) + u_3(t) + \ldots \quad \textbf{(1.7)}$$

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) + \ldots \quad \textbf{(1.8)}$$

Kui pinge- või voolukõvera positiivne ja negatiivne poolperiood on sama kujuga, siis alaliskomponent kõveral puudub. Sel juhul koosneb Fourier' rida ainult paaritutest harmoonilistest komponentidest, mida iseloomustatakse nende sagedusega (nt 250, 350, 550, 650 Hz) või nende järguga *h*, mis näitab nende kordsust põhiharmoonilise suhtes, vastavalt *h*5, *h*7, *h*11, *h*13 jne.

Harmoonilisi komponente sisaldava mittesiinuselise voolu allikaks on kõik seadmed, mille pinge-voolutunnusjoon on mittelineaarne. Niisugused seadmed on kõik alaldid, muundurid ja küllastuva magnetahelaga ferromagnetseadmed. Elektriseadme voolu harmoonilised komponendid võivad olla ajas püsivad (nt muunduriga luminofoorlambid) või ajas muutuvad (nt sagedusmuundurid, sujuvkäivitid, keevitusseadmed).

Pinge või voolu kõrgemate harmooniliste komponentide osakaalu iseloomustatakse kogumoonutusteguritega *THD* (*total harmonic distortion*), mis arvutatakse vastavatest seostest:

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (U_h)^2}}{U_1} \quad \textbf{(1.9)}$$

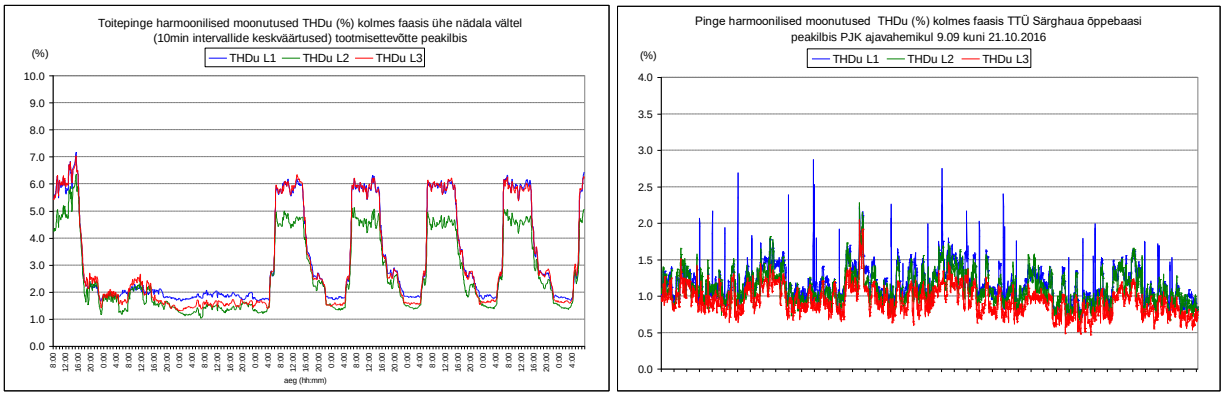
$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I_h)^2}}{I_1} \quad \textbf{(1.10)}$$

Pinge (voolu) kogumoonutustegur näitab, kuivõrd on tarbija pingekuju (voolukuju) moonutatud võrreldes siinuskõveraga. Voolu suur moonutustegur pole iseenesest kriitiline, kui selle voolu efektiivväärtus on võrreldes toiteahela nimivooluga väike.

Pinge ja voolu harmooniliste komponentide lubatud piirväärtused on esitatud standardites. Standard EVS-EN 50160:2010 sätestab piirväärtused pinge harmoonilistele komponentidele ja kogumoonutusele, standard IEC 61000-3-2:2014 voolu harmoonilistel komponentidele kuni 16 A (kaasa arvatud) nimivooluga seadmetele ja standard IEC 61000-3-12:2011 seadmetele nimivooluga üle 16 A kuni 75 A.

Standardi EVS EN:50160 kohaselt peab pinge kogumoonutustegur THDu olema alla 8 %. Samuti on sätestatud üksikute harmooniliste komponentide piirväärtused, milledest suurim lubatud piirväärtus on pinge viiendal harmoonilisel - 6%. Paljudes uurimustes on jõutud seisukohale, et pinge kogumoonutuste THD_u tase üle 5% pole soovitatav, sest põhjustab elektrisüsteemis lisakadusid. Pinge kogumoonutuste tase üle 10% pole võimalike häiringute tõttu lubatav.

Toitepinge harmoonilisi moonutusi saab registreerida pingekvaliteedi analüsaatoriga. Oluline on mõõtmistel uurida harmooniliste moonutuste ulatust just pikema ajavahemiku vältel, kuna moonutuste ulatus on ajas pidevalt muutuv. Pinge harmooniliste kogumoonutuste näiteid on esitatud joonistel (Joonis 1.12).



Joonis 1.12.Toitepinge harmoonilised kogumoonutused THDu ,
10 min intervallide keskmised väärtused

1.1.12 Värelus ehk flikker

Värelus ehk flikker on nähtus, mida inimene tajub valgusallikate valgusvoo või selle spektri muutusena. Väreluse põhjuseks on suhteliselt aeglased pingemuutused, kusjuures seda mõjutavad nii pingemuutuste suurus kui ka sagedus ning valgusallika tüüp. Väreluse sagedus on võrgusagedusest väiksem, tavaliselt alla 30 Hz. Kõige häirivam on värelus siis, kui selle sagedus on 8…9 Hz. Sellest suuremal või väiksemal sagedusel valguse värelus väheneb.

Värelust põhjustavad näiteks järgmised elektriseadmed väikese lühisvõimsusega jaotusvõrgus:

- tsüklilise koormusega asünkroonmootorid, nt puidutööstuses, saeveskites, metallide survetöötlemise tsehhides;

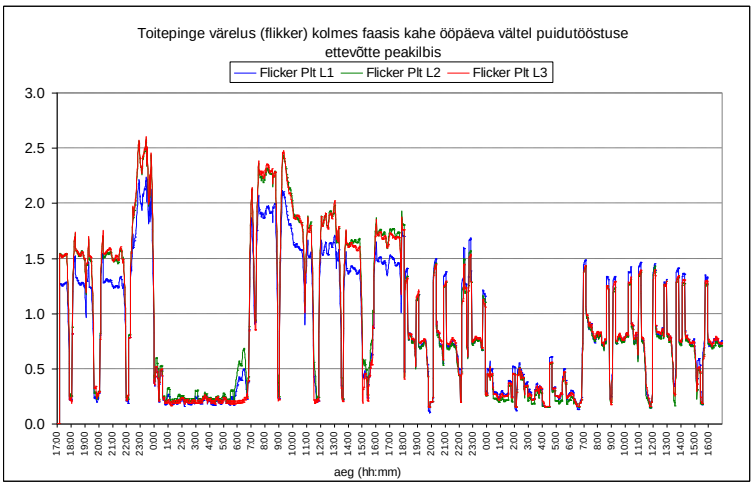
- suure võimsusega seadmete (nt õhu- või külmakompressorid, pumbad, tuulelektrijaamad) sisse-väljalülitamine;
- elektrooniliselt juhitavad soojendus- ja kütteseadmed, kus juhtimine toimub türistorlülititega;
- keevitusseadmed, sh ka kodukasutuseks mõeldud keevitusseadmed, eriti punktkeevitusseadmed.

Väreluse intensiivsust (*flikker severity*) arvutatakse pinge väärtuse ja pinge keskmise efektiivväärtuse suhtena. Standardi EVS-EN:50160 kohaselt ei tohi väreluse intensiivsus nädalase mõõteperioodi korral ületada 95% tõenäosusega väärtust P_{lt} = 1,0. Väreluse intensiivsust mõõdetakse kahes ajavahemikus:

- lühiajavärelus P_{st} (*short term flicker*), mida mõõdetakse 10 min ajavahemikes, katseliselt tunnetab inimene värelust alates väärtusest P_{st} = 1,0;
- pikaajavärelus P_{lt} (*long term flicker*), mis tähendab 2 tunni väreluse intensiivsust ja mis arvutatakse lühiajaväreluse kaudu valemiga:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} (P_{st}^3 / 12)} \qquad \textbf{(1.11)}$$

Toitepinge väreluse mõõtetulemused 0,4 kV elektrivõrkudes rahuldavad enamasti standardi EVS-EN:50160 nõudeid, kuigi üksikutel juhtudel on väreluse tase kõrgem. Selliseid näited on registreeritud keevitusseadmete kasutamisel ning puidutööstuses, vt Joonis 1.13, kus asünkroonmootorite koormus perioodiliselt muutub. Erinevus nende juhtumite vahel on selles, et kui keevitusseadmete puhul esines väreluse kõrge tase kahes faasis, siis puidutööstuses kõigis faasides.

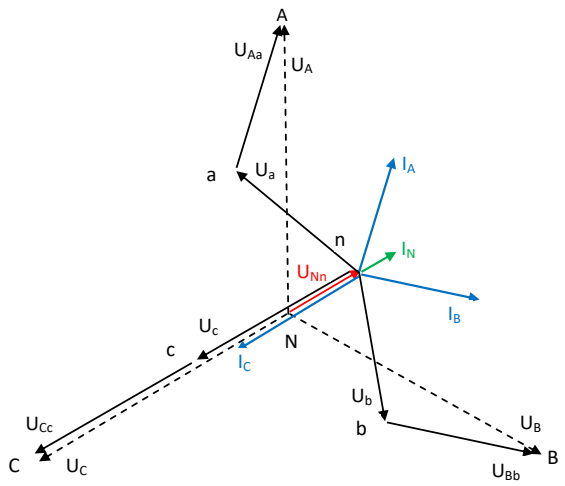


Joonis 1.13. Puidutööstuse masinate tsüklilisest tööst põhjustatud värelus pinges.

1.1.13 Toitepinge asümmeetria ja neutraalinihe

Ideaalsel juhul on kolmefaasilise süsteemi pinged sümmeetrilised, s.t. faasipingete efektiivväärtused on võrdsed ja eri faaside pingevektorite nihkenurgad on võrdsed. Tegelik pinge on aga vähem või rohkem asümmeetriline. Pinge asümmeetrilisus on põhjustatud peamiselt faasikoormuste erinevusest ja/või neutraaliahela suurest takistusest. Sellisel juhul räägitakse **neutraalinihkest**. Toitepingete asümmeetriat põhjustavad teatud määral kõik elektriseadmed, mis ei ole sümmeetrilises kolmefaasilises lülituses.

Toitepingete asümmeetriat ja neutraalinihet selgitav joonis on esitatud joonisel 1.16. Pinged U_A, U_B ja U_C on pinged toiteallika (trafo) klemmidel ning pinged U_a, U_b ja U_c on pinged tarbija klemmidel asümmeetriliste koormusvoolude olukorras. Neutraalpunkti nihkepinge on U_{Nn}.



Joonis 1.14. Neutraalinihe U_{Nn} kolmefaasilises võrgus

Asümmeetriline seisund võib olla kestev või lühiajaline. Kestva asümmeetrilise seisundi põhjusteks on tasakaalustamata faasikoormused. Lühiajaliste asümmeetriliste seisundite põhjuseks võivad olla rikked – faasijuhtide katkemised või lühised (ühe- ja kahefaasilised lühised või maaühendused jaotusvõrgu õhuliinides).

Asümmeetrilise seisundi iseloomustamiseks kasutatakse sümmeetriliste komponentide meetodit, mille kohaselt võib kolmefaasilist pingevektorite süsteemi esitada kolme sümmeetrilise süsteemi, s.o päri-, vastu- ja nulljärgnevussüsteemi vektorite $\underline{U}_1$, $\underline{U}_2$ ja $\underline{U}_0$ summana.

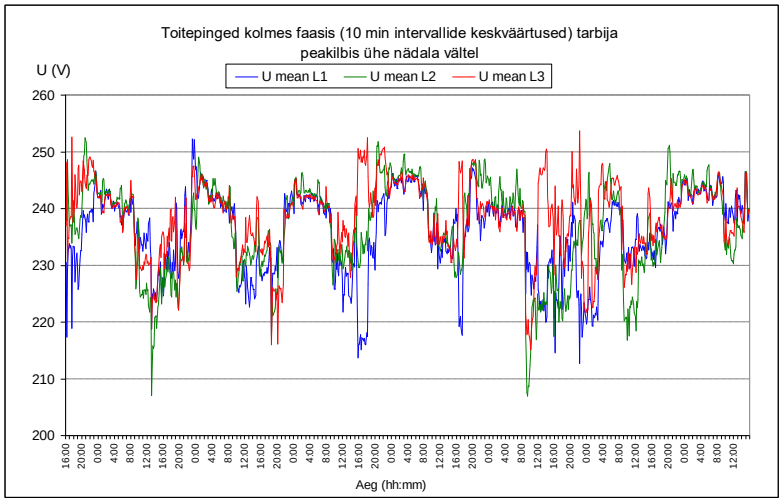
Pinge asümmeetriat iseloomustatakse asümmeetriateguritega. Nendeks on vastujärgnevustegur ehk vastujärgnevus- ja pärijärgnevuskomponendi suhe K_{2U} ja nulljärgnevustegur ehk nulljärgnevus- ja pärijärgnevuskomponendi suhe K_{0U}. Asümmeetriategurid arvutatakse järgmiselt:

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_1} 100\% ; \qquad (3.20)$$

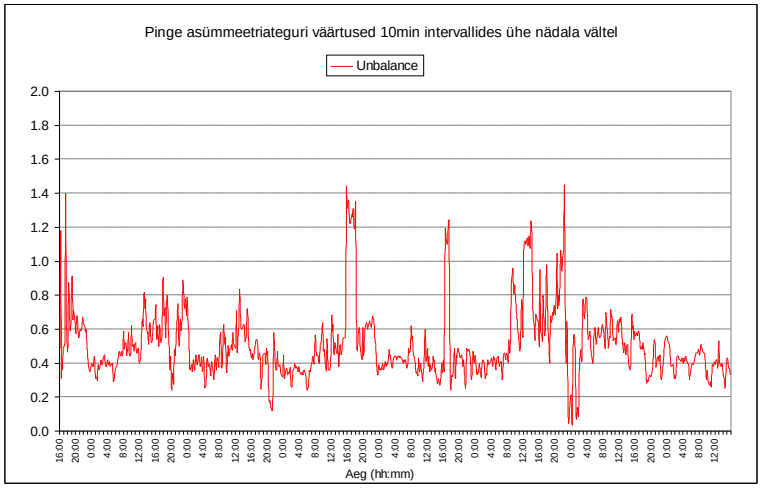
$$K_{0U} = \frac{U_0}{U_1} 100\% . \qquad (3.21)$$

Standardi EVS-EN: 50160 kohaselt peab nädalase kestusega mõõtmistel normaaltalitlusel 95% K_{2U} keskmistest väärtustest olema väiksemad kui 2%. Paljudes uurimustes soovitatakse sellele asümmeetriategurile poole väiksemat piirväärtust ehk 1%. On jõutud järeldusele, et kolmefaasilistes mootorites tekivad arvestatavad lisakaod, kui asümmeetriategur on oluliselt suurem kui 1%. Standard annab piirväärtuse üksnes vastujärgnevuskomponendile, sest just see komponent on mootorite lisakadude põhjustamisel oluline. Nulljärgnevustegur K_{0U} ei ole standardiga EVS-EN: 50160 normitud, küll

aga on normitud näiteks Venemaa standardis GOST 13109. Tasakaalustamata koormusest tingitud pinge asümmeetria ilmneb eriti märgatavalt siis, kui neutraaljuhi takistus on suurem kui liinijuhi takistus. Näitena on joonistel Joonis 1.15 ja Joonis 1.16 esitatud kolm faasipinget asümmeetria tingimustes ühe nädala vältel.



Joonis 1.15. Asümmeetrilised pinged tarbija peakilbis ühe nädala vältel



Joonis 1.16. Asümmeetriateguri väärtused eelmisel joonisel (Joonis 1.15) toodud juhtumil

Järeldused asümmeetriateguri mõõtetulemuste kohta

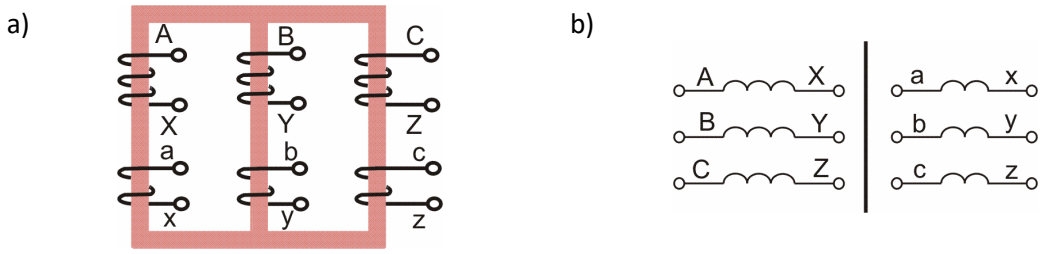
- Asümmeetriateguri väärtus on peaaegu alati standardiga lubatud (2%) piirides ja enamasti ka soovitatavates piirides (kuni 1%).
- Kuna pingete asümmeetria pole otseselt häiriv, siis tarbija 0,4 kV elektrisüsteemis jääb see parameeter tähelepanuta seni, kuni faasipinged jäävad soovitavasse vahemikku. Probleem pingete asümmeetriaga võib esineda suure takistusega toiteahela puhul, kui faasikoormused pole tasakaalus ning samuti avariilistes talitluses.

- Faasikoormuste ühtlustamiseks on olemas tasakaalustusseadmed, mis paigaldatakse fiidri kaugemasse ossa. Selline lahendus ühtlustab faasivoolusid liinijuhtides ning vähendab voolu neutraaljuhis. Sellega tõuseb pinge kvaliteet, vähenevad pingekõikumised ning pinge asümmeetria.

1.1.14 Kolmefaasiliste trafode mähiste ühendusskeemi mõju pinge kvaliteedile

Pinge kvaliteet sõltub osaliselt sellest, missugust trafot kasutatakse jaotusvõrgus viimase astme (KP/MP) trafona. Kolmefaasilisel trafol on vähemalt 6 mähist. Kuue mähise ühendamiseks on 12 ühendusklemmi. Selleks, et trafot õigesti elektriskeemi või elektrivõrku ühendada, on vaja iga ühendusklemmi kohta teada, millisele mähisele see kuulub ja kas see on mähise algus või lõpp.

Mähiseklemmide tähiseid kasutatakse nii reaalse trafo klemmidel kui ka vastavas elektriskeemis (Joonis 1.17). Kolmefaasilise trafo skeemis joonestatakse mähised risti magnetahela tähisega, milleks on jämedam sirgjoon (Joonis 1.17, *b*), ühefaasilise trafo skeemis on mähised magnetahela tähisega rööbiti.



Joonis 1.17. Kolmefaasilise trafo mähiste ruumiline paigutus magnetahelal (*a*) ja sama trafo kujutamine elektriskeemis (*b*), kui mähised ei ole ühendatud.

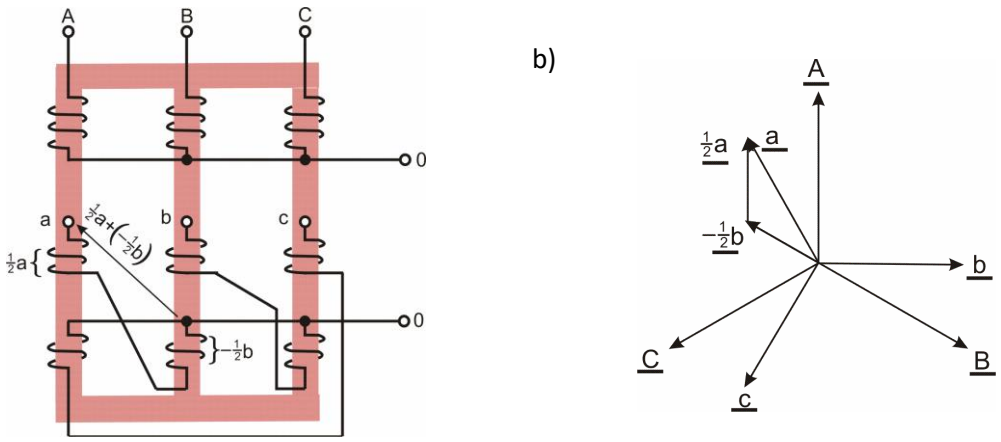
Kolmefaasilise trafo mähiste ühendamisel hoitakse sellega ühendusjuhtmeid kokku, et osa klemme ühendatakse omavahel vahetult trafos. Kasutatakse kas tähtühendust või kolmnurkühendust. Ühendusskeemi valikul lähtutakse praktilistest kaalutlustest. Näiteks liinipingetel 35 kV ja enam on kasulik ühendada mähised tähte ja mähiste ühenduspunkt maandada. Siis tekib olukord, kus liinijuhtmete pinge maa suhtes on $\sqrt{3}$ korda väiksem, kui liinijuhtmete omavaheline pinge. Sellega väheneb isolatsiooni, sealhulgas õhuliini isolaatorite maksumus.

Madalpingevõrkudes kasutatakse samuti tähtühendust, sest siis saab elektriseadmed ühendada faasi ja neutraali vahele pingel 230 V, kuid võimsamad elektrimootorid pingele 400 V.

Voolu kõrgemate harmooniliste vähendamise seisukohast on aga parem mähiste kolmnurkühendus. Sellepärast on soovitatav, et üks mähistest – kas ülem- või alampingemähis, oleks ühendatud kolmnurka.

Võimsuskadude ja võrgupinge kvaliteedi suhtes on kolmnurkühendusest veel parem mähiste siksakühendus. Siksakühenduse korral koosneb iga faasi mähis kahest võrdse keerdude arvuga osast, mis asuvad trafo eri sammastel ja on ühendatud jadamisi. Sealjuures ei ole jadaühendus tavaline (tavaliselt ühendatakse esimese osa lõpp teise osa algusega), vaid teise osa lõpp ja algus on ära vahetatud. Järgneval joonisel (Joonis 1.18), *a* on trafo magnetahel tähte ühendatud primaarmähise ja siksakühenduses sekundaarmähisega.

a) b)



Joonis 1.18. Mähiste paigutus magnetahelal täht-siksakühenduse korral (*a*) ja sellele vastav faasivektorite diagramm (*b*).

Magnetvoo faas trafo sambas A (kõige vasakpoolsem sammas joonisel) on määratud primaarpoole *A*-faasi pinge faasiga (faasivektorite diagramm Joonis 1.18, *b*). Samas faasis on ka *A*-faasi sekundaarmähise selle osa pinge, mis asub sambal A (selle mähiseosa tähiseks on $\frac{1}{2}a$). *A*-faasi sekundaarmähise teine osa asub sambal B (selle mähiseosa ja vastava pinge faasivektori tähiseks on joonisel $-\frac{1}{2}b$). Kuna sambal B oleva mähiseosa $-\frac{1}{2}b$ algus ja lõpp on vahetatud, on faasivektori $-\frac{1}{2}b$ suund diagrammil vastupidine primaarpoole *B*-faasi pinge faasivektoriga. Sekundaarpoole *A*-faasi pinge faasivektor $\underline{a}$ on mähiseosade $\frac{1}{2}a$ ja $-\frac{1}{2}b$ pingete faasivektorite summa. Diagrammilt on näha, et trafo primaarpingesüsteem (faasivektorid $\underline{A}$, $\underline{B}$ ja $\underline{C}$) ja sekundaarpingesüsteem (faasivektorid $\underline{a}$, $\underline{b}$ ja $\underline{c}$) ei ole samas faasis. Siksakühendus annab sekundaar- ja primaarpingete faasinurkadele 30-kraadise erinevuse. Tavaliselt vaadatakse sekundaarpinge faasi (faasivektori $\underline{a}$) nihet primaarpinge faasi (faasivektori $\underline{A}$) suhtes, mis on 330° (faasivektorid pöörlevad vastu kellaosuti liikumissuunda).

Diagrammilt on veel näha, et mähiste $\frac{1}{2}a$ ja $-\frac{1}{2}b$ pingete summa on faasinihke tõttu väiksem, kui nende mähiste pingete aritmeetiline summa (aritmeetilise summa saame faasinihke puudumisel). Pinge väheneb $2/\sqrt{3}=1{,}15$ korda. Pinge vähenemise kompenseerimiseks tuleb mähise keerdude arvu 1,15 korda suurendada. See on siksakühenduse puuduseks, sest trafo on seega veidi kallim.

Siksakühenduse üheks eeliseks on, et mittesümmeetrilisel koormusel ei teki sekundaarpoolel märkimisväärset faasipingete erinevust, kuna ühe faasi koormusvool tuleb trafo kahel sambal paiknevate mähiste kaudu.

Teiseks eeliseks on, et kolmanda harmoonilise vool ja kolmega kordsed kõrgemat järku harmoonilised voolud ei jõua sekundaarpoolelt primaarpoolele. Need voolud on küll kõigis kolmes faasijuhis *A*, *B* ja *C* ühes ja samas faasis, kuid trafo mis tahes ühel sambal asuvates sekundaarmähise osades on need voolud vastasfaasis ja kompenseeruvad.

1.2 Pikaajalise võrguinvesteeringu tegemise riskid ja puudused Eesti hajaasustuse rahvastikuprotsesside taustal.

1.2.1 Pikaajalisi investeeringuid mõjutavad tegurid

Seoses tänapäevaste elektrienergia tarbimise ja tootmise tendentside suure ebamäärasusega on pikaajaline investeerimine elektrivõrkude arendamisse ja rekonstrueerimisse muutunud märgatavalt riskantsemaks. Peamiste määramatust põhjustavate teguritena tuleks nimetada:

- **Koormuste suuruse, paiknemise ja/või struktuuri muutused.** Võrreldes suure osa Eesti jaotusvõrgu rajamise ajaga on tarbimise paiknemine ja määrad märgatavalt muutunud – endiste suurmajapidamiste keskused on taandarenenud, maapiirkondades on hääbunud paljud üksikmajapidamised, endised suvilarajoonid muutuvad elurajoonideks, ümber paikneb tööstus jne. Ligikaudu 50 000-s ehk 8%-s Elektrilevi OÜ poolt hallatavas tarbimiskohas on tarbimine minimaalne või puudub sootuks.
- **Kohaliku elektritootmise areng**. Elektrivõrkude arengu planeerimisel on üha olulisemaks teguriks elektrienergia väikese võimsusega (kuni 10 MW) kohalik tootmine ehk nn hajatootmine.
- **Tarkvõrgu arendamine**. Tänaseks väljakutseks jaotusvõrkudele on tarkvõrgud, mis integreerivad arukalt kõigi võrku ühendatud klientide – tarbijate ja tootjate – käitumist ja tegutsemist, et kindlustada jätkusuutlik, ökonoomne ja turvaline elektrivarustus. Tarkvõrgu nurgakivideks on võrgu struktuur, rikete ohjamine, varustuse kvaliteet, hajatootmine, energia salvestus ja mikrovõrgud, arukad info-, kaitse- ja telekommunikatsioonisüsteemid ning jõuelektroonikal põhinevad liidesed. Tarkvõrkude arendamise eelduseks on ulatuslik standardiseerimine ja seadusandluse harmoneerimine.
- **Elektrivõrgu seadmete tehnilise ressursi (eluea) ammendumine**. Suur osa jaotusvõrgu alajaamu ja elektriliine on nii tehniliselt kui moraalselt vananenud. Paljude seadmete tööiga ületab 30-40 aastat. Vananenud seadmete uuendamine on ühest küljest paratamatu, teisest küljest aga pikemas perspektiivis sageli ka majanduslikult tasuv töökindluse kasvu, käidu- ja hooldekulude ning energiakadude vähenemise ja klienditeeninduse kvaliteedi paranemise arvel. Silmas tuleb pidada võimalikke tehnoloogilisi uuendusi (uued jaotlate, lülitite, juhtmete ning kaablite tüübid, automatiseerimis- ning juhtimisvahendite areng jms), seadusandluse ja klientide poolt võrgule esitatavate nõuete (töökindluse, pinge kvaliteedi, ohutuse ja loodushoiu osas) muudatusi, reaktiivvõimsuste kompenseerimise vajadusi jne.
- **Elektrivõrkude nimipingete süsteemi korrastamine**, mille eesmärgiks on vähendada elektrivõrgu nimipingete nomenklatuuri seniselt kuuelt kesk- ja kõrgepingeastmelt (6, 10, 15, 20, 35, 110 kV) kolmele pingeastmele (10, 20 ja 110 kV).

Lisaks põhjustavad ebamäärasust tariifisüsteemi areng, seadmete, materjalide ning maa hinna muutused, töötasu määrade, inflatsiooni ning laenuintresside määra muudatused jne.

Käesoleva töö kontekstis pöörame siin eelkõige tähelepanu kahele esimesele tegurile, millega kaasnevad kõige olulisemad määramatused ja mis seega mõjutavad investeerimisriske kõige enam. Ülejäänud tegurid on rohkem traditsioonilist laadi, mille arvestamisel on olemas pikemaajalised kogemused.

1.2.2 Varustuskindluse piirkondade lähenemisviis

Investeerimisotsustuste tegemisel tuleb kindlasti arvestada tarbijate varustuskindlusega seotud ühiskondlikku kahjumit. Selliste kahjude arvestamine tingib asukohast sõltuvaid võrgu tehnilisi lahendusi. Ühiskondlikust kahjumist lähtuv investeeringute hindamise metoodika on ainuüksi majanduslikust seiskohast õige, kuid tekitab teatud sotsiaalset ebaõiglust hajaasustuspiirkondade (valdavalt maapiirkonnad ja nn äärealad) tarbijate suhtes. Seega ei saa sellist lähenemisviisi vaadata lahus Eesti regionaalpoliitikast. Seetõttu rakendab Elektrilevi lähenemisviisi, mille kohaselt on võrk jaotatud teatud nn varustuskindluse piirkondadeks, milles on määratletud tarbijate ootuste ja võimalustega tasakaalus olevad selged varustuskindluse eesmärgid.

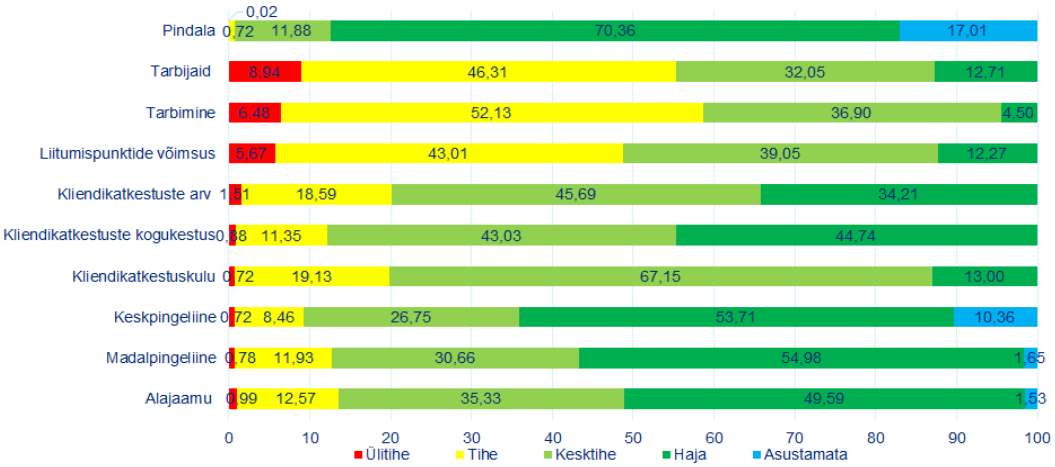
Varustuskindluse piirkondade all mõistab Elektrilevi OÜ jaotusvõrgu tüüpilisi osi, millele püütakse rakendada ühtseid lahendusi võrgu skeemi ja konstruktsiooni, KP/MP alajaamade paiknemise, võrgu kaugjuhtimise, kaitse ja automaatika, rikete lokaliseerimise ja kõrvaldamise ning käidu põhimõtete osas. Varustuskindluse piirkondade ja vastavate tüüplahenduste piiritlemine võimaldab kuluefektiivsemalt jaotada ressursse ning nende rakendamise prioriteete. Eesmärgiks on igale varustuskindluse piirkonna tüübile enim sobiva investeerimisstrateegia valik, tagamaks kogu võrgu vähimkulu arendamine ja käit nõuetekohase elektrivarustuskindluse ning kvaliteedi juures.

Võttes arvesse territooriumi asustatust (tarbimiskohtade tihedust pinnaühiku kohta) ja tarbimise iseloomu (tarbimistihedust), on Elektrilevi varustusalal eristatavad klientide paiknemistiheduselt sõltuvalt neli iseloomulikku varustuskindluse piirkonda [VAL13]:

- **Hajavarustuspiirkond** /*rural area*/ - maapiirkondadele, küladele tüüpilise klientide paiknemis-tihedusega piirkond, kus iseloomulikud on talud, eramud väikeste gruppidena, väike ning keskmine põllumajandustootmine, maale iseloomulikud väikesed teenindusettevõtted.
- **Kesktihevarustuspiirkond** /*suburban*, *low density area*/ – üle 4000 elanikuga linnade äärelinnad, perifeersed alla 4000 elanikuga linnad, endised agraarkeskused, alevid, alevikud, aiandusühistud. Iseloomulikud on keskmised ja väikesed kortermajad, ridaelamud, eramud, kodutarbimine.
- **Tihevarustuspiirkond** /*urban*, *density area*/ – mitteperifeersete kasvupiirkondade (Tallinn, Tartu, Pärnu, Kuressaare, Narva, Jõhvi, Viljandi, Haapsalu, Paide, Rakvere) kesklinnad [ÜPE2012], linnaosade ja äärelinnade keskused, tehnopargid, liftidega korterelamute linnaosad, üle 4000 elanikuga linnade keskused. Iseloomulikud on kortermajad, domineerib äri ja avalike teenuste osutamine.
- **Ülitihevarustuspiirkond** /*urban core*, *high density area*/ – suurte kasvupiirkondade – Tallinna, Tartu, Pärnu [ÜPE2012]. Iseloomulik on tihe kõrghoonestus, äri ja avalike teenuste koormus koos vähese kodutarbimisega (kortermajad).

Investeerimisriskide vähendamiseks eristatakse neis piirkondades varustuskindluse taset ja neis tuleks tasakaalustada ühiskondlikult vastuvõetavat katkestuskahju ja võrguteenuse hinda.

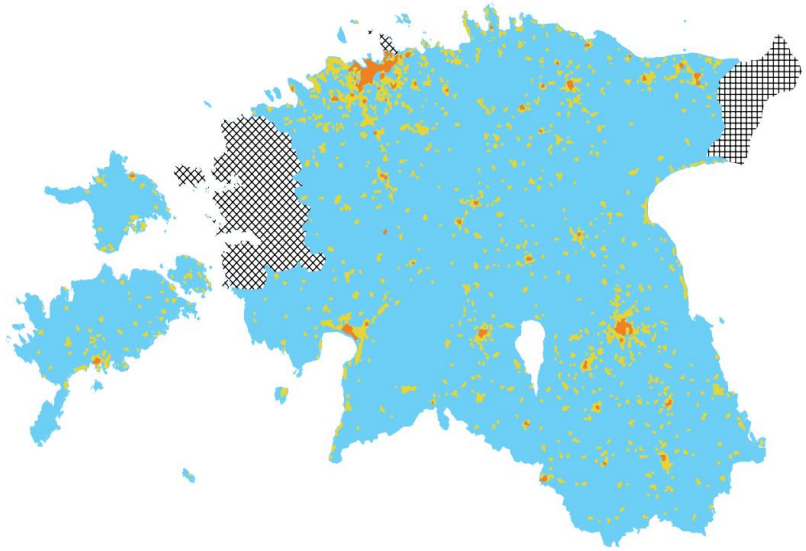
Joonis 1.19 on esitatud varustuskindluse piirkondade kokkuvõtlikud näitajad [VAL14].



Joonis 1.19. Varustuskindluse piirkondade protsentuaalsed koondnäitajad [VAL13]

1.2.3 Pikaajalised võrguinvesteeringud rahvastikuprotsesside taustal

Hajavarustuskindluse piirkonda kuulub üle 70 % Elektrilevi OÜ teeninduspiirkonna territooriumist ja üle poole jaotusvõrgu elektriliinide ulatusest. Samas paikneb selles piirkonnas 13% klientidest, kes tarbivad ainult 4 % kogu võrku läbivast elektrist (Joonis 1.20).

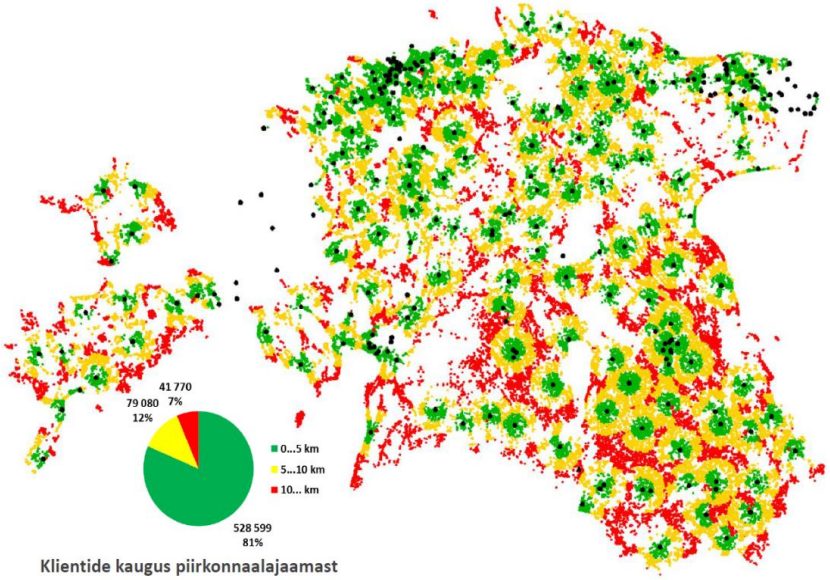


Joonis 1.20. Elektrilevi OÜ klientide hajapaiknemine: sinisel territooriumil paikneb 60% võrgust, aga ainult 13 % klientidest, kes tarbivad 4% võrku läbivast elektrist [VAL14]

Hajavarustuspiirkonna liinid paiknevad enamuses keskustest kaugel (Joonis 1.21), on pikad, sageli metsa mõjualas, nende hooldamine ja rikete ning tormikahjude kõrvaldamine on seotud suurte kuludega.

Paljud elektriliinid ja alajaamad hajavarustuspiirkonnas on rajatud kuuekümnendail-seitsmekümnendail aastail ja nende tehniline seisund jätab soovida. Fiidrite suured pikkused, sektsioneerimisvõimaluste ja

rikete avastamise automaatika vähesus neis piirkondades teevad rikete avastamise ja kõrvaldamise aeganõudvaks, põhjustades pikki katkestuskestusi. Hajavarustuspiirkonnas moodustab katkestuste arv umbes kolmandiku nende koguarvust ja katkestuste aeg ligi poole katkestuste koguajast võrgus tervikuna. Tõenäoliselt on need näitajad suuremadki, sest hajavarustuspiirkonnas on ca 45 000 tarbimiskohta, mille katkestused jäävad sageli registreerimata, sest tarbimine neis praktiliselt puudub.

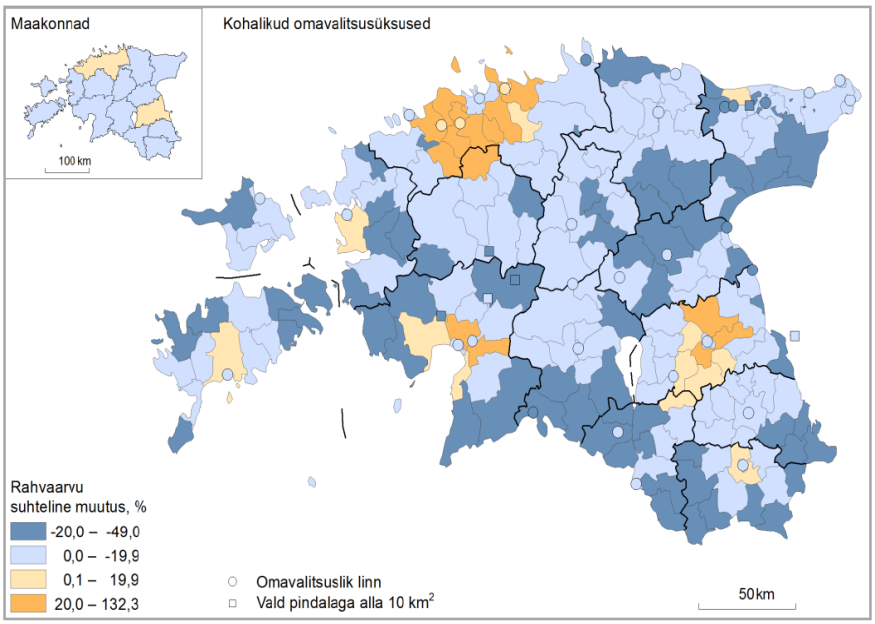


Joonis 1.21. Klientide kaugused piirkonnaalajaamadest [VAL14]

Maapiirkondade, eelkõige ääremaade arenguga seotud määramatused tekitavad Elektrilevi OÜ-le olulisi finantsriske hajavarustuspiirkondade elektrivarustuse arendamisel. Ääremaade all mõistetakse maakonnakeskustest kaugemal asuvaid väheneva elanikkonnaga maapiirkondi. Ääremaalised on ligi pooled omavalitsused, kus elab ligikaudu 140 000 inimest ja mis hõlmavad üle 50% Eesti pindalast [ERS14]. Lisaks võib esile tuua veel vallad, mille keskus on linnadega küll hästi ühendatud, kuid mille üksikud osad on väga hõredalt asustatud ja halvasti ligipääsetavad [EIR10].

Ääremaadel valitseb tarbimise ja sealsete kesktihe- ja hajavarustuskindluse piirkondade taandarengu oht. Ääremaa tunnustega piirkondade osatähtsus Eesti rahvastikus ja pindalas kasvab linnastumise ja valglinnastumine, maaelanikkonna vananemise ning negatiivse iibe tõttu. Aeglane linnastumine ja valglinnastumine maaelanikkonna kahanemise arvel jätkub (Joonis 1.22).

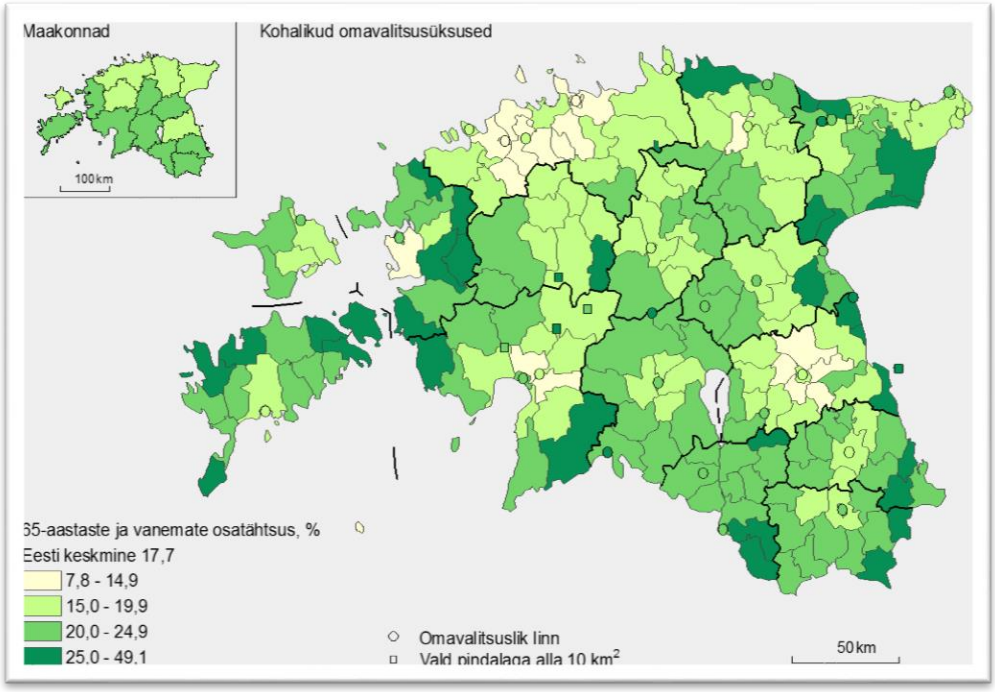
Ääremaalisi kogukondi kammitseb haridus-kultuuriline mahajäämus: kolmanda haridustasemega hõivatute osakaal on ligi poolteist korda väiksem Eesti keskmisest ja kaks korda väiksem Tallinna linnastust. [ERS14]. Et ääremaalised piirkonnad on pikemat aega kaotanud nooremaid ja aktiivsemaid elanikke, siis on nende rahvastik vananenud märgatavalt kiiremini kui Eestis tervikuna (Joonis 1.23). Eakate osakaal suureneb kõige kiiremini Ida-Virumaal ja Läänemaal. Maapiirkondadest jätkub noorte väljaränne, linnadest pöörduvad põhiliselt tagasi eakamad, kui sedagi.



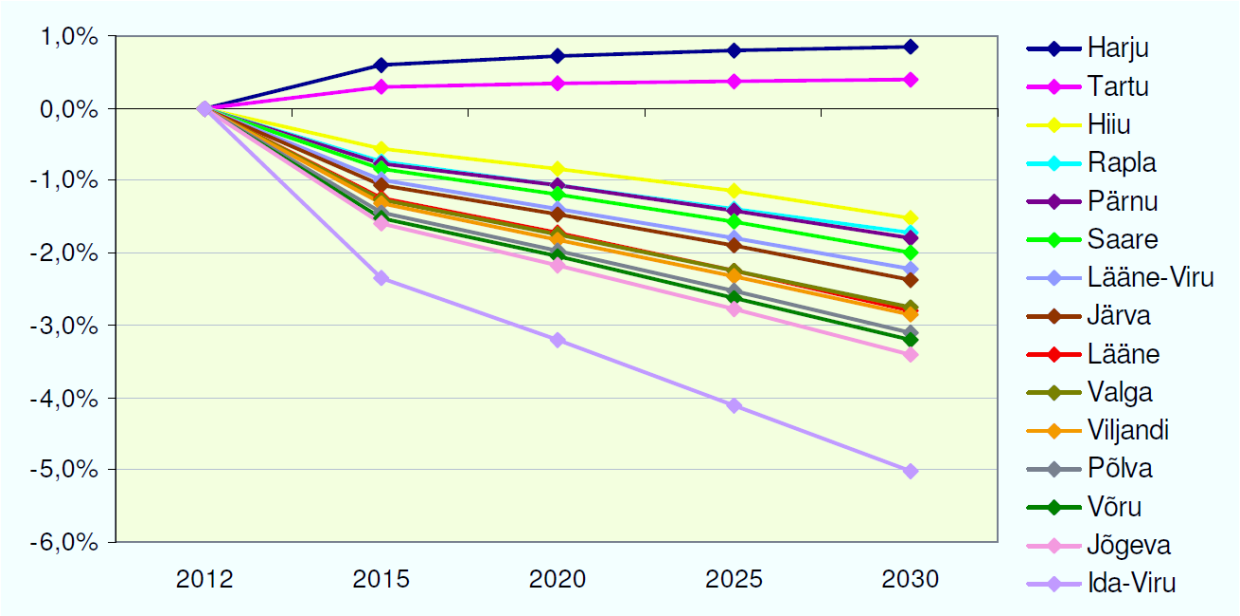
Allikas: Statistikaamet, rahva- ja eluruumide loendus 2011

Joonis 1.22. Rahvaarvu muutus (%) 31.03 2000 - 31.12 2011 [TII13]

Töös [RVA12] toodud rahvastikuprognoosi kõik kolm stsenaariumit näitavad Eesti elanike arvu vähenemist ja vananemist aastatel 2012-2030. Riigisiseselt toimub elanike arvu muutumine erineva kiirusega. Joonis 1.24 on maakonniti esitatud baasstsenaariumi korral rahvaarvu muutumise prognoos.



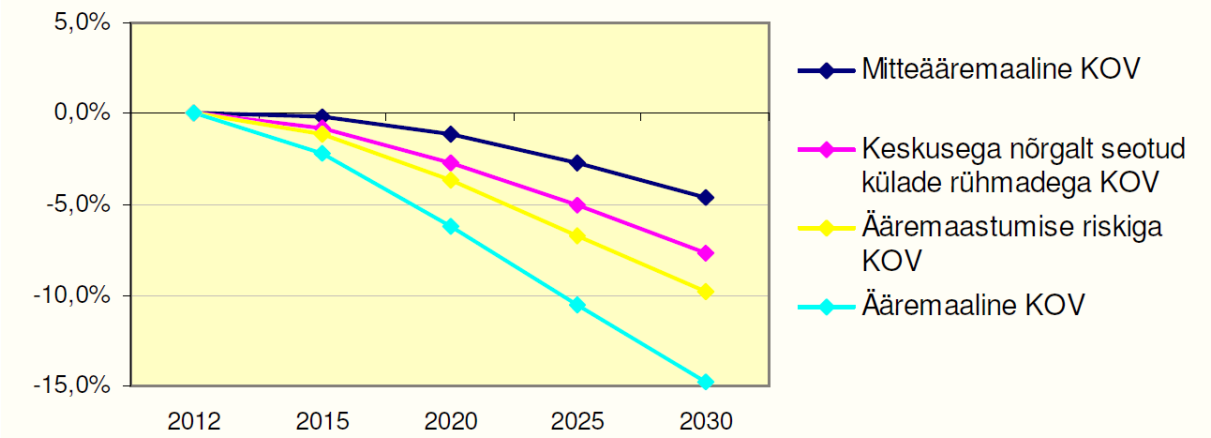
Joonis 1.23. Vähemalt 65-aastaste osatähtsus rahvastikus [TII13]



Joonis 1.24. Rahvaarvu prognoos maakonniti, baasstsenaarium [RVA12]

Nagu näha, on paremas seisus rahvastiku olukord Harjumaal ja Tartumaal. Ülejäänud maakondi iseloomustab selgelt negatiivne rahvastikuareng – elanike arvu keskmisest kiirem kahanemine ja eakate osakaalu suurenemine. Aastani 2030 süveneb negatiivne rahvastikuareng ennekõike Ida-Virumaal, Jõgevamaal ja Lääne-Eesti maakondades – Läänemaal ja Hiiumaal.

Rahvastiku arengu trendide erinevused ilmnevad ka kohalike omavalitsuste (KOV) ääremaastumise taseme lõikes. Prognoosi kohaselt väheneb elanike arv ääremaastunud omavalitsusüksustes ligi kaks korda kiiremini kui ääremaastumisriskiga kohalikes omavalitsustes. Omavalitsusüksustes, kus on keskusega nõrgalt seotud külade rühmad, väheneb rahvastik aeglasemalt (Joonis 1.25).



Joonis 1.25. Rahvastiku prognoos omavalitsusüksuste ääremaastumise taseme alusel, baasstsenaarium [RVA12]

Maakonnakeskustest kaugemal paiknevad ääremaalised ja ääremaastumise riskiga kohalikud omavalitsused kaotavad elanikke kõigis maakondades.

Eestis välja kujunenud hierarhiline asustussüsteem [ÜPE2012] toob endaga kaasa investeeringute mehaanilise suunamise kõrgemal positsioonil olevatesse keskustesse, kus põhiargumentideks on keskne asend ja suurus. Jäiga hierarhia kaasnähtuseks – üldise rahvaarvu vähenemise taustal – on ulatuslik ääremaastumine ning linnalähedaste ja linnadest kaugel olevate piirkondade vahel laienev lõhe töökohtade ja teenuste kättesaadavuse ning sotsiaalmajandusliku heaolu osas. Elanike arvu kahanemine hajaasustuspiirkondades halvendab teenuste kättesaadavust ja elukvaliteeti. Sellised suundumused mõjutavad negatiivselt majanduse kasvuvõimalusi. Põllumajanduslike majapidamiste arv on vähenenud kiiremini kui EL-is keskmiselt [EMA14].

Siiski on majanduslikult aktiivsete ettevõtete arv viimasel aastakümnel järjekindlalt kasvanud nii Eestis tervikuna kui maapiirkonnas, kus ettevõtete arvu kasv oli isegi suurem [EMA14]. Samas hõlmab kasv peamiselt Põhja Eestit. Maaettevõtlus on küll arenenud ja muutunud mitmekesisemaks, kuid paljude suurematest linnapiirkondadest kaugemale jäävate piirkondade tööjõu, loodus- ja ajaloolis-kultuuriliste ressursside kasutuselevõtt pole ettevõtluse edendamiseks olnud piisav ja tööpuudus tervikuna on perifeersetes maapiirkondades endiselt kõrge. Pakutavate teenuste hulka ääremaades on vähendanud riigi- ja omavalitsussektori otsused (riigiasutuste ärakolimine, koolide sulgemine jms) ning ettevõtjate ärilised kaalutlused loobuda ebapiisava kasutajaskonna tõttu teenuste pakkumisest väiksemates asulates (nt. pangad, postkontorid, kauplused). Atraktiivsete töökohtade nappus ja teenuste piiratus väiksemates keskustes ning sealsed nõrgad keskuse-tagamaa vahelised seosed ei suuda kohalikke inimesi piirkonna majandusarenguks piisavalt ära kasutada ja loob pinnase väljarändeks.

Tulenevalt geograafilisest asukohast on Eesti kliima väga suure varieeruvusega. Samas kuulub Eesti piirkonda, kus on IPCC (2001) raporti järgi viimastel aastakümnetel keskmine õhutemperatuur kõige rohkem tõusnud. Seoses soojemate talvedega on tõusnud ka talviste tormipäevade arv, meie ilma mõjutavad rohkem tsüklonid ning talvine keskmine õhurõhk on langenud [EKI14]. Suurenenud tormisus suurendab maapiirkondades omakorda rikete ja elektrikatkestuste tõenäosust ning tekitab täiendava surve jaotusvõrgule varustuskindluse tagamisel.

Seega valitseb hajavarustuspiirkondade taandarengu oht ja elektrivõrgu koormuste negatiivse trendi perspektiiv.

Samas tuleb vältida Eestis tekkimast uusi piirkondi, kus puudub püsiasustus. Kestlik ja usaldusväärne energiasüsteem, s.h hästitoimiv jaotusvõrk, tagab majanduse ja igapäevaelu tõrgeteta toimimise. Kvaliteetse ja vastuvõetava hinnaga energia kättesaadavus kindlustab ettevõtluse arengu ja inimeste elamisvõimalused igal pool Eestis. Hajaasustuse probleemide kõrvaleheitmine võib ajutiselt kulutusi kokku hoida, kuid kaotab see-eest Eesti maastikulise eripära ning hävitab poollooduslikud kooslused.

Positiivse tendentsina asub maale, püsivalt või perioodiliselt, elama üha enam nn „ökoinimesi“. Samuti võib maapiirkondade looduslähedus osutuda atraktiivseks ka teatud hulgale inimestele teistest riikidest. Öeldu võib suurendada võimalusi nn „hõbemajanduse“ teenuste arendamiseks ja selles on omad võimalused ka väiksematel asulatel [ÜPE2012]. Arvestada tuleb energiatarbimise võimalike struktuursete nihetega ja tulevikuväljavaatega, uute ettevõtete loomise võimalusega üksikutes piirkondades. Selline areng selgub eelkõige kohalikest arengukavadest ja/või liitumistaotlustest.

Keskusest kaugemal paiknevate hajaasustusega äärealade puhul on peamine tagada elamisväärsed tingimused ja aidata kohanduda maaelu muutunud oludega. Piisava töökindlusega elektrivarustus aitab kaasa ettevõtluse edendamisele ning kogu toimepiirkonna vajadusi katvate teenuste arendamisele.

Elektrilevi OÜ ülesandeks peab muuhulgas olema elektrivarustuse kohandamine hõreasustuse tingimustele, et aidata kaasa maapiirkondades elamisväärse elukeskkonna ja igapäevaelu vajaduste rahuldamisele ning sellega rahvastiku vähenemise ja vananemise pidurdamisele. Selleks tuleb toetada hajaasustuspiirkondade elektrivarustuse uuenduslikku ja ökonoomset korraldust ning suunata hajatarbijate kohandumist. Üheks peamiseks küsimuseks jääb ühiskondliku kokkuleppe saavutamine hajaasustuspiirkonna jaoks sobivate varustuskindluse näitajate osas, et saavutada optimaalne võrguteenuse kvaliteet ilma ülemääraste ressursikuludeta tihedama asustusega piirkondades paiknevate klientide arvel.

Järeldus: Rahvastiku protsessidest tuleneva koormuste ümberpaiknemise tingimustes tuleb arvestada, et võrguteenuse osutamisest loobuda ei saa ja lahenduseks on avalike ja erateenuste mõistliku kvaliteeditaseme kokkuleppimine ja tagamine.

Lisaks eelnevale tuleb arvestada ühiskonna kasvava keskkonnaalase nõudlikkusega, mis raskendab elektripaigaldiste, eriti õhuliinide rajamist. Süveneb nn NIMBY ehk *Not in My Back Yard* sündroom, s.t kasvab elanikkonna vastuseis paigaldiste rajamiseks nende omandile või selle lähedusse.

Ülal öeldu põhjal võiks hajavarustuspiirkonna arengus arvestada eelkõige järgmiste võimalike elektritarbimise ja koormuse muutuste stsenaariumitega:

1. Mõõdukas (tagasihoidlik, jätkuv) tarbimise ja koormustipu kasv
2. Stabiilne tarbimine (tarbimine ja ka koormustipp ei kasva ega kahane)
3. Tarbimise taandareng (kahaneb tarbimine, võib-olla ka koormustipp)
4. Tarbimine jätkuvalt (täielikult või praktiliselt) puudub

Ühe või teise stsenaariumi realiseerumise tõenäosust mõjutavad järgmised peamised tegurid või asjaolud:

- Tarbimise ja koormustipu trend viimase 3…5 aasta jooksul;
- Koormusteguri (või koormustipu aja) suurus ja trend viimase 3…5 aasta jooksul;
- „Hõbemajanduse“ (hõlmab eakatele pakutavaid tooteid ja teenuseid) arendamise võimalus (määratud põhiliselt looduslike tingimustega - mere, järve, jõe lähedus, metsa olemasolu jms);
- Taristu olukord (asulate, teede lähedus, veevarustus, maaparandus);
- Olemasolevate rajatiste (hooned, piirded jms) seisukord;
- Kohaliku majanduse, ettevõtluse võimalused, s.h koolide, lasteaedade, pangaautomaatide jms lähedus;
- Maakonna, üld- ja detailplaneeringud (viimased on aluseks maakasutusele ja lähiaastate ehitustegevusele);
- Liitumistaotlused.

Analüüsides toodud faktoreid, oleks võimalik konkreetse hajavarustuspiirkonna jaoks omistada igale stsenaariumile tema realiseerumise hinnangulise tõenäosuse.

1.2.4 Kohaliku hajatootmise areng

Teiseks pikaajaliste investeeringute ebamäärasust suurendavaks peamiseks mõjuteguriks on elektri kohalik e hajatootmine, millega seonduvad ka uuemad tehnoloogilised arengusuunad, nagu prosuumerid, salvestustehnoloogiad, tarkvõrgud, pistikühendusega elektriautod, virtuaaljaamad. Samas loovad need tehnoloogiad uusi võimalusi investeerimisriskidega toimetulekuks.

Hajatootmine hõlmab eelkõige elektrituulikuid ja päikesepaneele, aga ka võrku integreeritud mikroturbiine, koostootmisjaamu, kütuseelemente, väikehüdrojaamu. Taastuvenergia väiketehnoloogia kasutuselevõtt parandab elamisvõimalusi ääremaade külades ja väikesaartel. Hajatootjateks on sageli lõpptarbijad, kes kasutavad kohalikku tootmist põhilise energiaallikana või täienduseks võrgu toitele. Hajatootmine kasvab tulevikus ka seoses Euroopa Liidu energiatõhususe direktiivi rakendamisega ning tarkvõrkude arendamisega.

Tänu ühikvõimsuste vähenemisele ja seadmete odavnemisele kasvab paigaldatud, s.h ka jaotusvõrkudesse ühendatud tootmisseadmete arv. 2015. ja 2016. aasta jooksul on Elektrilevi OÜ võrguga ühendatud ca 400 uut mikro- ja väiketootjat. Suur huvi väljendub liitumispakkumistes, mida elektritootjatele on selle aja vältel väljastatud üle 500. Elektritootjate liitumistaotluste arv on tugevas sõltuvuses toetusmeetmetest, näiteks 2012. a käivitunud Kredex-i mikrotootmisseadmete soetamist toetavast programmist [ETO13], samuti PRIA maaelu edendamise toetusvoorudest.

Hajaenergeetika kontseptsioon eeldab, et kogu toodetav elektrienergia tarbitakse ära võimalikult tootmiskoha ligidal. Juhul kui tarbija poole liitumispunkti ühendatud väiketootmisseadme nimivõimsus P_n on väiksem kui tarbija minimaalne võimsus P_{tmin} , siis läheb kogu toodetav elektrienergia kohaliku tarbimise katteks. Kui P_n on suurem kui P_{tmin}, siis läheb osa elektrienergiat võrku. Selline lähenemine võimaldab mõnel juhul piirata võrkude tugevdamise vajadust ja samas vähendab võrgukadusid. Hajatootmine loob võimalusi regionaalpoliitika arendamiseks, energiaühistute tekkimiseks ja energiahinna vähendamiseks piirkonnas.

Ajalooliselt pole jaotusvõrgud projekteeritud integreerima suurt hulka hajatootjaid. Kui hajatootjate elektrivõrguga liitumiste maht ületab teatava läve, vajab jaotusvõrk ulatuslikke spetsiifilisi muudatusi talitluse juhtimises ja käidu korralduses.

Hajaenergeetika lahendustesse sobivad mikro- ja väikekoostootmisseadmed elektrilise võimsusega P_e < 3 MW: võimalik on kasutada kohalikke energiaressursse, rakendada soojuse ja elektri koostootmist ning tasakaalustada stohhastilise väljundvõimsusega taastuvenergia tootmisseadmeid.

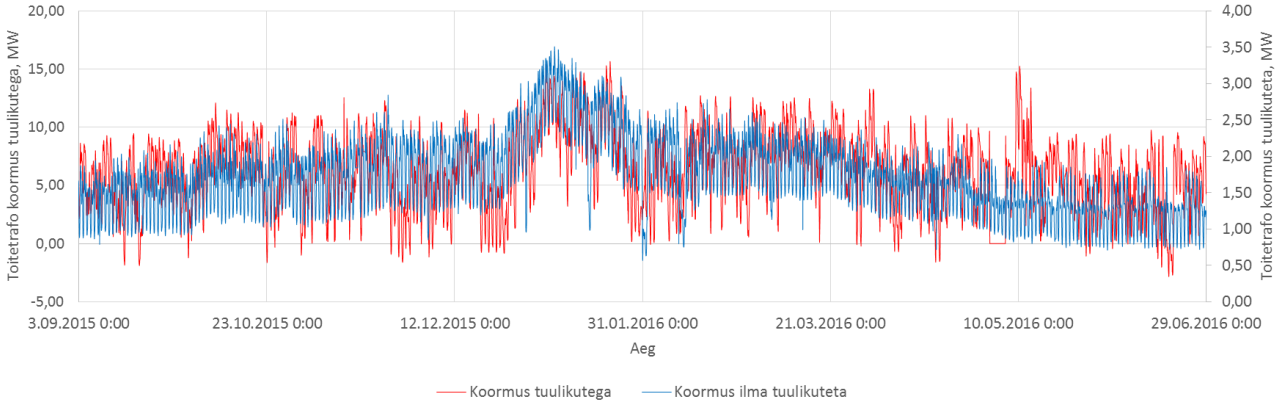
Elektri ja soojuse tootmisel on suur potentsiaal biokütustel (biogaas, puiduhake jms).

Piisava tuuleressursi olemasolul on hajaasustuspiirkondades sageli võimalused väiketuulikute (tüüpiliste võimsustega 5 kW, 10 kW ja 20 kW) paigaldamiseks, ilma et need häiriksid naabreid. Siiski on alates 2014. aastast märgata väiketuulikute populaarsuse langust, kuna tuulikute tootlikkus ei ole osutunud oodatuks ning käidu- ja hoolduskulud arvatust suuremaks.

Kiiresti kasvab paigaldatud päikesepaneelide hulk tänu nende kasuteguri suurenemisele ja maksumuse vähenemisele: 2016. aasta jooksul Elektrilevi OÜ jaotusvõrguga liitunud mikrotootjatest on kõik peale ühe

hüdrojaama olnud päikeseelektrijaamad. PV paneelide paigaldusvõimalused on laiemad ja paindlikumad kui teistel energiatootmisseadmetel, samuti puudub päikesepaneelidel oluline keskkonnamõju. Tuleb arvestada, et PV paneelide toodang on sõltuv päeva ja aastaajast. PV paneelide autonoomsel lahendusel tuleks planeerida ka piisavas mahus elektrienergia salvestusseadmeid. Muutliku tootlikkusega tuule- ja päikeseenergiaseadmed mõjutavad tugevasti elektri kvaliteeti (Joonis 1.26).

Hüdroenergeetika osakaal Eestis on marginaalne ja tulevik ebaselge, samas sobivad veejõujaamad hästi stohhastiliste elektrienergia tootmisgraafikute tasakaalustamiseks. Sobivate kohtade olemasolul on võimalik elektrienergiasalvestus pumpjaamade abil.



Joonis 1.26. Toitealajaama trafo koormuse näide tuulikutega võrgu puhul ja ilma (perioodil september 2015 – august 2016)[1]

Sobiv on kombineerida erinevaid energiatootmisseadmeid omavahel. Tuule- ja päikeseelektrijaamade koostöötamisel on energia toodang suurim, kui tuulejaamad annavad 2/3 ja PV jaamad 1/3 kogutoodangust [ETO13].

Energia puudujääke on kõige lihtsam katta diisel- või bensiinigeneraatoriga või gaasiturbiini abil. Need on aga kulukad lahendused, mis vajavad pidevat teenindamist ja kütuse väljastpoolt sissetoomist. Kasutamine energiavoogude tasakaalustamiseks vähendab nende kasutegurit ja koormustipu kasutusaega.

Hajutatud tootmisseadmete lisandumine tähendab, et varustuskindluse ja pingekvaliteedi tagamiseks muutub võrgu planeerimine, haldamine ning sellesse projekteeritav vara senisest keerukamaks. Hajatootmise areng koos vajadusega säilitada või parandada elektrivarustuse kvaliteeti nõuab uudse tehnoloogia (kauglugemine, andurid, salvestus, IT seadmed) integreerimist olemasolevasse taristusse. Seega on jaotusvõrgud muuhulgas ka tarkvõrkude arendamise eesliinil.

Oluliselt on arenenud ka jaotusvõrgu kliendid. Senised „passiivsed“ tarbijad, kes ei mõjuta jooksvalt elektrivõrku, on muutumas aktiivseteks osalisteks, seda tänu kaugloetavatele nutiarvestitele ja tarkvõrgu arengutele. Nad võivad edaspidi pakkuda näiteks tarbimise juhtimise ja tarbimiskaja võimalusi, muutudes

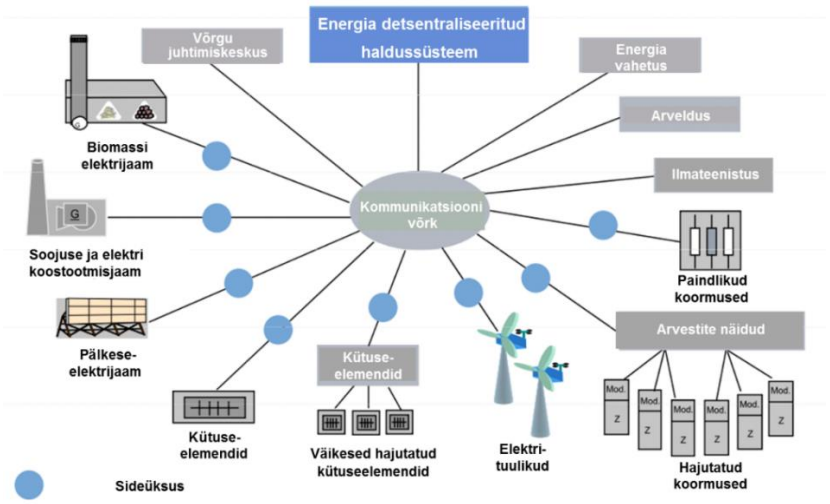
[1] Graafik koostatud Elektrilevi OÜ SCADA andmete alusel.

sellega osalisteks võrgu mõnede piirangute lahendamisel ja koormustippude vähendamisel või pakkudes muid võrguettevõtjatele vajalikke teenuseid. Hajatootmise arenguga võivad kliendid tarbimise kõrval muutuda ka tootjateks või salvestajateks – nn **prosuumeriteks**.

Mitmekesistuvad turuosaliste rollid vajavad õiguslikku reguleerimist. Varasemalt on võrguteenuse kasutajaid käsitletud eraldi kas tootjana või tarbijana. Hajatootmine nõuab rollide ühist käsitlemist samas liitumispunktis, millele vastav regulatsioon Eestis puudub. Võrgutasu varustuskindlust tagava võrguühenduse valmisoleku eest tootja ja prosuumer täna ei maksa. Seega vähendavad suurenevad tootmisvõimsused jaotusvõrguettevõtja valdavalt tarbitud energia mahu põhist tulubaasi. Kulude õiglasemaks katmiseks on oluline rakendada võrguühenduse kasutamise tasu kõigile võrguteenusest kasu saajatele. Nimetatud asjaolud eeldavad elektrituru koormuse juhtimist, hajatootmist ja energia salvestamist arvesse võtvat korraldust ja vastava regulatsiooni väljatöötamist.

Lisaks kohalikule elektritootmisele väheneb elektritarbimine ka tänu klientide ulatuslikumatele säästulahendustele – A-klassi tarvitite, soojuspumpade, leedvalgustite kasutuselevõtule, liginullenergiahoonete rajamisele jms. Heitliku kohaliku tootmise kõrval muutub heitlikumaks ka tarbimine – klientide kasutusse ilmuvad elektriautod, laadimisseadmed, salvestusseadmed, koormuse juhtimine ja muud võrguvälised lahendused.

Edaspidi tuleb arvestada, eriti seoses tarkvõrkude arenguga, ka energia täiendava hajaressursiga mis hõlmab lisaks hajatootmisele energia salvestust, paindlikke koormusi ja nn virtuaalseid elektrijaamu (Joonis 1.27).



Joonis 1.27. Virtuaalelektrijaama põhimõtteline struktuur[2]

Hajaenergeetika põhjustab olulisi muudatusi jaotusvõrkude tavapärases käidus. Senine ühesuunaline võimsusvoogude suund võrgust tarbijani asendub kahesuunaliste voogudega. Järelikult komplitseerub oluliselt selektiivse kaitse kindlustamine ning suureneb pingekvaliteedi tagamisega seotud probleemide hulk.

[2] *Allikas*: T. Werner, Siemens AG, 2010

Kokkuvõttes on hajavarustuspiirkonna võrkude arendamine seotud oluliste investeerimisriskidega:

- maaelanikkonna kahanemine üldise rahvaarvu vähenemise foonil;
- rahvastiku vananemine;
- elurikkuse vähenemine;
- vähene äriklientide osa elektritarbimises;
- kohalik heitliku iseloomuga tootmine;
- vähenev tarbimine;
- heitlik tarbimine;
- tasuvusajad reeglina üle varade eluea;
- ebamäärane teave võrguteenuse vajaduse kohta;
- ilmastikuolude halvenemine (tormide suurenev sagedus);
- vandalism;
- määramatus kohalikku tootmist, prosuumereid, ala- või nulltarbimisega kliente jms puudutava regulatsiooni arengutes.

Eeltoodust tulenevalt on tarbimise vähenemise tingimustes keerulisem tagada praegust investeeringute taset säilitades senine elektrivarustuse kvaliteet.

1.3 Elektrilevi OÜ hajavarustuspiirkonna madalpingevõrgu tüüpstruktuurid ja tüüpsed tarbimiskohtade arvud

Tuleb silmas pidada, et jaotusvõrgu investeeringute plaanimisel pole objektide suure arvu tõttu võimalik neist igaühte eraldi vaadelda. Sellest tulenevalt tuleb lisaks varustuskindluse piirkondadeks liigitamisele määratleda igale piirkonna tüübile teatud iseloomulikud võrgukoosluste rühmad, et lihtsustada reaalse võrgu arendamise valikuid. Konstruktiivsete lahenduste valikul võivad esineda teatud kitsendused tulenevalt maakasutuse piirangutest või lihtsalt ruumi puudusest. Sel juhul ei allu seadmete valik tehnilis-majanduslikule optimeerimisele vaid tugineb pigem sotsiaal-poliitilistele otsustele.

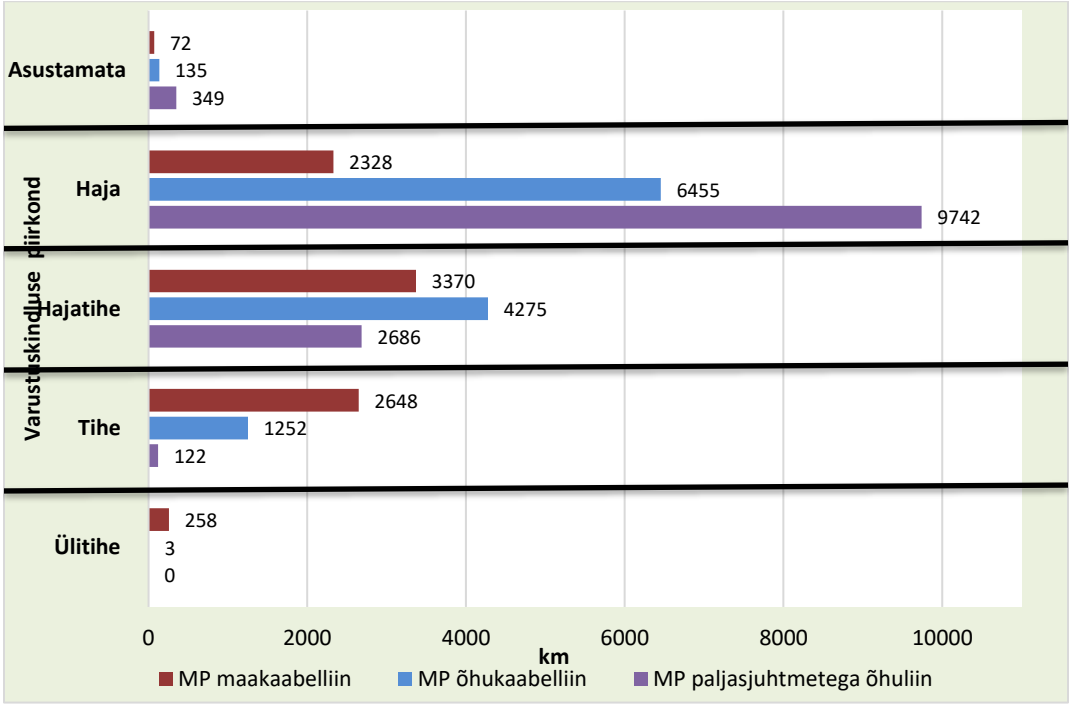
Hajavarustuspiirkonna jaotusvõrkudes tuleb lugeda õigeks Elektrilevi OÜ tehnikapõhimõtete suunda eelistada lähitulevikus investeeringud lihtsatesse, ökonoomsetesse ja eluea poolest kasutuse vähenemist arvestavatesse tehnilistesse lahendustesse

Madalpingeliinide uuendamisel tuleb kõne alla ainult õhukaabelliin, seda ka mastide ressursi ammendumisel (mastid vahetada). Õhukaabel võimaldab tõhusalt ära kasutada olemasolevate mastide eluea ja tagab oluliselt suurema ilmastikukindluse võrreldes paljasjuhtmetega, pidades reeglina vastu ka puude peale kukkumisele. Selline lähenemine tagab soodsa „ilmastikukindla võrgukilomeetri“ maksumuse ja võimaldab kiiremini parandada võrgu töökindlust. Maakaablisse viimine tuleb kõne alla ainult uute liinide puhul uusehituste ja kinnisvara arenduste liitumisel.

Samas tuleb kulude kalkuleerimisel arvestada konkreetsete loodusoludega. Õhuliinide rikkelisus on suurem ja metsastel trassidel on ligipääs neile raskendatud, mistõttu on jooksvad kulud suuremad. Samas on rikete sagedus maakaabelliinide puhul küll väiksem, kuid rikke kõrvaldamise ajad tunduvalt pikemad. Talveoludes on maakaablitele juurdepääs raskem kui õhuliinidele. Tuulistes piirkondades (rannikualad) on

õhuliinide investeeringukulud 10…20% suuremad vajaduse tõttu kasutada tugevdatud konstruktsiooniga maste [SYR03]. Soodsatel pinnasetingimustel võivad eriti rikkelistes piirkondades ja/või suurte koormuste korral osutuda otstarbekamaks maakaabelliinid, eriti kui rakendada innovatiivseid lahendusi, nagu kaablite kündmistehnoloogia, kaablijaotuskapid jms. Hajaasustuspiirkondades mõjutavad trassi valikut veekogud, märgalad. Tarbimiskohtadel, kus puudub tarbimine, tuleb kaaluda võimalust jätta paigaldamata kauglugemisega arvestid. Õhuliinide maksumust võivad märgatavalt mõjutada kompensatsioonid maaomanikele. Näiteks metsastel trassidel moodustab Soome kogemustel kompensatsioon keskmiselt 2000 €/km [SYR03]. Kompensatsioonid on ligi poole väiksemad piki teid kulgevate trasside puhul. Samuti on tänu paremale ligipääsetavusele ehitus- ja jooksvad kulud väiksemad.

Järgmisel joonisel (Joonis 1.28) on illustratsiooniks toodud erinevat tüüpi madalpingeliinide ulatus Elektrilevi OÜ varustuskindluse piirkondades [VAL13].



Joonis 1.28. Erinevat tüüpi madalpingeliinide ulatus varustuskindluse piirkondades

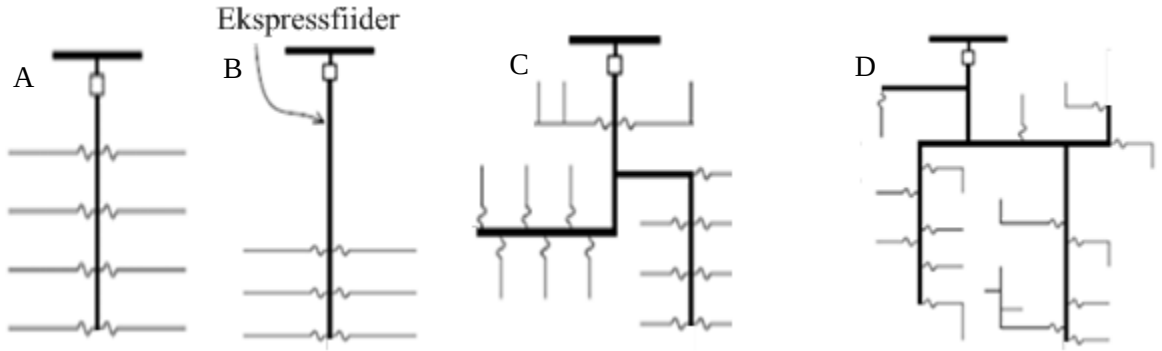
Jaotusalajaamadena e trafopunktidena (KP/MP alajaamadena) tuleb üldjuhul eelistada eraldi hoones paiknevaid, nt komplektalajaamu. Keskpingeõhuliinide ja vähese koormuse korral on sobivaimaks mastalajaamad.

Tarbijate elektrivarustuse investeerimisriskid ja elektrivarustuskindlus on otseselt seotud elektrivõrgu konfiguratsiooniga, mistõttu viimase sobiv valik omab suurt tähtsust nii jaotusvõrgu ettevõttele kui kliendile.

Hajavarustuskindluse piirkondades tuleb madalpingejaotusvõrguna kasutada radiaalvõrku, mis tagab ühepoolse toite. Radiaalvõrgu suurteks eelisteks on madalam maksumus ja lihtne käit, lihtsam pinge reguleerimine ja lihtsamad kaitseseadmed, samuti väiksemad lühisvoolud enamikus ahelates.

Radiaalvõrgud erinevad ulatuselt ja kujunduselt sõltuvana looduslikest takistustest ja tarbimiskohtade paiknemisest.

Levinud variandiks on radiaalfiidri kujundus tüviliinina, millest hargnevad haruliinid klientideni. Tüviliin võib olla mittehargnev või hargnev (Joonis 1.29). Haruliinid võivad omakorda hargneda.



Joonis 1.29. Tüüpilised tüviliiniga radiaalfiidrid: A – mittehargneva tüviliiniga; B – ekspressfiider; C – hargneva tüviliinga; D – mitmekordselt hargneva tüviliiniga

Nn ekspressfiider on sobiv juhul, kui tarbimiskohad on kontsentreerunud teatud kaugusel alajaamast. Kui tarbimiskohad paiknevad alajaamast erineval kaugusel, on otstarbekas lähemaid varustada skeemidega A, C või D, eemal asuvaid kontsentreeritud tarbijaid aga ekspressfiidri(te) kaudu.

Ühest jaotusalajaamast (trafopunktist) saab toite üks või mitu tüviliini. Väga madala koormustihedusega aladel ühtib trafopunktide tihedus sageli tarbimiskohtade tihedusega, s.t igale tarbimiskohale on vaja oma trafopunkt. Teatud juhtudel võib jaotusalajaam kuuluda tarbimiskoha koosseisu.

Hajaasustuspiirkonnas paiknevate abikaugete klientide toiteks võib osutuda otstarbekaks **kohalikul tootmisel põhinev toide**. Selline lahendus võib kaugetele klientidele kindlustada normaaltalitlusel parema pingekvaliteedi tänu pingekadude puudumisele pikkades reeglina suhteliselt suure takistusega liinides. Vajadusel võib kohaliku toite rikete puhuks ette näha reservtoite avalikust võrgust, lubades lühiajaliselt pinge madalamat kvaliteeti.

Kindlaima, kuid kulukaima kohaliku toite annavad pidevkasutuses diiselgeneraatorid. Kaaluda võib ka kahe diiselgeneraatori soetamist, et vältida toitekatkestusi hooldustööde ajal. Samuti saab töötunde nende vahel ühtlasemalt jaotada.

Kui looduslikud tingimused võimaldavad, on kuluefektiivne diiselgeneraatori paralleeltöö taastuvenergia allikatega – elektrituulikutega ja/või päikesepatareidega. Need võimaldavad säästa kulusid kütusele. Töökindlam on akupatareide lisamine, mis kindlustavad toite diiselgeneraatori seisakute korral. Akude laadimine toimuks võimalust mööda tuulegeneraatori ja/või päikesepatarei poolt.

1.3.1 Hajapiirkonna madalpingevõrgu fiidrite analüüs

Kuna madalpingevõrgu pingeprobleemide lahendamiseks on tüüplahendusena kasutusel liini rekonstrueerimine, tuleb alternatiivsete meetodite kasutusvõimaluste tuvastamiseks ja analüüsiks esmalt uurida olemasolevat võrku. Võttes aluseks Elektrilevi OÜ andmed kõigi olemasolevate madalpinge fiidrite

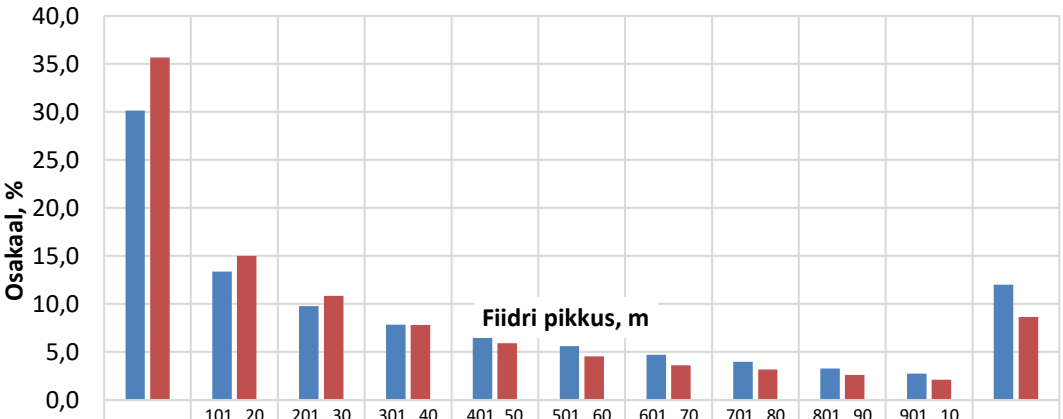
kohta on koostatud järgnev analüüs. Jagades võrgu madalpingefiidrid tarbimiskoha suurima kauguse järgi alajaamast gruppidesse, leiame neid rühmi iseloomustavad näitajad. Kuna üldtunnustatud seisukohtade järgi ei tohiks madalpingeliinide pikkused ületada 400...600 m, siis on järgnevalt kõik fiidrid rühmitatud kaugeima liitumispunkti järgi alajaamast 500 m sammuga (Tabel 1.3).

Tabelist on näha, et neid madalpingefiidreid, kus kaugeim tarbimiskoht on kuni 499 m kaugusel alajaamast, on kõigi fiidrite hulgast 76,2 %. Samas neid madalpingeliine, kus kaugeim klient on alajaamast üle 1,5 km kaugusel, on 1,6% ning selliste liinide keskmine kogupikkus koos harudega on üle 2,6 km. Üle 1,5 km kaugusel olevate klientidega fiidritest on keskmine suurim tarbimiskoha kaugus ca 1,9 km, mis tähendab, et leidub ka selliseid madalpinge tarbimiskohti, mis on alajaamast veelgi kaugemal.

Tabel 1.3. Madalpingefiidrite näitajad grupeerituna kaugeima tarbimiskoha alusel

Kaugeim tarbimiskoht…	kuni 499 m	500…999 m	1000…1499 m	üle 1500 m
Fiidreid kokku	56414	13668	2770	1171
Osakaal fiidrite koguarvust, %	76,2	18,5	3,7	1,6
Fiidri keskmine pikkus, m	253	1006	1692	2627
Keskmine LP max kaugus, m	174	687	1192	1912
Fiidrikaitsme keskväärtus, A	160	79	66	64
Keskmine kaugeima liitumispunkti minimaalne ühefaasiline lühisvool, A	2561,9	299,8	157,3	91,8
Keskmine kaugeima punkti rikkesilmuse näivtakistus, Ω	0,09	0,77	1,46	2,51
Pikkus ühe kliendi kohta, m	83,0	256,1	392,3	558,9
Keskmine fiidri klientide arv	9	9	6	7
Aasta keskmine tarbimine, kWh	61604	31495	16345	14153
Aasta keskmine tarbimine kliendi kohta, kWh	27544	2614	2748	2095
Aasta keskmine pidev koormus, kW	7,0	3,6	1,9	1,6
Paljasjuhtme keskmine osakaal, %	11,8	26,0	54,7	74,8
Õhukaabli keskmine osakaal, %	37,4	49,6	37,1	22,3
Maakaabli keskmine osakaal, %	50,8	24,4	8,2	2,9

Vaadeldes erinevate fiidrigruppide puhul liini pikkust ühe kliendi kohta näeme, et pikimate liinide puhul on kliendi kohta võrku üleval ligi 560 m, mis on enam kui 6 korda rohkem kui lühimate fiidrite grupis (keskmiselt 83 m kliendi kohta). Kõrvutades neid suurusi aasta keskmise elektrienergia tarbimisega kliendi kohta, saame vastupidise tendentsi: pikkade fiidrite kliendid tarbivad keskmiselt 13 korda vähem kui lühikeste fiidritega kliendid (aastatarbimised kliendi kohta vastavalt 2095 kWh ja 27 544 kWh). Sealjuures tarbitakse suurim osa (ca 36%) jaotusvõrku läbivast energiast vähem kui 100 m pikkuste fiidrite kaudu (Joonis 1.30). Ka siit järeldub, et solidaarse ja valdavalt tarbimismahul põhineva võrgutasude süsteemi korral panustavad võrgu ülevalpidamisse lühikeste fiidrite ehk peamiselt tiheasustusalade kliendid suhteliselt rohkem kui hajaasutusala kliendid.



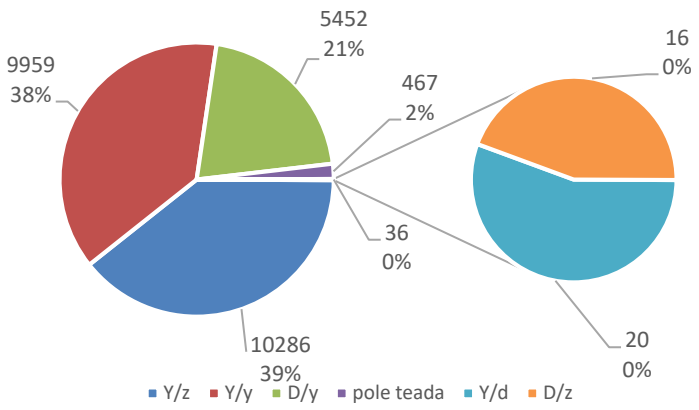
	1…100	101…200	201…300	301…400	401..500	501…600	601…700	701…800	801…900	901…1000	1001…
Osakaal fiidrite arvust, %	30,2	13,4	9,8	7,8	6,5	5,6	4,7	4,0	3,3	2,8	12,0
Osakaal tarbimisest, %	35,7	15,0	10,9	7,8	5,9	4,5	3,6	3,2	2,6	2,1	8,6

Joonis 1.30. Fiidri kogupikkuse ja tarbitud elektrienergia osakaalude jagunemine.

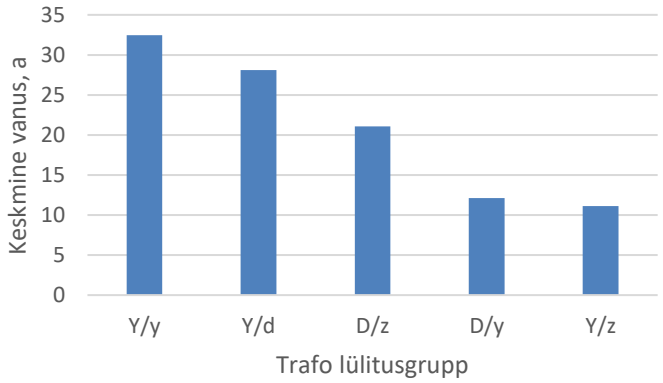
Võrguteenuse kvaliteedinäitajate osas on tabelis (Tabel 1.3) toodud vähem kui kolmekordse lühisvoolukordsusega fiidrite osakaal iga grupi lõikes, fiidrikaitsme rakendumise keskmine kordsus ja nende fiidrite osakaal grupis, millel vähemalt ühe tarbimiskoha minimaalne ühefaasiline lühisvool on alla 250 A. Kõigi nende näitajate puhul on täheldatav väärtuste oluline halvenemine pikemate fiidrite puhul. Näiteks üle 1500 m kaugusega tarbimiskohaga fiidrite puhul pole 85,7% fiidritest vähemalt ühes tarbimiskohas ühefaasilise lühise korral fiidrikaitsme rakendumine tagatud. Fiidrikaitsme rakendumise keskmine kordsus 500...999 m fiidrite grupis on 5 ja sellest tulenevalt võib kaitsmete rakendumisega olla probleeme kõigi nende tarbimiskohtade puhul, mis on alajaamast enam kui 0,5 km kaugusel.

Olemasolevate andmete alusel kus pole arvestatud fiidritel SZ-lülitite olemasolu ja nimiväärtusi ning 38% trafode puhul Yy-lülitusgruppi, mis mõlemad mõjutavad oluliselt rikkesilmuse takistust ja tundlikkust asümmeetriale, saame kaitserakendumise kordsuse ja rikkesilmuse näivjuhtivuse vahel tugeva korrelatsiooni, mis on 0,998. Võttes arvesse eelnimetatud lülitite olemasolu ja trafode Yy-lülitust korrelatsioon tõenäoliselt mõnevõrra väheneb.

Eesti jaotusvõrku iseloomustab enam kui 30 aasta vanuste võrguelementide suur maht, mis sellest tulenevalt mõjutab oluliselt ka võrgu tehnilisi näitajaid. Näiteks enam kui 28 000-st Elektrilevile kuuluvast jaotustrafost (KP/MP trafod) on 38% ehk ligi 10 000 trafot Y/y-lülitusgrupiga (Joonis 1.31, Joonis 1.32). See asjaolu muudab suure osa madalpingevõrgust tundlikuks pinge asümmeetriale. Y/y-lülitusgrupiga trafod olid minevikus laialdaselt kasutusel, kuna selliste trafode ehitus on lihtsam ja trafod seetõttu ka odavamad kui teistsuguste lülitusgruppide puhul.



Joonis 1.31. Elektrilevi jaotustrafode arvuline jagunemine mähiste lülitusgruppide järgi.



Joonis 1.32. Elektrilevi OÜ jaotustrafode vanuseline jagunemine lülitusgrupi järgi.

Y/y-lülitusgrupiga trafode puudus on nende suur nulljärgnevustakistus. Sellise trafo nulljärgnevusvoolude teekond sulgub aseskeemil läbi sekundaarmähise ja tühijooksu magneetimisharu takistuse. Kolme faasi nulljärgnevusvoolude poolt põhjustatud väli ei saa sulguda kolmesambalise südamiku ja ikke piires, vaid läbi trafo paagi, mistõttu selle ahela magnetiline takistus on oluliselt suurem kui lühistakistus. See aga muudab seda tüüpi trafod äärmiselt tundlikuks faasikoormuste ebasümmeetriale ning vähendab ligikaudu kolm korda ka trafo ühefaasilise lühisvoolu väärtust (võrreldes teistsuguse lülitusgrupiga trafodega). Asümmeetrilise koormuse puhul võivad pingekaod Y/y-lülitusgrupiga trafodes olla 15...20%, tavalise 4% asemel sümmeetrilisel koormusel. [ENS82]

Eelpool toodud põhjustel on juba allikas [ENS82] soovitatud jaotusvõrkudes loobuda Y/y-lülitusgrupiga trafode kasutamisest ja hajapiirkonnas minna üle Y/z-lülitusgrupiga trafodele. Selliste trafode mähiste metallikulu on suurem ja trafo seetõttu kallim, kuid nende sekundaarmähise nulljärgnevustakistus on võrdeline üldisel südamikul asuva poolmähise poolt tekitatud puistevooga ning seda on võimalik vähendada peaaegu nullini. Seega on Y/z-lülitusgrupiga trafosid soovitatav kasutada esmajoones siis, kui võrgus on koormuste asümmeetriast ja madalpingeliinide nulljärgnevustakistusest tingitud suur pinge asümmeetria, ehk suhteliselt madala koormustihedusega ja pikkade õhuliinidega madalpingevõrgus. [ENS82]

1.3.2 Hajapiirkonna pingeprobleemse madalpingevõrgu analüüs

Nagu eelnevalt mainitud, on hajavarustuskindluse piirkondades madalpinge jaotusvõrguna peamiselt kasutuses radiaalvõrk, mis tagab tarbijate ühepoolse toite. Radiaalvõrgud erinevad ulatuselt ja kujunduselt sõltuvana looduslikest takistustest ja tarbimiskohtade paiknemisest.

Levinud variandiks on radiaalfiidri kujundus tüviliinina, millest hargnevad haruliinid klientideni. Tüviliin võib olla mittehargnev või hargnev ning haruliinid võivad omakorda hargneda. Hajali paiknevate üksikute klientide varustamiseks ehitatud madalpingeliinid võivad olla märkimisväärse pikkusega. Elektrilevi võrgus leidub endiselt ka selliseid kliente, kes saavad toite rohkem kui 4 kilomeetri kaugusel paiknevast alajaamast.

Analüüsil on aluseks võetud, et enim huvi pakkuvaid hajapiirkonna pingeprobleemseid fiidreid iseloomustavad järgmised näitajad, mille valikul on lähtutud standardist EVS-EN 50160:2010+A1:2015 või majanduslikest kaalutlustest:

- fiidri kaugeima liitumispunkti ühefaasilise lühise näivtakistus ≥ 1 oom (viitab standardi EVS-EN 50160:2010+A1:2015 alusel pingeprobleemi olemasolule);
- fiidri kaugeima liitumispunkti kaugus alajaamast mööda madalpingeliini ≥ 500 m;
- kaugeima liitumispunkti aastane elektrienergia tarbimine ≥ 200 kWh;
- kogu fiidri aastane tarbimine ≥ 200 kWh;
- fiidri vähemalt üks liitumispunkt paikneb haja varustuskindluse piirkonnas.

Standardi EVS-EN 50160:2010+A1:2015 alusel ei tohi toitepinge aeglased muutused normaaltalitlustingimustes (välja arvatud katkestused) ületada ±10% nimipingest. Elektrilevi madalpingevõrgus on liitumispunkti kaitsme keskmine nimivool 23,04 A ja liitumispunkti kaitsme nimivoolu mediaanväärtus 20 A. Kui fiidri koormusvool on 23 A ning fiidri alguses on faasipinge 230 V, saame pingemuutuse väärtuseks 10% nimipingest selles fiidri punktis, kus rikkesilmuse näivtakistus on 1 oom. Seega viitab liitumispunktis ühefaasilise lühise näivtakistuse väärtus üle 1 oomi pingeprobleemi olemasolule.

Käesolevas uurimistöös on vaatluse alt välja jäetud need fiidrid, mida läbiv energia on aastas väiksem kui 200 kWh, ehk kus tarbimine on väga väike või puudub täiesti. Arusaadavalt ei ole võrguettevõtjal majanduslikult otstarbekas olematu tarbimisega fiidritesse investeerida. Sellised fiidrid on suure tõenäosusega need, mis tulevikus klientide puudumise tõttu demonteeritakse.

Elektrilevi OÜ rohkem kui 74 000 madalpingefiidrist on eelpool toodud kriteeriumitele vastavaid fiidreid 6751 (ca 9 %), millel on 32 353 liitumispunkti ja mis saavad toite kokku 5238 KP/MP alajaamast.

Käidupiirkondade lõikes on enim pingeprobleemseid fiidreid Lõuna-Eestis. Mõniste käidupiirkonnas on 176 alajaama, mille toitepiirkonnas on pingeprobleemiga tarbimiskohad. Kümme kõige suurema pingeprobleemsete fiidrite arvuga käidupiirkonda on toodud allolevas tabelis (Tabel 1.4). Kuna vaadeldavad hajapiirkonna pingeprobleemsed fiidrid on suure pikkusega, ulatuvad osa neist ka tihedasse

ja kesktihedasse piirkonda. Tihedat varustuskindluse piirkonda läbib vaadeldavast 6751 fiidrist 4 fiidrit ning kesktihedat varustuskindluse piirkonda 980 fiidrit.

Pingeprobleemsete fiidrite tüüpstruktuuride uurimine võimaldab võrguettevõtjal hinnata, millises koguses ja mis tüüpi pingekvaliteeti parandavaid seadmeid keskmiselt vaja läheb, et liitumispunktis pingeprobleem lahendada. Samuti on tüüpsete topoloogiate välja selgitamisel võimalik pingeprobleemseid fiidreid modelleerida ning leida antud tüüpsele juhule kõige sobivamad kvaliteeti parandavad seadmed.

Tabel 1.4. Kümme käidupiirkonda, milles asub kõige rohkem pingeprobleemseid fiidreid toitvaid alajaamasid.

Käidupiirkond	Alajaamade arv
Mõniste	176
Kallaste	173
Räpina	173
Tartu Maa	173
Võru	172
Jõgeva	153
Kuuste	152
Mustla	151
Otepää	143
Roela	141

Leitud tüüpsete fiidrite põhitunnuste alusel on võrgu planeerijal võimalik kergemini otsustada, millist pingekvaliteeti parandavat seadet konkreetse madalpingefiidri tehnilise lahenduse koostamisel kasutada. Pingeprobleemsete fiidrite põhitunnused, mille alusel tüüpset struktuuri määrata, on järgmised:

- liitumispunktide arv fiidril,
- liitumispunktide geomeetrilise keskme paiknemine (fiidri alguses, keskel või lõpus),
- harude suhteline pikkus (lühikesed või pikad harud),
- hargnemiskoha asukoht fiidril (alguses, keskel, lõpuosas).

Elektrilevi poolt antud lähteandmed käesoleva uurimistöö koostamiseks sisaldasid iga liitumispunkti kohta lühistakistuste ja lühisvoolu parameetreid, varustuskindluse piirkonda, aastas tarbitud energiat kWh-des, liitumispunkti toitva madalpingefiidri kogupikkust, liitumispunkti kaugust lähimast hargnemiskohast (mööda liini) ning liitumispunkti kaugust alajaamast (mööda liini).

Tähistame tähtsamad parameetrid lähteandmetest järgmiselt:
R_{k1min} – liitumispunkti minimaalsele ühefaasilisele lühisele vastav aktiivtakistus, Ω
X_{k1min} – liitumispunkti minimaalsele ühefaasilisele lühisele vastav reaktiivtakistus, Ω
Z_{k1min} – liitumispunkti minimaalsele ühefaasilisele lühisele vastav näivtakistus, Ω
I_{k1min} - liitumispunkti minimaalne ühefaasiline lühisvool, A
W – aastane energiatarbimine, kWh/a
L_F – fiidri kogupikkus (kõigi harude pikkuste summa), m

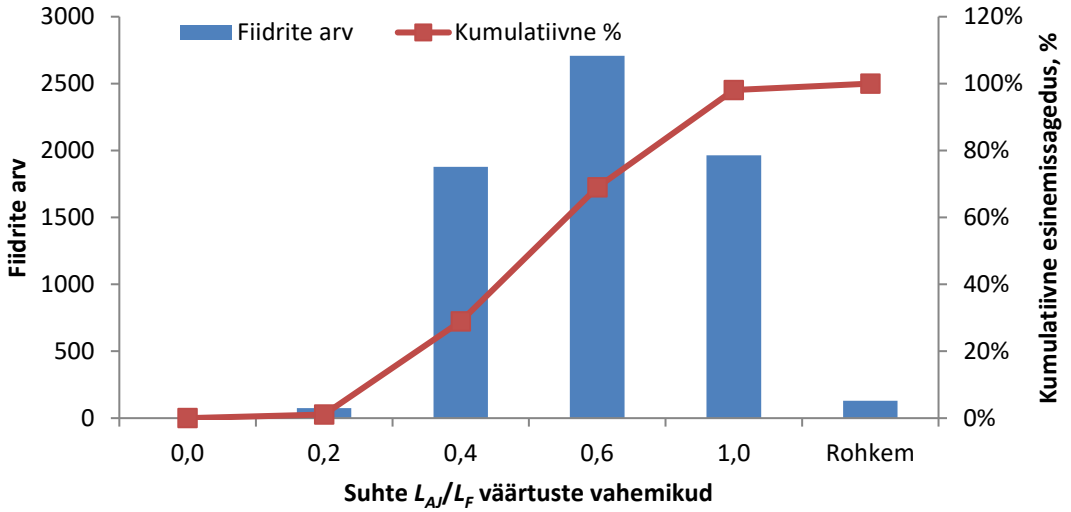
L_H – liitumispunkti kaugus mööda liini lähimast hargnemiskohast, m
L_{AJ} – liitumispunkti kaugus mööda liini alajaamast, m

Teades eelpool toodud parameetreid iga liitumispunkti kohta fiidril, oli võimalik leida nende suuruste keskväärtused fiidri kohta, et edasi hakata analüüsima fiidrite tüüpseid topoloogiaid. Analüüsi käigus selgitati välja nõrga madalpingevõrgu kolm tüüpset topoloogiat, mis võimaldab säilitada ka hilisemal tüüpfiidrite ja pingekvaliteeti parandavate seadmete erinevate paigutuskohtade modelleerimisel mõistliku töömahu.

Fiidri põhitopoloogiate leidmiseks kasutati kahte suhet – iga fiidri liitumispunktide keskmise kauguse alajaamast suhet fiidri pikkusesse (1) ning liitumispunkti keskmise kauguse harust suhet liitumispunkti keskmisse kaugusesse alajaamast (2).

$$\frac{L_{AJ}}{L_F} \quad (1) \qquad\qquad \frac{L_H}{L_{AJ}} \quad (2)$$

Suhte (1) väärtus iseloomustab liitumispunktide keskmist geograafilist paiknemist fiidril. Kui see suhe on väike (≤ 0,4), paiknevad liitumispunktid keskmiselt pigem fiidri esimeses kolmandikus. Suhte väärtuse 0,4...0,6 korral on liitumispunktid koondatavad fiidri keskmisse kolmandikku ning suhte väärtuste üle 0,6 korral paiknevad liitumispunktid fiidri lõpus ehk viimases kolmandikus. Joonis 1.33 kujutab fiidrite arvulist jagunemist suhte (1) alusel.



Joonis 1.33. Fiidrite jagunemine liitumispunkti keskmise kauguse alajaamast ja fiidri kogupikkuse suhte järgi

Liitumispunkti keskmise kauguse alajaamast ja fiidri kogupikkuse suhte järgi jagati kõik pingeprobleemiga fiidrid kolme rühma ja leiti iga rühma iseloomustavad näitajad (Tabel 1.5).

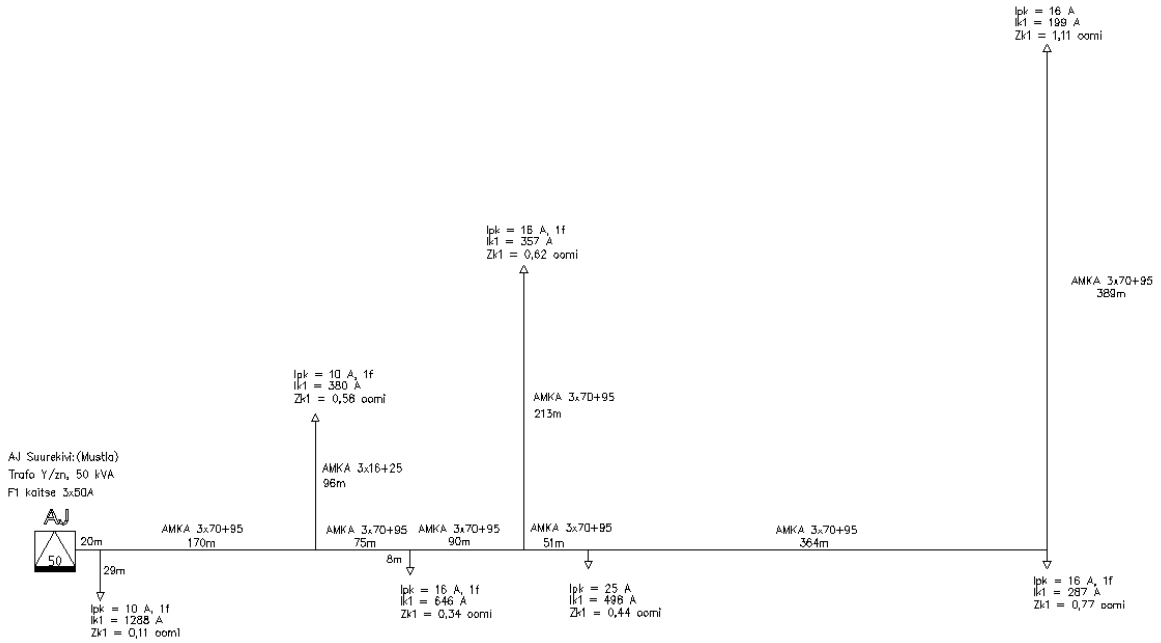
Tabel 1.5. Fiidrite rühmasid iseloomustavad näitajad

Parameeter	Rühm 1	Rühm 2	Rühm 3
Suhte L_{AJ}/L_F väärtus	≤ 0,4	0,6 ... 0,4	> 0,6
Fiidrite osakaal (%)	28,9	40,1	31
LP fiidril, keskmine (tk)	8	4	2
LP fiidril, mediaan (tk)	7	4	2
Fiidri pikkus, keskmine (m)	1836	1322	1008
Fiidri pikkus, mediaan (m)	1692	1189	898
Z, kõigi LP-de keskmine (oomi)	1,285	1,450	1,690
Z, kõigi LP-de mediaan (oomi)	1,049	1,108	1,363
L_H/L_{AJ} keskmine	0,210	0,248	0,331
L_H/L_{AJ} mediaan	0,168	0,179	0,191
Fiidrite arv (tk)	1952	2707	2092

Eelolevas tabelis (Tabel 1.5) toodud ühefaasilise lühise ehk rikkesilmuse näivtakistus Z vastab fiidri kõigi liitumispunktide keskmisele või mediaanväärtusele, st sinna on arvestatud ka nende liitumispunktide näivtakistused, mis ei ole pingeprobleemsed. Siiski on kõigi fiidrirühmade puhul rikkesilmuse näivtakistuse nii keskmised kui mediaanväärtused üle 1 oomi.

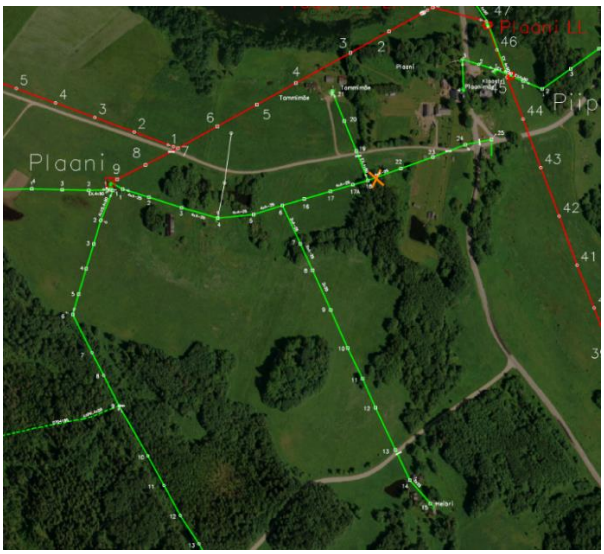
Järgmistel joonistel on toodud iga rühma parameetrite mediaanväärtustele vastavate reaalsete fiidrite näited Elektrilevi võrguinfosüsteemist ning nende skeemid. Joonis 1.34 kujutab rühma 1 kuuluvat madalpingefiidrit. Tegemist on Mustla käidupiirkonna Suurekivi alajaama fiidriga F1. Fiidril on 7 liitumispunkti (Joonis 1.35), neist 3 asuvad alajaamast kaugemal kui 500 m. Fiidri kogupikkus on 1517 m. Kaugeima liitumispunkti ühefaasilise lühise näivtakistus on 1,11 oomi. Fiider on kogu pikkuses rekonstrueeritud kolmefaasilise rippkeerdkaabliga AMKA 3x70+90, kuid seitsmest liitumispunktist ainult kaks on kolmefaasilised liitumispunktid, sh fiidri kaugeim liitumispunkt. Esimese rühma fiidritele tüüpiliselt asub suurem osa tarbijaid grupina fiidri alguses, ent pingeprobleemsed kliendid paiknevad pika haru lõpus.

Joonis 1.34. Näide rühma 1 kuuluvast fiidrist.



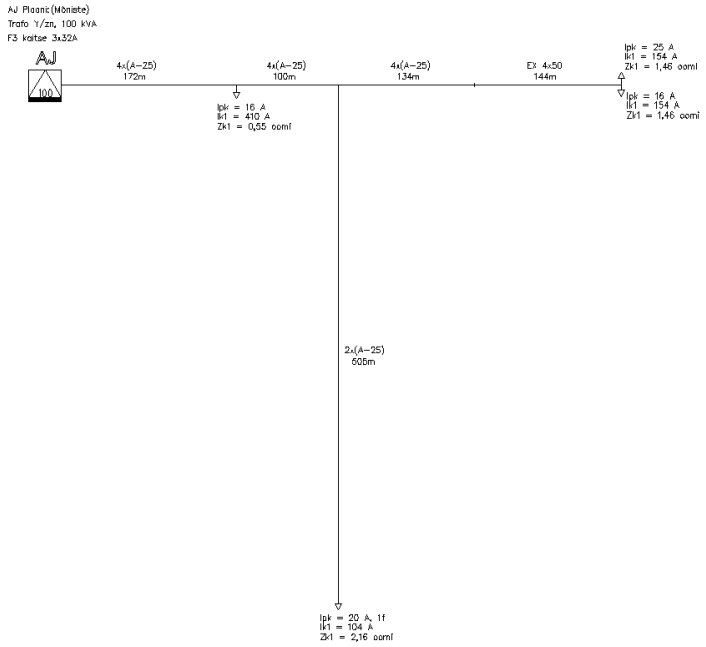
Joonis 1.35. Rühma 1 kuuluva fiidri skeem koos andmetega.

Joonis 1.36 kujutab rühma 2 kuuluvat madalpingefiidrit. Tegemist on Mõniste käidupiirkonna Plaani alajaama fiidriga F3.



Joonis 1.36. Näide rühma 2 kuuluvast reaalsest fiidrist.

Fiidril on 4 liitumispunkti ja neist kolm asuvad alajaamast kaugemal kui 500 m (Joonis 1.37). Fiidri kogupikkus on 1198 m. Fiider on pea kogu ulatuses paljasjuhtmeline – kasutuses on õhuliinijuhe 4x(A-25). Fiidri lõpuosa on 144 m ulatuses rekonstrueeritud õhukaabliga EX 4x50. Pikk haru, mis lähtub fiidri keskosast ja mille lõpus paikneb pingeprobleemne tarbimiskoht, on ühefaasiline ehk kahe alumiiniumist paljasjuhtmega A-25.



Joonis 1.37. Rühma 2 kuuluva fiidri skeem koos andmetega (ilma tööst välja viidud fiidri lõpuosata).

Jooniselt on ka näha, et fiidri lõpuosa mastide 22 ja 25 vahel pole liitumispunkti puudumise tõttu kasutuses – oranž rist joonisel tähistab lahti ühendatud madalpingelookasid. Teise rühma fiidrile iseloomulikult toimub hargnemine fiidri keskosas (antud juhul üks pikk haru). Võrreldes esimese rühma fiidritega on kliendid koondatavad fiidri keskmisse kolmandikku.

Joonis 1.38 on toodud rühma 3 fiidri näide. Tegemist on Antsla käidupiirkonda kuuluva Virsuküla alajaama fiidriga F1. Fiidril on kaks liitumispunkti ja need mõlemad asuvad alajaamast kaugemal kui 500 m (Joonis 1.39). Fiidri kogupikkus on 901 m.

Joonis 1.38. Näide rühma 3 kuuluvast reaalsest madalpingefiidrist.

Joonis 1.39. Rühma 3 kuuluva fiidri skeem andmetega.

Viimasest kahest joonisest nähtub, et fiider on kogu ulatuses rekonstrueeritud rippkeerdkaabliga AMKA 3x50+70, kuid suurte vahekauguste tõttu on kaugeimal kliendil siiski võimalik pingeprobleem (rikkesilmuse näivtakistus ühefaasilisel lühisel 1,05 oomi. Kolmanda rühma fiidritele tüüpiliselt asuvad tarbijad fiidri lõpuosas ja suhteliselt pikkade harude toitel.

Viimasel kuuel joonisel (Joonis 1.34...Joonis 1.39) toodud fiidrite puhul on kahel juhul kolmest võrguettevõtja investeerinud oluliselt madalpingevõrgu seisukorra parandamiseks ja vahetanud kogu fiidri pikkuses paljasjuhtmelise õhuliini kaetud juhtmetega rippkeerdkaabli vastu. Siiski pole sellest pingeprobleemi lahendamiseks tarbimiskohtade suurte vahekauguste tõttu piisanud. Sellistel juhtudel, kus madalpingevõrk on suhteliselt heas seisukorras, tuleb kaaluda traditsioonilise lahenduse asemel (uue KP/MP alajaama paigaldamise klientidele lähemale) pingekvaliteeti parandavate seadmete kasutamist.

Kirjeldatud 3 kolm tüüpset topoloogiat (rühma) valiti seetõttu, et säilitada tüüpfiidrite ja pingetasandusseadmete erinevate paigutuskohtade modelleerimisel mõistlik töömaht ning võimaldada tüüplahenduste väljatöötamist. Eeloleva analüüsi põhjal võib järeldada, et rühmasid iseloomustavad järgmised peamised eripärad:

1. ***Rühma 1 kuuluvate fiidrite korral on***
    a. ***fiidril keskmiselt 7-8 liitumispunkti,***
    b. ***liitumispunktid paiknevad pigem fiidri esimeses kolmandikus,***
    c. ***hargnemine toimub fiidri alguses ning harude arv suurim,***
    d. ***fiidri kogupikkus on võrreldes teiste rühmadega suurim,***
    e. ***liitumispunkti keskmine rikkesilmuse takistus on väikseim.***
2. ***Rühma 2 fiidrite korral on***
    a. ***fiidril keskmiselt 4 liitumispunkti,***
    b. ***liitumispunktid on koondatavad fiidri keskmisse kolmandikku,***

   c. ***harud on keskmise pikkusega (haru pikkus on keskmiselt üks neljandik vahemaast liitumispunktist alajaamani),***
   d. ***sellesse rühma kuulub kõige rohkem pingeprobleemseid fiidreid – 2707 tk,***
   e. ***liitumispunkti keskmine rikkesilmuse takistus on rühmade lõikes keskmine.***
3. ***Rühma 3 fiidrite korral on***
   a. ***fiidril keskmiselt kõigest 2 liitumispunkti,***
   b. ***liitumispunktid on koondunud viimasesse kolmandikku,***
   c. ***fiidritel kõige pikemad harud – keskmiselt on liitumispunkti kaugus lähima hargnemiskohani ligikaudu kolmandik kaugusest alajaamani.***
   d. ***fiidri kogupikkus on kõige väiksem***
   e. ***liitumispunkti rikkesilmuse keskmine näivtakistus (1,69 Ω) kõige suurem.***

2 Ülevaade alternatiivsetest meetoditest pingeprobleemi lahendamisel mobiilsete seadmetega

Järgnevalt on esitatud lühiülevaade alternatiivsetest meetoditest võrkude pingeprobleemide lahendamisel [MEL07, IEC02].

- Täiendava inertsiga pöörlevate seadmete kasutamine ehk pöörlevate seadmete inertsi suurendamine on üks lihtsamaid meetodeid pingelohkude ja lühiajaliste katkestuste katmiseks. Meetodi edukus sõltub inertsi ja koormuse suhtest ning omab mõju mõned sekundid.
- Pöörlev masin koos hooratasenergiasalvesti ja mootori või reservtoiteallikaga. Suur mass koos vaakumis kiiresti pöörleva mootor/generaatoriga võimaldab salvestada energiat mõne MWh. Seade on varustatud energia salvestamiseks ja salvesti tühjendamiseks jõupooljuhtmuunduriga. Sedalaadi süsteemid võimaldavad reeglina katta koormusi kuni mõnisada kilovatti.
- Katkematu toite allikad (UPS) on laialdaselt kasutusel, et kaitsta tundlikke seadmeid pingekõikumiste ja katkestuste eest. Tavaliselt tagatakse koormuste toide muunduri kaudu. Alalisvoolu osa on ühendatud energiaallikaga nagu akud. Salvestusvõime võib olla laias vahemikus, mis sõltub konkreetsetest nõuetest katkematule toitele ning mida piirab vaid salvesti maksumus. Kasutusvõimsus varieerub suures ulatuses, alates väikestest koormustest ja lõpetades sadade kilovattidega.
- Ülijuhtivad energiasalvestid (*superconducting magnetic energy storage*, *SMES*) - tööpõhimõte sarnaneb *UPS*idega, kuid akumulaatorite asemel kasutatakse siin ülijuhtivat elektromagnetit. Energia salvestub selle magnetvälja. Sellise seadme mõõtmed on väiksemad ja toimimiskiirus suurem kui akumulaatoritel põhinevatel *UPS*idel. Ülijuhtiva magneti puhul on kaod väikesed ning magneti omadused säilivad tuhandete laadimis- ja tühjendamistsüklite jooksul. Ülijuhtivuse saavutamiseks tuleb magnetit jahutada kuni -173 °C[3]. Tüüpiline ülijuhtiv süsteem on võimeline kaitsma kuni 8 MVA võimsusega tarbijaid kuni 25% pingelohu korral 10 sekundi jooksul.
- Staatiline reaktiivvõimsuse kompensaator (*static var compensator, SVC*) koosneb reeglina kondensaatoritest ja/või passiivfiltrist koos pooljuhtmuunduri kaudu paralleelselt ühendatud reaktoriga. Võimaldab sujuvat reaktiivvõimsuse ja pingekõikumiste kompenseerimist. Tavaliselt kasutatakse SVC-sid kesk- ja kõrgepingevõrkudes, kus nende tehnilised näitajad jäävad vahemikku mõnest Mvar-st mõnesajad Mvar-ni. Peamiselt võimaldavad reguleerida suurtes sõlmpunktides pinget, tasandades pingelohkusid, kuid piiratud võimekusega. Tavaline pinge reguleerimise ulatus on 10...20%.
- Dünaamiline pingetaastaja (*dynamic voltage restorer, DVR*) - põhielemendid on koormusega jadamisi ühendatud trafo mähis ning jõupooljuhtmuundur. Seade reguleerib tarbijale antavat pinget, lisades vajaduse korral täiendavalt kompenseerimiseks sobiva amplituudi, sageduse ja nurgaga pinge komponendi. Seade on mõeldud pingelohkude ja -muhkude tasandamiseks. Seade on võimeline mõne millisekundi jooksul taastama kuni 50% sügavusega pingelohke. Seadmeid ehitatakse laias võimsusvahemikus, alates mõnekümnest kilovatist kuni mõnekümne megavatini.
- Ferroresonantstrafod on pinge kvaliteeti tõstvad seadmed, mis suudavad toime tulla enamiku pingelohkude tüüpidega. Tegemist on trafoga, mille ülekandesuhe on 1:1 ning mis talitleb

[3] Electrical Energy Storage. IEC White Paper, 78 p

südamiku püsiva küllastumise juures. Trafo sekundaarmähise väljundpinge on peaaegu konstantne olenemata primaarmähise sisendpinge muutustest. Reservtoiteallikate kasutamisvõimalustest pingeprobleemide lahendamisel annab ülevaate allolev tabel (Tabel 2.1)[MEL07]. Tabelis hallina tähistatud väli tähistab vastava lahenduse sobivust kirjeldatud kestusega pingelohu/-muhu või katkestuse korral.

Tabel 2.1. Reservtoiteallikate rakendamine pingelohkude/muhkude ja katkestuse korral

Lahendused	Kestus ja tehnilised nõudmised			Installeeritud võimsus	Märkused
	<1s	1s...1min	>1min		
Ajalise viitega kontaktorid				Mõni VA	-
Alalisvooluallikas koos kondensaatoriga					Suurim kestus sõltub kondensaatori mahtuvusest
Pöörlev masin koos hoorattaga				<500 kVA	Suurim kestus sõltub salvesti mahutavusest või diiselgeneraatori kütuse mahutist kuni mitu tundi
Varutoiteallikas koos diiselgeneraatoriga				<1 MVA	
Alalisvooluallikas koos akuga				<300 kVA	
Pöörlev masin koos hooratta ning mootori või reservtoitega (ümberlülitus varutoiteallikale võib põhjustada lühikesi katkestusi)				<500 kVA	
Alalisvoolumootor, mis on ühendatud aku ja sünkroongeneraatoriga				<500 kVA	

Ohtlike pingelohkude mõju vähendamiseks võivad mõndagi teha nii võrguettevõte kui tarbijad ise. Üldiselt on majanduslikult otstarbekam tegeleda probleemiga madalamal tasemel, koormusele lähemal. Majanduslikult soodsamaks lahenduseks on pingelohu või katkestuse läbimise võime sidumine seadme tehniliste nõuetega, mis tähendab, et tarbija pingelohkudele tundlikke seadmeid ei kasuta.

Pingeprobleemidega võrgupiirkondades võiksid seadmed edukalt läbida pingelohke ulatusega (ehk jääkväärtus nimipingest) kuni 70%, sest tõenäosus, et kogetakse pingelohke alla 70% on väike. Ideaalsel juhul peaks tarbija seadmed läbima pingelohke ulatusega 50%.[MEL07]

2.1 Akudel põhinev energiasalvestus

Energiasalvestus akudes toimub laengukandjate abil, mida tuuakse juurde ja viiakse eemale reduktsiooni- ja oksüdatsiooniprotsesside ehk lühidalt elektrokeemiliste reaktsioonide käigus. Primaarelemendi ehk mittelaetava patarei esmarakendajaks 19. sajandi alguses peetakse itaalia füüsikut Alessandro Voltat, aastaks 1859 töötas prantslane Gaston Planté välja esimese laetava patarei ehk pliiaku, mis leiab kasutust

veel tänapäevalgi. Elektripaigaldistes on pliiaku senini levinum akutüüp, viimasel ajal saavutavad üha suurenevat turuosa ka liitiumakud, viimaste eelisteks on paremad erivõimsuse ja –energia näitajad, st nad suudavad salvestada ja vabastada massi- ja mahuühiku kohta rohkem energiat ja võimsust kui pliiakud.

Tühjenemisel leiab aset iseeneslik elektrokeemiline reaktsioon, mis tekitab keemiliste potentsiaalide võrdustamiseks elektronide liikumise ehk elektrivoolu läbi tarviti. Positiivsel elektroodil toimub reduktsiooni- ja negatiivsel oksüdatsioonireaktsioon. Kui elektroodid saavutavad sama potentsiaali, vool lakkab. Laadumisprotsess on vastupidine: aku toimub voolu vastuvõtjana ja tema elektroodide elektrilised potentsiaalid eemalduvad teineteisest, põhjustades pinge suurenemise. Positiivsel elektroodil toimub oksüdatsiooni- ja negatiivsel reduktsioonireaktsioon. Katoodiks nimetatakse elektroodi, milles toimub reduktsioon, anoodil seevastu leiab aset oksüdatsioon. Kuna tühjenemisel ja laadimisel nende rollid vahetuvad, siis neid mõisteid akude puhul ei kasutata.

2.1.1 Enamlevinud akude liigid

Statsionaarsetes paigaldites enimkasutatavad akuelemendid on plii- ja Li-Ion akud. Mõnevõrra väiksema laengumahtuvuse juures ampertundides on Li-Ion akude eelisteks väiksemad gabariidid, suurem energiamahutavus ja voolutaluvus (Tabel 2.2). Puudustena tuleb nimetada kõrgemat maksumust ja elementide pingete ühtlustamise vajadust jadaühenduses, kuna tootmisprotsessit tingitud mahtuvuste väikeste erinevuste tõttu laaduvad nad ebaühtlaselt.

Tabel 2.2. Samade mahtuvusnäitajatega plii- ja Li-Ion akuelementide võrdlus

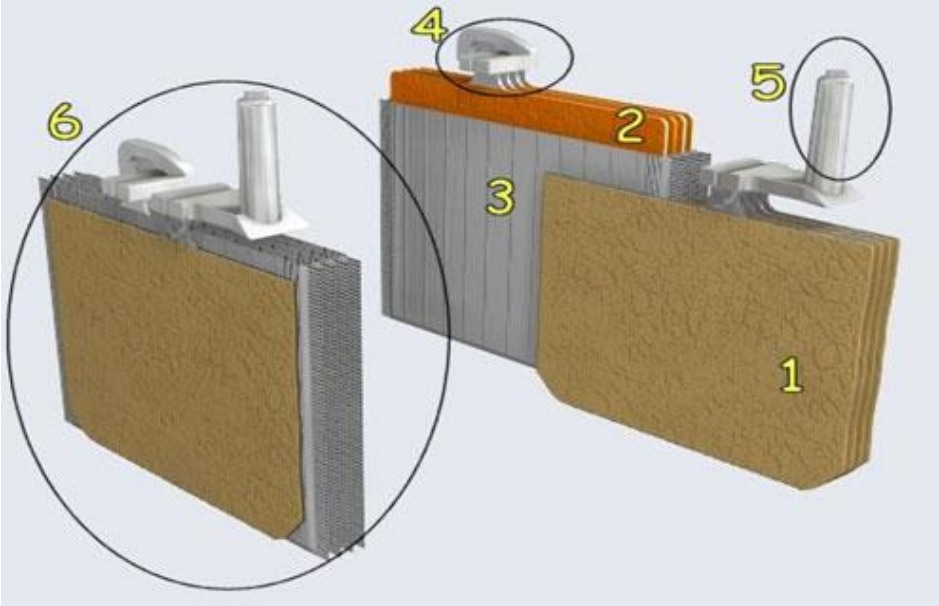
Näitaja	**Pliiaku A602/225 (Exide)**	**LFP LYP200AHA (Winston)**
Mahtuvus	224 Ah	200 Ah
Nimipinge	2,1 V	3,2 V
Energia	470 Wh	640 Wh
Mõõtmed (LxKxS)	(105x357x208) mm	(362x256x56) mm
Ruumala	8 l	5,19 l
Mass	17,4 kg	7,9 kg
15 min max vool	300 A	600 A
15 min max võimsus	588 W	1800 W
15 min massivõimsus	33,8 W/kg	227 W/kg
15 min mahuvõimsus	73,5 W/l	346 W/l
Massienergia	27 Wh/kg = 97 kJ/kg	81 Wh/kg = 291 kJ/kg
Mahuenergia	58,8 Wh/l = 212 kJ/l	123 Wh/l = 442 kJ/l

Pliiaku koosneb 2,1 V nimipingega elementidest. Tavapäraselt koostatakse aku kuuest järjestikku elemendist kogupingega 12,6 V. Pliiaku kujutab endast happelisse keskkonda (väävelhappe vesilahus) asetatud positiivsete ja negatiivsete plaatide koostu.

Plaatidele ehk elektroodidele alalispinge rakendamisel tekib vool, mis hakkab keemiliselt muundama plaate ja elektrolüüti, selline muundus tekitab kahe plaadi vahel potentsiaalide erinevuse. Elektronide liikumise elektrolüüdi sees tagavad ioonid.

Tühjenemisel positiivsed plaadid redutseeruvad, st nad neelavad elektrone, mis vabanevad positiivsetelt plaatidelt (oksüdatsioon). Laadumisel on protsess vastupidine. Joonis 2.1 näitab üksikelemendi koostisosi:

1) negatiivne elektrood, koosneb neljast poorsest pliiplaadist (Pb);
2) positiivne elektrood, koosneb neljast pliioksiidi plaadist (PbO_2);
3) mikropoorne separaator (polüeteenkott);
4) pliist ühendussild;
5) negatiivne ehk miinusklemm;
6) Pb/PbO_2 akuelement.



Joonis 2.1.Pliiaku elemendi ehitus

Analüütiliselt reaktsioonid tühjenemisel ja laadumisel:

PbO_2	+	Pb	+	$2H_2SO_4$	$\underset{\text{laadumine}}{\overset{\text{tühjenemine}}{\rightleftarrows}}$	$PbSO_4$	+	$PbSO_4$	+	$2H_2O$
positiivne elektrood		negatiivne elektrood		elektrolüüt		positiivne elektrood		negatiivne elektrood		elektrolüüt

Kaasprotsessina toimub akus vee hüdrolüüs, mis tekitab gaasidena hapnikku ja vesinikku ja mis põhjustab aku nn kuivamist. Mainitud reaktsioon leiab aset eeskätt laadimisprotsessi lõpul, kui elektroodidele pole enam jäänud aktiivainet. Sõltuvalt pliiaku valmistamise tehnoloogiast vesinik ja hapnik rekombineeruvad elektrolüüdis, mis omakorda mõjutab aku eluiga. Toimuvad teisedki keemilised reaktsioonid, eelkõige plii oksüdeerumine, mis on isetühjenemise peapõhjusteks.

Liitium-ioonelemente, mille leiutamise aeg jääb 1970. aastate algusesse ja mille laiem levik algas 1990. aastate lõpul, jaotatakse vastavalt positiivse elektroodi materjalile järgmistesse alamliikidesse, kusjuures negatiivne elektrood on alati grafiidist:

1) liitium-koobaltoksiid $LiCoO_2$ (LCO);
2) liitium-mangaanoksiid $LiMn_2O_4$ (LMO);
3) liitium-nikkel-mangaan-koobaltoksiid $LiNiMnCoO_2$ (NMC);
4) liitium-raudfosfaat $LiFePO_4$ (LFP);
5) liitium-nikkel-koobalt-alumiiniumoksiid $LiNiCoAlO_2$ (LCA);
6) liitium-titanaatoksiid $Li_4Ti_5O_{12}$ (LTO).

LCO akusid kasutatakse põhiliselt kaasaskantavates seadmetes, kus eeldatakse suurt energiamahutavust suhteliselt väikese võimsuse juures. Elektersõidukites leiavad kasutust enamasti LMO, NMC ja NCA akud, statsionaarsetes ehk kohtkindlates süsteemides on ennast tõestanud LFP ja LTO.

LFP aku näitel koosneb positiivne elektrood liitium-raudfosfaadist $LiFePO_4$, negatiivne elektrood grafiidist ja elektrolüüt liitiumisoolade orgaanilisest lahusest. Tühjenemisel hakkab positiivsel elektroodil moodustuma $LiFePO_4$, samaaegselt laguneb liitumgrafiit süsinikuks ja Li^+ katiooniks negatiivsel elektroodil. Laadumisel formeerub negatiivsel elektroodil liitiumgrafiit ja positiivsel elektroodil laguneb $LiFePO_4$:

Li_{1-x}	+	$FePO_4$	+	Li_xC_n	$\xrightarrow{\text{tühjenemine}}$ $\xleftarrow{\text{laadumine}}$	$LiFePO_4$	+	nC	+	Li^+
positiivne elektrood				negatiivne elektrood		positiivne elektrood		negatiivne elektrood		

Enamlevinud akude liike iseloomustavatest parameetritest detailsema ülevaate annab järgnev tabel (Tabel 2.3)

Tabel 2.3. Enamlevinud akude liigid [TAB15]

Süsteem	Elemendi pinge, V	Energia-tihedus, Wh/kg	Isetühjenemine kuus, %[4]	Tsükliline eluiga[5]	Eelised
Plii-happe, Plii-geel	2,1	30-50	5-10 2-5	150-200 (1000)	Li-Ion võrreldav eluiga kui DoD on <40%, vältida süvatühjendamist
LSD-NiMH[6]	1,2	60-120	1,25	300-500 (II gen. 1500)	Eellaetud, madal isetühjenemine, külmakindel (kuni -20°C)
LiCo ($LiCoO_2$)	3,6	110-190	2	500-1000	Suur energiatihedus
LiMn ($LiMn_2O_4$)	3,7-3,8	110-120	2	300-700	Kiire laadimine, vastupidavus suurtele vooludele
LiNiCoMn/NKM ($LiNiMnCoO_2$)	3,7	95-130	2	1000-2000	Kompromiss suurte voolude ja suure mahutavuse vahel
LFP ($LiFePO_4$) (A123-süsteem)	3,2-3,3	95-140	2	1000-2000	Suured voolud, suurendatud mahutavus, kõrgem laadimispinge, spetsiaalne laadimisseade vajalik
LTO ($Li_4Ti_5O_{12}$)	2,4	70-80	-	3000-7000	Pikaealine, kiire laadimine, energia-tihedus madal, kallis, ohutuim Li-Ion

[4] Isetühjenemine sõltub hoiustamisest
[5] http://batteryuniversity.com/learn/, 100% DoD korral, Li-Ion akudel ideaalne eluiga
[6] LSD (*low self discharge*) madala isetühjenemisega aku

2.1.2 Akude jada-, rööp- ja segaühendus

Akude ahelad jagatakse sõltuvalt ehitusest jada-, rööp- või segaühendusteks. Kõrgemate pingete saamiseks kasutatakse akude jadaühendust. Akude jadaühenduse puudusteks on see, et ühe aku(elemendi) rikke korral langeb terve jada/ahela (ingl k *string*) klemmipinge, mis pingetundlike lahenduste korral on probleemne. Lihtne pinge mõõtmine peale laadimist ei võimalda riket tuvastada. Elementide rike väljendub suurematel koormustel pinge järsu kukkumisena. Sellises lahenduses soovitatakse jälgida seda, et ahelas mahutavuse ja pingete tolerants akude vahel ei ületaks ±2,5%. Kui tegemist on suurte koormuste ja/või külmade oludega, siis on eriti oluline on akude või akuelementide omavaheline sobitamine. Akuelementide pingete ühtlustamiseks kasutatakse spetsiaalseid elektronlülitusi (ingl k balancer), mis reeglina hajutavad liigse energia rööpsel takistil. Eriti oluline on akude või akuelementide omavaheline sobitamine koostudes, mis peavad taluma suuri koormusi ja/või külmasid olusid. Rangemad nõuded tolerantsile on kõrgema pingega akudele, mida kasutatakse laias temperatuurivahemikus ja suurtel koormustel. Vananenud akude ahelates kus pingete tolerants ületab lubatavat väärtust, vahetatakse välja terve ahel.

Suuremate voolude saamiseks kasutatakse akude rööpühendust. Akude rööpühenduse puuduseks on see, et ühe aku(elemendi) rikke korral langeb terve stringi koormatavus. Rikkis elemendid reeglina ei mõjuta ahela klemmipinget, sest sedalaadi lahendused on varustatud lühisekaitsega, mis aitab vältida lühistunud aku või akuelemendi ülekuumenemist ja sellest põhjustatud tuleohtu. Rikkis element mõjutab ka otseselt ahela energiamahutavust.

Kõige paindlikum lahendus on akude segaühendus, kus sõltuvalt nõuetest ühendatakse sobiva pinge ja mahutavusega jadaahelad omavahel rööbiti. Rööpset ühendusviisi nimetatakse ka akumaatrikiks Rööpsete ahelate arvu on soovitav optimeerida sõltuvalt nõuetest seadme käidule (töökindlus, hind, mahutavus jms). Oluline on pöörata tähelepanu sellele, et hangitavad seadmed võimaldaksid akude mahutavuse ja pingeväärtuste automaatset jälgimist.

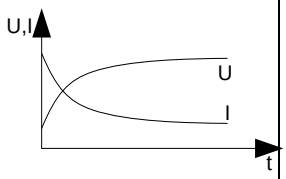
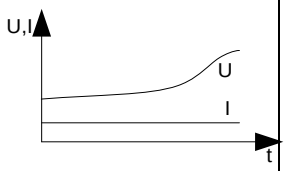
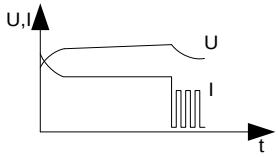
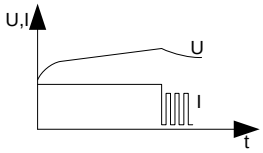
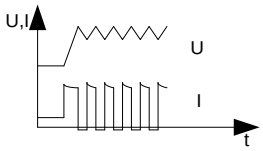
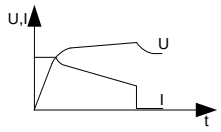
2.1.3 Akude talitlus- ja laadimisviisid

Akude talitluse korral tuleb eristada kolme talitlusviisi, milledeks on akutalitlus, ümberlülitustalitlus ja rööptalitlus [TAB15]. Pingeprobleemide lahendamiseks enim sobivad talitlusviisid on kaks viimast.

- Akutalitlusel (laadimis-tühjendamistalitlus) on tavaolukorras tarbija ühendatud vaid akuga. Alalisvooluallikat kasutatakse vaid aku laadimiseks
- Ümberlülitustalitlusel (lahustalitlus) on tavaolukorras aku tarbijast eraldatud. Kui alalisvooluallikas pole kättesaadav, siis lülitatakse ahela toide aku peale (turvaelektrivarustus)
- Rööptalitlusel (sidustalitlus) on tavaolukorras tarbija, alalisvooluallikas ja aku püsivas ühenduses (katkematu toiteallikas).

Kuna eri liiki akud käituvad elektrokeemiliste iseärasuste tõttu erinevalt, siis kasutatakse ka erinevaid laadimisviise. Lihtne on soetada odav akude laadimisseade, kuid pika eluea tagamisel on oluline tutvuda, millist laadimisviisi soetatava seadme puhul kasutatakse. Lihtsustatud ülevaate akude laadimisviisidest annab järgnev tabel (Tabel 2.4).

Tabel 2.4. Akude laadimisviisid [TAB15]

Laadimine	Laadimiskõver	Selgitus	Rakendatavus
Standard-laadimine		Sedalaadi laadimisseade omab laadimisnäidikuid	Sobib kasutamiseks pliiakudel, kuid puuduseks on võimalik ülelaadimine.
Konstantse vooluga laadimine		Laadimisvool I on 10% aku mahutavusest arvestatuna amprites. Kui aku mahutavus 50 Ah, siis laadimisvool on 5 A	Sobib kasutada plii-, NiMH-akudel. Kui tootja poolt lubatud, siis sobib ka NiCd-akudele.
Aegjuhtimisega laadimine		Laetusaste laadimise alguses ei mõjuta laadimise kestust. Laadimine toimub ette määratud aja jooksul, misjärel lülitub laadimine säilitus-laadimistalitlusele. Mõeldud täielikult tühjenenud akudele. Mõned laadijad varustatud eeltühjendamise valikuga	Sobib kasutada plii-, NiMH-akudel. Kui tootja poolt lubatud, siis sobib ka NiCd-akudele. NiMH akud laetakse NiCd akulaadijatega üle.
Pingelangu järgi laadimine		Akud laetakse täismahutavuseni. Laadimine lõppeb kui laadimispinge saavutab mõne mV suuruse erinevuse ülemisest piir-väärtusest. Sellele järgneb säilituslaadimine.	Sobib kasutada NiMH-akudel. Kui tootja poolt lubatud, siis saab kasutada ka NiCd-akudel. Puuduseks on see, et akusid on lihtne üle laadida
Impulsslaadimine		Impulsslaadimise korral järgneb pikemale laadimisele lühem tühjendamine. Impulsslaadimise abil on mäluefekt[7] (NiCd, NiMH) välditav. Laadimine lõppeb nagu pingelangu järgi laadimisel.	Sobib kasutada NiMH-akudel. Kui tootja poolt lubatud, siis sobib ka NiCd-akudele.
Li-ioon akude laadimine		Algselt laetakse konstantse vooluga. Laadimine katkeb täielikult kui laadimispinge saavutab ülemise ja laadimisvool alumise piirväärtuse. Paljudesse akudesse on sedalaadi ülelaadimise kaitse sisse integreeritud	Li-Ion akud pole ettenähtud püsilaadimiseks, sest ülelaadimine põhjustab tuleohu. Ladustamisel tuleb iga 6 kuu tagant laadida pooltäis ja hoiustada temperatuuril 15°C. Li-Ion akudel pole mäluefekti. Energiamahutavus enamasti vahemikus 90...110 Wh/kg

[7] Mäluefekt (nn laisa-aku efekt) seisneb elektroodide kristalliseerumises, mistõttu takistus kasvab. Seetõttu väheneb aku mahutavus. Efekt väljendub energiamahutavuse proportsionaalses vähenemises aku regulaarse osalise tühjendamise tõttu.

2.1.4 Laadimiskiirused ja nende kasutamine

Eristatakse neli erinevat laadimiskiirust, mille kohta keskkonna- ja laadimistingimused on esitatud allolevas tabelis:

Tabel 2.5. Laadimiskiiruste kirjeldus

Laadimiskiirus	Aku tüüp	C-määr	Laadimisaeg	Temperatuur
Aegane	NiCd, Plii	0,1C	14h	0^oC to 45^oC
Mõõdukas	NiCd, NiMH, Li-ion	0,3-0,5C	3-6h	10^oC to 45^oC
Kiire	NiCd, NiMH, Li-ion	1C	1h+	
Ülikiire	NiCd, NiMH, Li-ion	1-10C	10-60 min	

2.1.5 Temperatuuri mõju akude laadimisel- jatühjendamisel

Rahvusvahelises kirjanduses laadimise ja tühjendamise hindamiseks kasutatakse C-määra. Aku mahutavust hinnatakse väärtusega 1C, mis tähendab, et 1Ah mahutavusega akut saab 1h jooksul koormata vooluga 1A. Kui sama akut tühjendamist iseloomustab määr 0,5C, siis see tähendab, et akut tühjendatakse 2 tundi vooluga 500mA. Määr 2C tähendab, et akut tühjendatakse 30 minutit vooluga 2A. Kaod kiirtühjendamisel põhjustavad tühjenemisaja vähenemist ja mõjutavad laadimisaega. Lühidalt C-määr kirjeldab laadimise või tühjendamise kestust, millest annab ülevaate allolev tabel. Vastavalt Peukerti seadusele tühjendamisel suurem C-väärtus tähendab suurematest kadudest tulenevat väiksema energiahulga kättesaadavust akust. Näiteks osadel plii- ja leelisakudel tühjendamisel 2C määraga (1Ah, 2A, 30 min) tähendab energia kättesaadavust <95%. Seevastu tühjendamisel 0,5C määraga (1Ah, 500mA, 2 h) tähendab energiakättesaadavust 100%.

Tabel 2.6. C-määra ja laadimise-tühjendamise kestuse vastavus

C-määr	Protsessi kestus
5C	12 min
2C	30 min
1C	**1h**
0.5C või C/2	2h
0.2C või C/5	5h
0.1C või C/10	10h
0.05C või C/20	20h

Elektrokeemilised salvestid ja akud on ettenähtud töötama väga laias temperatuurivahemikus, kuid see ei tähenda, et neid võib laadida või tühjendada selles vahemikus mistahes koormusel. Üldjuhul vanema tehnoloogiaga akusid nagu plii- ja NiCd akud võib laadida ja tühjendada laiemas temperatuurivahemikus (sh alla 0 °C juures) kui uuemaid tehnoloogiaid, kuid ka siin on reeglina eeltingimuseks madalam laadimisvool. Reeglina akusid saab tühjendada suurtes temperatuurivahemikes, kuid laadimine on piiratud. Järgnev tabel (Tabel 2.7) annab üldise pildi eri liiki akude laadimisest ja tühjendamisest.

Tabel 2.7. Akude laadimis- ja tühjendamistemperatuuride vahemik[8]

Aku tüüp	Laadimistemp.	Tühjendamistemp.	Soovitused
Pliiakud	–20°C…50°C	–20°C…50°C	Külmumispiirist allpool laadimine ≤0.3C. Kõrgetel temperatuuridel vähedada laadimispinget
NiCd, NiMH	0°C…45°C	–20°C…65°C	Temperatuuril –18°C…0°C laadida määraga 0,1C. Temperatuuril 0°C…5°C laadida määraga 0.3C. Lubatav laetus temperatuuril 45°C on 70%. Lubatav laetus temperatuuril 60°C on 45%.
Li-ion	0°C…45°C	–20°C…60°C	Kui tootja pole teisiti sätestanud, siis laadimine allapoole külmumispiiri pole soovitav/lubatud. Kõrgematel temperatuuridel laadimisel ja tühjendamisel kasutegur hea, kuid väheneb eluiga.

2.1.5.1 Madalatel temperatuuridel laadimine

Kiirlaadimine on enamikel akudel piiratud temperatuuriga 5°C kuni 45°C. ***Parima tulemuse saamiseks on soovitav akusid laadida temperatuuril 10°C…30°C. Seetõttu on Eesti kliimas soovitav akud paigaldada soojustatud ja kontrollitud temperatuuriga keskkonda.*** Liiga kiire laadimine põhjustab aku sees rõhu muutuseid, mistõttu võivad aku kesta tekkida praod. Et võimaldada madalatel temperatuuridel kiirlaadimist, siis varustavad tootjad akud eelküttega. Näiteks on sedasi lahendatud mitmete elektriautode akusüsteemid.

Pliiakude jäätumine põhjustab akule püsiva kahjustuse ja muudab selle kasutuskõlbmatuks. Piiakude puhul on oluline akud laetuna hoida, sest tühjas akus elektrolüüt külmub varem kui täis laetud akus. Näiteks võib tühja aku külmumistemperatuur ola juba –15°C juures, samas täisakul on see –55°C.

Li-Ion akude laadimine allapoole 0°C pole soovitav seetõttu, et see põhjustab aku enneaegset vananemist. Enneaegne vananemine võib väljenduda aku sisemises lühises ja seeläbi suuremas tuleohus. Kirjanduses väidetakse, et vastavalt uutele uurimisandmetele võib Li-Ion akusid laadida ka allapoole 0°C, aga väga väikese vooluga, nt –30°C korral määraga 0.02C, mistõttu laadimise kestus võib olla kuni 50 tundi.

2.1.5.2 Kõrgetel temperatuuridel laadimine

Kõrge temperatuur on akude kõige suurem akude eluea mõjutaja. Kui laadijal on temperatuuri kompensatsioon, siis on võimalik akude eluiga pikendada kuni 15%. Soovituslik temperatuuri kompensatsioon säilituslaadimisel[9] (float charge) on 3mV pinge langetamist iga tõusnud kraadi kohta. Kui säilituslaadimise pinge (float voltage) temperatuuril 25°C on 2,30V elemendi kohta, siis temperatuuril 35°C peab pinge olema 2,27V elemendi kohta. Temperatuuril 15°C peab pinge olema 2,33V elemendi kohta.

[8] http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_at_high_and_low_temperatures
[9] Säilituslaadimise eesmärk on kompenseerida aku isetühjenemist

Alljärgnev table annab ülevaate plii akudel elementide pinge piirväärtustest eri temperatuuride korral (Tabel 2.8):

Tabel 2.8. Pliiakudel elementide pinge piirväärtused eri temperatuuridel

Temperatuur	-40°C	-20°C	0°C	25°C	40°C
Laadimisel elemendi pinge piirväärtus	2.85V	2.70V	2.55V	2.45V	2.35V
Säilituslaadimisel elemendi pinge	≤2.55V	≤2.45V	≤2.35V	≤2.30V	≤2.25V

NiCd ja NiMH akude elektrokeemiliste iseärasuste tõttu sõltub aku maksimaalne laetavus temperatuurist. Näiteks kommertskasutuses olevate NiMH akude laetavus on temperatuuril 55°C vaid 35...40%. Uute tööstuslike akude laetavus samal temperatuuril on kuni 75-80%.

Li-Ion akud taluvad suhteliselt hästi kõrgeid temperatuure, kuid pikaajaliselt kõrgel temperatuuriga keskkonnas töö vähendab eluiga. Li-Ion akudel on ka seos laetuse vähenemise ja temperatuuri tõusu vahel. Seos on individuaalne ja erineb sõltuvalt tootest.

2.1.6 Juhised akude hoiustamiseks ja ladustamiseks

- ***Pliiakudel tuleb enne hoiustamist seade täis laadida, sest osaline laadimine põhjustab sulfatiseerumist ning soojuse kasvades suureneb iseeneslik tühjenemine. Hoiustamisel tuleb pliiakusid vähemalt iga 6 kuu tagant täis laadida.***
- ***NiCd ja NiMH akud ei vaja hoiustamiseks täiendavat ettevalmistust. Neid võib hoiustada täislaetuna või tühjalt. Peale pikaajalist hoiustamist vajavad need akud täismahutavuse saavutamiseks korduvaid laadimis-tühjendamistsükleid.***
- ***Li-Ion akusid on soovitav hoiustada laetusega 30…60% ja selleks tuleb tühi akuelement laadida pingeni 3,85 V või täis akuelement tühjendada pingeni 3,75V. Elemendi pinge 3,8V vastab ligikaudu laetusele 50%***

2.1.7 Juhised laadimisele

- ***Võimalusel laadida väiksemate vooludega, kuna kiirlaadimine ja ülikiirlaadimine põhjustab akude keemiliste iseärasuste tõttu nende kiiremat vananemist***
- ***Kiir- ja ülikiirlaadimise kasutamisel laadida aku vaid osaliselt täis ning seejärel jätkata aeglasema laadimisega. Viimane on oluline pliiakudel. Li-Ion akud ei vaja aeglast laadimist, kuid ka nende puhul kiirlaadimisega aku mahutavus on mõnevõrra väiksem***
- ***Kiirlaadimist ei tohi kasutada kui aku on külm või kuum. Laadida akut vaid ettenähtud temperatuuril.***
- ***Vältida kiirlaadimist vanade või vähekasutatud akude puhul.***

2.1.8 Olulisemad akude eluiga mõjutavad tegurid

<u>Pliiakud</u>

- ***Tühjendamissügavus on oluline akude eluiga mõjutav tegur.***

- ***Iga temperatuuri kasv 8°C võib vähendada suletud pliiakude (sealed lead acid) eluiga kuni poole võrra.***
- ***Ujutatud (flooded lead acid) pliiakud on temperatuuri suhtes kõige vähem tundlikud, kuid vajavad head õhuvahetust ja veega täitmist. Eluiga võib ulatuda kvaliteetse hoolduse korral kuni 20 aastani***
- ***Ventiilreguleeritavate pliiakude eluiga jääb reeglina 5-10 aasta vahemikku. Temperatuurid üle 40°C võivad põhjustada enneaegset vananemist.***
- ***Sagedased tühjendamised ja/või sügavad tühjendamised vähendavad eluiga.***
- ***Ebapiisav täislaadimine põhjustab sulfatiseerumist, mis vähendab akude eluiga. Samalaadset probleemi ei esine Li-Ion akul.***

<u>Liitiumakud</u>

- ***Tühjendamissügavus on oluline aku eluiga mõjutav tegur. Näiteks 100% DoD korral on eluiga 300-500 tsüklit, kuid 25%DoD korral 2000...2500 tsüklit.***
- ***Akude säilitamisel/ladustamisel mõjutab kõrge temperatuur täislaetud akude eluiga rohkem kui pooleldi laetud akudel. Näiteks 3 kuu möödudes temperatuuril 40°C hoiustatud 40% laetusega aku nimimahutavus on 85% algsest, kuid 100% laetusega aku mahutavus 65% algsest.***
- ***Elemendi laadimispinge 4,2V iga vähendamine 0,1 V võrra kordistab tsüklilist eluiga kuid aku laetus on sell tõttu väiksem. Näiteks 4,2 V laadides on eluiga 300-500 tsüklit, kuid 4,1 V laadides pikeneb aku eluiga 600-1000 tsüklile ja 3,9 V laadides 2400-4000 tsüklile. Ka elemendi laadimispinge suurendamine üle 4,2 V vähendab eluiga. Iga 70 mV laadimispinge langus vähendab aku laetust 10 % võrra (ehk kasutatavat aku mahtu)***

2.1.9 Katkematu toite allikad (UPS)

Katkematud toiteallikad (UPS-seadmed) on täna enimlevinud akusid ja teisi energiasalvesteid laialdaselt kasutavad seadmed. Tänu akudele on võimelised UPS seadmed lahendama oluliselt suuremal hulgal erinevid pingeprobleemseid olukordi, mida pingestabilisaatorid jms seadmed ei võimalda. Näiteks katkestused, sügavad pingelohud, pingepiigid, sageduse kõikumine jms.

UPS- seadmete topoloogiad liigitatakse vastavalt standardile IEC 62040-3:2011 kolme rühma [TAB15]:

- võrgu pingest ja sagedusest sõltuv ehk lahus või ootetalitluses töötavad UPSis,
- võrgu pingest mitte sõltuv ehk liini-aktiivne UPS
- võrgu pingest ja sagedusest mitte sõltuv ehk sidustalitluses töötav UPS

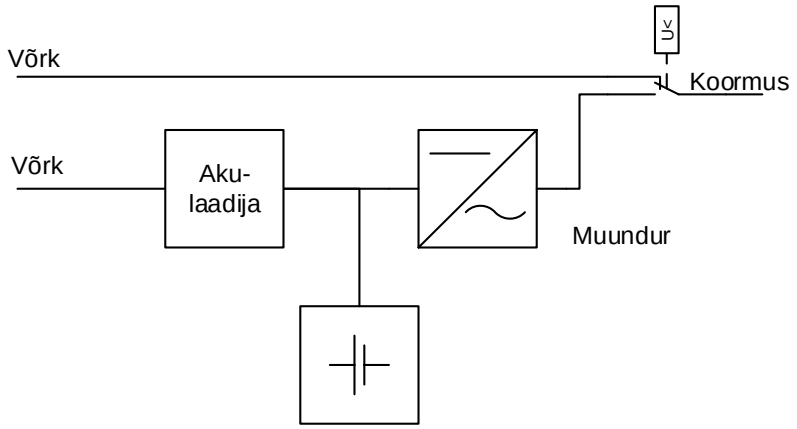
Allolevas tabelis (Tabel 2.9) on kirjeldatud millise rühma UPS-seadmed on võimelised lahendama milliseid pingeprobleeme. Näiteks sidustalitluses UPS –seadmed on võimelised lahendama kõiki tabeli teises veerus kirjeldatud pingeprobleeme, aga lahustalitluse seadmed on võimelised lahendama vaid positsioonidel 1...3 kirjeldatud probleeme.

Tabel 2.9. UPS-süsteemide liigitus ja kasutusala [TAB15]

Pos	Lahendatav pingeprobleem	Kestus, aeg	IEC-klass	UPS-klass
1	Pingekatkestus	>10 ms	pingest ja sagedusest sõltuv (*VFD, voltage and frequency dependent*)	3 Lahustalitlus (*offline*) Ootetalitlus (*stand by*)
2	Pingelohk	≤16 ms		
3	Pingemuhk	≤16 ms		
4	Alapinge (sh 1-3)	Pidev, püsiv	pingest sõltumatu (*VI, voltage independent*)	2 Liini-aktiivne UPS (*line interactive*)
5	Ülepinge (sh 1-3)			
6	Välgu mõjud (sh 1-5)	juhuslik	pingest ja sagedusest sõltumatu (*VFI, voltage and frequency independent*)	1 Sidustalitlus (*online*) Topeltmuundus (*double conversion*)
7	Pingepiigid (sh 1-5)	<4 ms		
8	Sageduse kõikumine (sh 1-5)	Juhuslik		
9	Pingemoonutus (sh 1-5)	Perioodiline		
10	Harmoonilised ja pinge muud kõikumised (sh 1-5)	Pidev, püsiv		

Järgnevalt vaatlemegi kirjeldatud topolooogiaid

Lahus-ootetalitluses UPSi (SPS) (*passive stand-by, off-line*) väljundpinge amplituud ning sagedus on tugevas sõltuvuses UPS-i sisendpinge amplituudist ning sagedusest. See UPS omab ainult baasvõimalusi, pakkudes ülepingekaitset ja reservtoidet (Joonis 2.2). Kaitstavad seadmed on tavaolukorras ühendatud otse võrguga üle ümberlüliti või läbi UPSi väljundis oleva filtri, mis pakub teatavat pingeühtlustuse võimalust. Kui pinge sisendis langeb alla või tõuseb üle sätestatud piirväärtuse, siis seade lülitub ümber DC/AC muundurile (reeglina ühesuunaline), mis saab toite akust. Toide akust tagatakse sõltuvalt salvesti mahutavusest või kuni võrgupinge saavutab ettenähtud väärtuse. Sõltuvalt koormuse eripäradest võib ümberlüliti olla elektromehaaniline või elektrooniline.



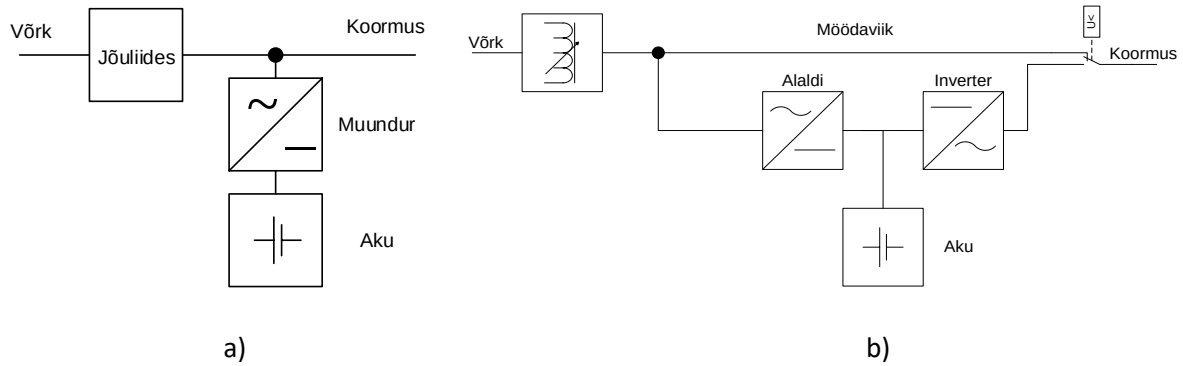
Joonis 2.2. Lahus-ootetalitluses UPS[10]

[10] EVS-EN 62040-3:2011

Puuduseks sidustalitluses UPSi ees on ümberlülituse aeg, mis võib varieeruda pingemuutuste tuvastuskiiruse tõttu, kuid reeglina ei ületa 25 ms (tavaliselt ca 10 ms). Selline ümberlülitus võib tundlikumatel tarbijatel häireid esile kutsuda või isegi seadmeid rikkuda. Sedalaadi UPS-seadmeid kasutatakse laialdaselt arvutite toiteks. Eeliseks on odavus ja puuduseks see, et ei võimalda toitekvaliteeti parandada. Tüüpiline pingekatkestuse kestus, mida seda liiki UPSid katavad on 0...20 minutit.

Liini-aktiivne ehk hübriid UPSi (*line interactive*) väljundpinge amplituud ei sõltu UPS-i sisendpinge amplituudist. Liiniaktiivne UPS koosneb tavaliselt kahesuunalisest inverterist ja vahelduvvoolu jõuliidesest. Tavaolukorras saab koormus stabiliseeritud toite jõuliidesest või muundurist. Muundur ja jõuliides võimaldavad laadida akut ja/või stabiliseerida väljundit. Väljundsagedus on tavaolukorras sõltuv võrgu sagedusest. Kui võrgupinge või -sagedus on väljaspool lubatud piire, siis koormus eraldatakse jõuliidese abil võrgust ja koormus lülitatakse muunduri kaudu aku toitele. Toide akust tagatakse sõltuvalt salvesti mahutavusest või kuni võrgupinge saavutab ettenähtud väärtuse. Kasutatakse ka lahendust kus muundur on ühesuunaline, kuid siis kasutatakse täiendavalt akulaadijat.

Seade võib lisaks omada korrigeerivat pooljuhtmuundurit, autotrafot, ferroresonantstrafot vms seadet. Korrigeerivat seadet juhtides (nt trafo mähiseid lülitades) on võimalik kompenseerida sisendis väiksemaid pingemuhke ja –lohke (reeglina ±15...±25%). Korrigeeriva seadmega liini-aktiivneUPS on võimeline töötama pideva alapinge või ülepinge tingimustes ilma, et kasutaks reservtoidet akust. Ala- või ülepinge kompenseerimiseks lülitatakse nt trafo mähiseid automaatselt ringi või muudetakse pooljuhtmuunduri talitlust (Joonis 2.3).



Joonis 2.3. Liini-aktiivne UPS a) tüüpiline[11] b) autotrafoga

Seda liiki lahendus on populaarne odavates UPS-seadmetes, kuna kasutab ära ootetalitluses UPSi ja autotrafo eeliseid. Kompenseeriva lüli olemasolul väikest pingelohku kompenseeritakse nt autotrafo pinge tõstmise ja aku tühjendamisega ning väikest pingemuhku kompenseeritakse autotrafo pinge alandamise ja aku laadimisega. Suurte pingelohkude ja –muhkude korral tagatakse toide vaid akust. Eeliseks lahus-ootetalitluses UPSi ees on ilma voolukatkestuseta üleminek akutalitlusele. Tüüpiline pingekatkestuse kestus, mida seda liiki UPSid katavad, on 5...30 minutit.

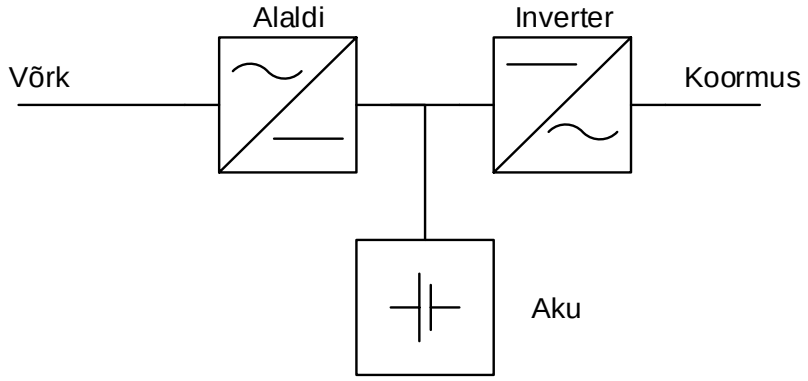
[11] EVS-EN 62040-3:2011

Eelised võrreldes sidustalitluses UPS-iga[12]:

- Madalam energiatarve (seega kulud madalamad), sest vaheldi lülitatakse välja kui võrgupinge on lubatud piirides
- Kõrgem töökindlus tänu väiksemale arvule komponentidele ja madalamale töötemperatuurile (sh väiksemad soojuskaod)

Tähelepanu tuleb pöörata, et seade ei pruugi sobida lahendustesse kus esineb sagedasi ja suurtes piirides võrguhäireid, mille tõttu aku kasutus võib olla liiga sage ning võib mõjutada märkimisväärselt akude ja seadme eluiga. Täpsed UPS seadme eripärad võrguhäirete sagedusele ja sügavusele määrab iga tootja konkreetsele seadmele. Samuti ei sobi rakendustesse, kus on vajadus võimsusteguri korrigeerimisele.

Sidustalitluses (ehk topeltmuundusega) UPSi (*double conversion, on-line*) väljundpinge amplituud ja sagedus ei sõltu UPS-i sisendpinge amplituudist ja sagedusest. Skemaatiliselt sarnaneb see lahustalitluses reservtoiteallikale, kuid erinevus on juhtimisprintsiibis. Selle UPSi puhul tagatakse koormuste toide alati läbi AC/DC ja DC/AC muundurite (Joonis 2.4). Viimase tõttu nimetatakse seda UPSi sageli ka topeltmuundusega UPS-ks.



Joonis 2.4. Sidustalitluses UPS[13]

Normaaltalitluses koormust toidetakse pidevalt läbi alaldi ja inverteri. Kui UPSi (ehk alaldi) sisendis toide katkeb või toiteparameetrid ei vasta sätestatud nõuetele, siis lülitub alaldi välja, kuid akudest tagatakse UPSi väljundis (läbi vaheldi) jätkuvalt muutumatu toide. Kui võrgutoide taastub, katab alaldi nii akude laadimise kui ka külge ühendatud koormuse vajadused. Akude laadimisvoolu sellisel juhul vajadusel piiratakse, et tagada akude pikem eluiga. Peamine eelis sedalaadi UPSi puhul on väljundis muutusteta ja võrgust sõltumatu toitekvaliteet. Puuduseks on kallidus, kuid selle korvab aku pikem eluiga. Sedalaadi UPSe kasutatakse väga tundlike seadmete toiteks või kui varutoite generaatorile ümberlülitus peab toimuma sujuvalt. Aku võib olla ühendatud otse DC-siinile (alaldi ja inverteri vahel) või läbi DC/DC muunduri või lülitusseadme. Akude laadimine võib toimuda alaldi kaudu või eraldi laadija abil.

[12] http://www.apcdistributors.com/white-papers/Power/WP-79%20Technical%20Comparison%20of%20On-line%20vs.%20Line-interactive%20UPS%20designs.pdf
[13] EVS-EN 62040-3:2011

Eelised võrreldes liiniaktiivse UPS-iga[14]:

- Võimaldab võimsusteguri korrigeerimist
- Madalate koormuste korral on võimeline töötama madalama sisendpinge tingimustes
- Kui sisendpinge on tugevate häiringutega, siis kasutab topeltmuunduse eeliste tõttu akut harvem
- Kompaktsem ja kergem suuremate võimsuste korral
- Võimaldab sageduse reguleerimist

Millele tähelepanu pöörata:

- Komponentide suurema arvu tõttu töökindlus madalam, käidukulud ja soojuskaod suuremad ning eluiga lühem. Võib vajada täiendavat jahutust.
- Sidustalitluses UPSi tõhusus jääb tavaliselt vahemikku 85...92%, seevastu liiniaktiivse UPSi tõhusus jääb vahemikku 96...98%. Seega omatarve on sellisel UPS-seadmel suurem

Tavaliselt on UPS-süsteemid mõeldud peamiselt pingekatkestustele kestusega 10, 15, 30 minutit, kuid valmistatakse ka vastavalt kliendi nõuetele. Peamiselt UPSide kasutamisest on mõistlik rääkida pingeprobleemide korral, mille kestus ületab 5 või 10 minutit.

2.1.10 Soovitused UPSide kasutamisel ja valikul

- ***UPS seadmete kasutamisel lähtuda pingeprobleemi eripärast ja hinnast. Kasutada UPS-seadet nõrkades võrkudes kus esineb sagedasi lühiajalisi pingekatkestusi või on kasutusel kallid pingetundlikud elektroonikaseadmed. Seadmed sobivad kasutamiseks eelkõige kuni 10 minutiliste ja sagedaste pingekatkestustega võrkudes.***
- ***Kui pingeprobleemid väljenduvad lühiajalistes katkestustes ning pingemuhkudes ja –lohkudes, siis eelistada seadme odavuse, väiksemate käidukulude, suurema töökindluse ja kasuteguri tõttu liini-aktiivset UPS seadet***
- ***Tugevate ja väga laia spektriga häiringutega nõrkades võrkudes eelistada sidustalitlusega UPS-seadet, kuna säästab oma ehituse tõttu rohkem akut ja tagab võrreldes teiste UPS-seadmetega pikema eluea akudele. Lisaks võimaldab seade sageduse reguleerimist.***

2.1.11 Akude ja energiasalvestuslahenduste hinnad

Järgnevates tabelites (Tabel 2.10, Tabel 2.11) on esitatud hinnad eri tüüpi akude ja energiasalvestuse terviklahenduste kohta. Tabelis esitatud salvestamise maksumuse arvestamisel on lähtutud tabelis esitatud elueast vastava tühjendamissügavuse korral. Altoodud arvutuste puhul pole arvestatud tarne-, paigaldus- ja käidukulusid.

[14] http://www.apcdistributors.com/white-papers/Power/WP-79%20Technical%20Comparison%20of%20On-line%20vs.%20Line-interactive%20UPS%20designs.pdf

Tabel 2.10 Akude maksumus energiaühiku kohta[15][16]

Tüüp	Mahutavus (tühjendamis-periood), kWh	Eluiga, tsüklites	Tühjendamis-sügavus DoD, %	Mooduli maksumus, €	Salvestamise maksumus, €/kWh
AGM akud (suletud pliiakud, elektrolüüdiga immutatud klaaskiud)					
Winner Proteus 12V 200Ah	2,4	1500	30%	388	0,359
Winner Proteus 12V 100Ah	1,2	1500	30%	208	0,385
GEL akud (suletud geeltüüpi pliiakud)					
Winner 12V 200Ah	2,4 (C10)	1800	30%	479	0,370
Winner 12V 100Ah	1,2 (C10)	1800	30%	278	0,429
LiFePO4 akud (liitium-ioon akud)					
PYLONTECH 48V - 9,6 kWh	9,6	6000	80%	6469	0,140
PYLONTECH 48V - 2,4 kWh	2,4	6000	80%	1689	0,147
OPzS akud (üleujutatud pliihappeakud)					
Winner Solar 2V 4520	54,24 (C100)	5000	30%	10140	0,125
Winner Solar 2V 1800	21,6 (C100)	5000	30%	4374	0,135
OPzV akud (toruja plaatkonstruktsiooniga geel-tüüpi ventiilreguleeritavad pliihappeakud)					
Winner Solar 2V 3900	46,8 (C100)	5500	30%	9414	0,122
Hoppecke 20 sunpower VR L 2900	34,8 (C100)	5600	30%	7788	0,133
Akukomplekt					
Hoppecke sun powerpack classic 22.0/48 (OPzV)	22 (C10)	2500	50%	5598	0,204
Hoppecke sun powerpack classic 16.0/48 (OPzV)	16 (C10)	2500	50%	4798	0,240

Tabel 2.11 Salvestamise terviklahenduste maksumus energiaühiku kohta[17][18]

Tüüp	Mahutavus (tühjendamis-periood), kWh	Eluiga, tsüklites	Tühjendamis-sügavus DoD, %	Mooduli maksumus, €	Salvestamise maksumus, €/kWh
Dowell iPower 48V, 3kW, LiFePO4	9,6	6000	80%	7664	0,166
Dowell iPower 48V, 3kW, LiFePO4	4,8	6000	80%	4928	0,214
Samsung AIO 5,5 KWH System, 5kW, Li-Ion	5,5	6000	100%	7659	0,232
LG Chem Resu 10 + IBC SolStore Set M1 (SMA SI 4.4), 5kW. Li-Ion	8,8	6000	90%	8433	0,177
MultiPlus 12/3000/120-50 + 6xHoppecke OPzV 24 sunpower VR L 3500	42	5600	30%	10753	0,152
MultiPlus 12/3000/120-50 + 6xWinner OPzS Solar 2V 3760	45,12	5000	30%	10705	0,158
MultiPlus 12/3000/120-50 + 20xWinner AGM Battery Proteus 12V 200Ah	48	1500	30%	9525	0,441

[15] https://greenakku.de/Batteries:::7.html, 26. Märts 2017
[16] http://www.photovoltaik-shop.com/speichersysteme.html, 15. Oktoober 2016
[17] https://greenakku.de/Batteries:::7.html, 26. Märts 2017
[18] http://www.photovoltaik-shop.com/speichersysteme.html, 15. Oktoober 2016

Nagu eeltoodud tabelitest järeldub, osutuvad pliiakud mitmetel juhtudel majanduslikult mõnevõrra otstarbekamaks. Pliiakude käidukulud on ca 1-2% ja Li-Ion akude käidukulud on ca 4% invetseerimiskuludest.[19]

Erinevate ettevõtete eri aastate hinnapakkumiste põhjal on kokku pandud allolevad tabelid (Tabel 2.12,

Tabel 2.13) sidustalitluses (*online*) UPS-seadmete soetushindadest, mis ei sisalda tarne-, paigaldus- ja käidukulusid. Nimetatud tabelites esitatud UPS-seadmed on mõeldud sisetingimustes kasutamiseks. Seega allolevatele hindadele tuleb juurde arvestada täiendavad kuludseadmete välitingimustesse paigaldamiseks.

Tabel 2.12. Sidustalitluses ühefaasiliste UPS seadmete hinnad

Mudeli tüüp	Katkestuse kestus, min	Ligikaudsed hinnad ilma käibemaksuta, €
10 kVA	10	5700
	30	8000
15 kVA	9	7000
	35	10000
20 kVA	10	9000
	25	11000
	45	17000

Tabel 2.13. Sidustalitluses kolmefaasiliste UPS seadmete hinnad (Mak Plus Power Systems UG)[20]

Mudeli tüüp	Katkestuse kestus, min	Ligikaudsed hinnad ilma käibemaksuta, €
10 kVA	5	3700
15 kVA	5	4350
20 kVA	5	5000
30 kVA	5	5500
40 kVA	5	8100
60 kVA	5	10250

Energiasalvestite investeeringu ja käidukulude kohta on avaldatud mitmeid uuringuid. Sealhulgas üks huvitavamaid on *Sandia National Laboratories* poolt 2011 aastal avaldatud aruanne, millest väljavõte on esitatud järgnevas tabelis (Tabel 2.15). Tabel 2.14 sisaldab arvutustel aluseks olnud eeltingimusi. Arvutusmetoodika kohta täiendavat infot leiab nimetatud uuringust.

[19] http://www.pacificorp.com/content/dam/pacificorp/doc/Energy_Sources/Integrated_Resource_Plan/2015IRP/2015IRPStudy/Energy_Storage-Screening-Study-July2014.pdf
[20] http://de.mak-powersis.de/usv.html, 28. november 2016

Tabel 2.14 Analüüsil aluseks olnud lähteandmed [21]

Parameeter	Väärtus
Inflatsiooni määr	2%
Diskonto määr	10%
Eluiga	10 aastat
Ettevõtte püsitasu määr	11%
Kliendi püsitasu määr	15%
Elektri hind salvestamisel	10 senti/kWh

Tabel 2.15 Akude ja ülikondensaatorite investeeringu- ja käidukulud [22]

	Investeering võimsuse ja energiaühiku kohta		Täistsükli tõhusus, %	Eluiga tsüklites	10 aasta käidukulu nüüdisväärtus esimesel aastal, lühiajalise salvestamise korral, $/kW	
	Võimsuse hind, $/kW	Energia hind, $/kWh			Regulaarne tühjendamine (igapäevane, kuni 10000 aastas)	Ebaregulaarne tühjendamine (juhuslik ja harv, ligi 20 korda aastas)
Uue põlvkonna pliiakud	400	330	80	2000	1299	704
Pliiakud süsinik kattega elektroodidega	400	330	75	20000	670	625
Li-Ion (suured)	400	600	85	4000	1410	960
Ülikondensaatorid	500	10000	95	25000	835	793

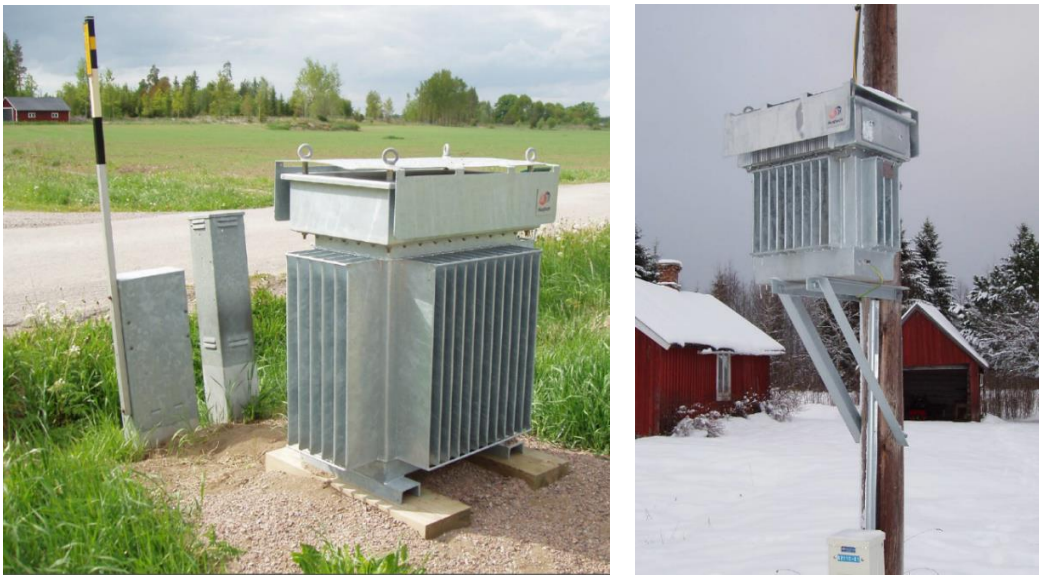
2.2 Elektromagnetilised pingetõstjad

2004. aastal installeeriti Norra madalpingevõrku esimesed magnetilised pingetõstjad (*magnetic voltage booster, MVB*), mille oli välja töötanud ettevõte Magtech AS. Need pingetõstjad kasutavad patenteeritud magnetvoo reguleerimissüsteemi (nn virtuaalne õhkvahemik, *virtual air gap*), mis võimaldab sõltumata sisendpinge muutumisest seadme väljundis hoida stabiilset pingetaset ilma liikuvate mehaaniliste osadeta. Väljundpinget juhitakse alalisvooluga ja iga faasipinget juhitakse eraldi. Seadme tööpõhimõttest detailsem ülevaade on kirjeldatud Silvo Ropoša poolt artiklis [ROP11].

Magtech pingetõstjad (Joonis 2.5) toodetakse nii ühe- kui kui kolmefaasilistena. Seade on võrdlemisi robustne, võimaldades stabiliseerida mittesümmeetrilisi koormusi ning taludes ka ülekoormust ja liigpingeid. Liikuvate osade puudumise tõttu on seadme eeldatav tööiga 25 a. Magtech seadme reaktsiooniaeg on 10 ms ning ta võimaldab tõsta pingetaset kuni 25%, sobides seega hästi pikkade (kuni ca 2 km) madalpingeliinide toitel olevate klientide pingetaseme parandamiseks. Kolmefaasiliste pingetõstjate oluline omadus on selle toitel olevas TN-süsteemiga võrgus ühefaasilise lühisvoolu tõstmine

[21] http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2011/112730.pdf
[22] http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2011/112730.pdf

kuni 60%, mis võimaldab lisaks pingeprobleemile likvideerida ka probleemid liitumispunkti kaitsme rakendumisega.



Joonis 2.5. Magtech AS pingetõstja paigaldusnäide pinnasele ja mastile

Võrgu planeerimisel soovitatakse Magtech pingetõstjad näha liinil ette sellisesse asukohta, kus pinge ilma seadmeta on vähemalt 205 V.

Magtech AS madalpingelised pingetõstjad on ette nähtud:

1. pinge tõstmiseks ja stabiliseerimiseks pikkadel pingeprobleemsetel madalpingeliinidel (õhu- ja kaabelliinid);
2. erinevate faasipingete ühtlustamiseks - vähendab liigset pingetõusu ebasümmeetrilise koormuse korral;
3. väljundpingete stabiliseerimiseks PEN–juhtme katkemise korral;
4. ühefaasiliste lühisvoolude suurendamiseks kuni 60 % (TN juhistikusüsteemi korral);
5. toite automaatse taastamise kindlustamiseks möödaviik-kontaktori abil ülekoormuse ja ületemperatuuri korral.

Magtechi pingetõstja eelisteks on:

1. võimalus tellida elektrooniline kaitselüliti väljundi poolel;.
2. liigpingekaitse olemasolu;.
3. hermeetiliselt suletud teostus;
4. liikuvate osade puudumine;
5. paigaldusvõimalus postile või alusele;
6. tavalise trafoõli asemel on võimalik tellida ka seadmeid, milles kasutatakse keskkonnasõbralikku biolagunevat orgaanilist õli.

Kolme turul põhiliselt pakutava Magtech seadme tehnilistest andmetest ülevaate annab allolev tabel (Tabel 2.16).

Tabel 2.16 Magtech pingetõstjate tehnilised andmed

Pingetõstja tüüp	**MVB70-400**	**MVB160-400**	**MVB250-400**
Juhistikusüsteem	TT/TN	TT/TN	TT/TN
Sagedus (Hz)	50	50	50
Pinge (V)	230/400	230/400	230/400
Koormus (kVA)	30	70	112
Koormus, 6 tundi, 20°C, U_{sis} 195 V (kVA)	50	110	170
Nimivool (A)	40	100	160
Väljundpinge säte (V)	235	235	235
Pinge tõstmine (%) Sümmeetriline koormus	0…+15	0…+15	0…+15
Pinge tõstmine, pinge vähendamine (%), ebasümmeetriline koormus	0…28, 0…-7	0…28, 0…-7	0…18, 0…-7
Reageerimisaeg (ms)	150	200	200
Tühijooksukaod (W)	180	220	220
THD (%)	1-5	1-5	1-4
Iseloomustavad andmed			
Laius x kõrgus x sügavus (mm)	754x928x539	1003x1190x648	1003x1190x648
Kaal (kg)	390	750	750
Ühenduskaabel (mm^2)	≤ 16	≤ 50	≤ 70
Õli (liitrit)	75	158	158
Kaitsekest	tsingitud	tsingitud	tsingitud

Magtech pingetõstja maksumused on 30 kVA seadme puhul ca 8100 € ja 70 kVA seadme puhul ca 9500 €.

2.3 Elektromehaanilised ja elektroonilised pingestabilisaatorid

Pingestabilisaatorid sisaldavad muudetava väljundpingega trafot ja juhtahelaid. Sõltuvalt väljundpinge muutmise viisist eristatakse:

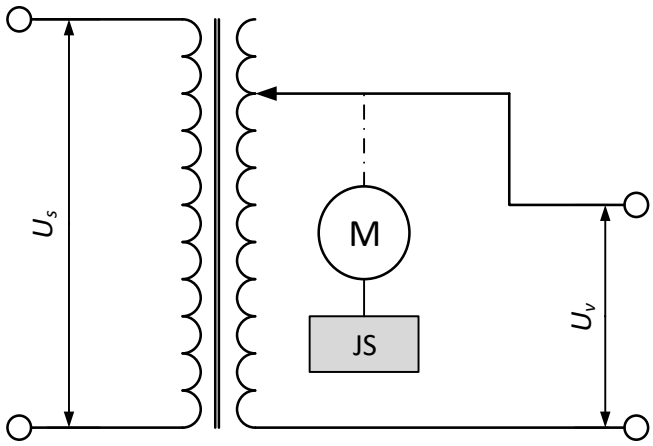
1) sujuvalt muudetava väljundpingega pingestabilisaatoreid;
2) astmeliselt ehk diskreetselt muudetava väljundpingega pingestabilisaatoreid;
3) hübriidseid pingestabilisaatoreid.

Pingestabilisaatoreid toodetakse nii ühe- kui kolmefaasilistena, võimsus jääb neil enamasti alla 50 kVA, üksikud tootjad pakuvad ka kuni 3,2 MVA mudeleid. Eristatakse elektromehaanilisi ja elektroonilisi pingestabilisaatoreid.

2.3.1 Sujuvalt muudetava väljundpingega pingestabilisaator

Sujuvalt muudetava väljundpingega elektromehaaniline pingestabilisaator kujutab endast pöörleva liugkontaktiga pinget tõstvat trafot. Liugkontakti asendit trafo kontaktpinnal reguleeritakse servoajamiga,

mis tagab ülekandeteguri sujuva muutumise. Väljundpinge U_v kõrvalekaldumisel etteantud piiridest muudab juhtimissüsteem JS liugkontakti asendit sekundaarmähisel (Joonis 2.6) ja korrigeerib sedasi väljundpinge väärtust . Mõnedes seadmetes toimub reguleerimine primaarmähisel.



Joonis 2.6. Sujuvalt muudetava väljundpingega pingestabilisaatori

Sujuvalt muudetava väljundpingega stabilisaatori eelisteks on:

1. Suur stabiliseerimistäpsus (reeglina ±1...3 %), mis lubab seda tüüpi kasutada sisendpingele tundlikus aparatuuris, nagu meditsiiniseadmed, juhtimis- ja mõõteaparatuur ning kõrgtehnoloogilised tootmisseadmed.
2. Väljundpinge sujuv reguleerimine, tänu millele ei teki järske pingetõukeid ega elektromagnethäireid.
3. Suur sisendpinge tolerants, antud näitel (160…260) V, mis enamusel juhtudel on piisav.
4. Lühiajaline ülekoormatavus (kuni 200 % mõne sekundi vältel).
5. Moonutustevaba väljundpinge kuju.
6. Suhteliselt soodne maksumus.

Antud stabilisaatoritüübi peamisteks puudusteks on:

1. Suhteliselt väike toimekiirus. Määravaks on pöördkontakti servoajami töökiirus, mis annab reguleerimiskiiruseks (10…40) V/s. Kahe liugkontaktiga stabilisaatorid on kaks korda kiiremad, kuid ka suurema maksumusega.
2. Mehaanilise kontakti olemasolu piirab käidutingimusi. Minimaalne töötemperatuur jääb suurusjärku -5 °C ja maksimaalne õhuniiskus 80 %, mis eeldab kuiva, köetavat ruumi.
3. Pingeregulaatori pöörlevad osad vähendavad stabilisaatori töökindlust. Harjasid tuleb vahetada 3 kuni 5 aasta tagant, servoajamit 5-10 aasta järel.
4. Servoajami põhjustatud müra, mis võib ulatuda kuni 30 dB.

Servoajamiga pingestabilisaatorite orienteeruv hinnaskaalat kirjeldavad allolevad tabelid Tabel 2.17. Tabelis esitatud hinnad ei sisalda tarne-, paigaldus- ja käidukulusid, mis sõltuvad asukohamaast ja paigalduskohast.

Tabel 2.17 Servoajamiga ühefaasiliste pingestabilisaatorite hinnanäiteid[23]

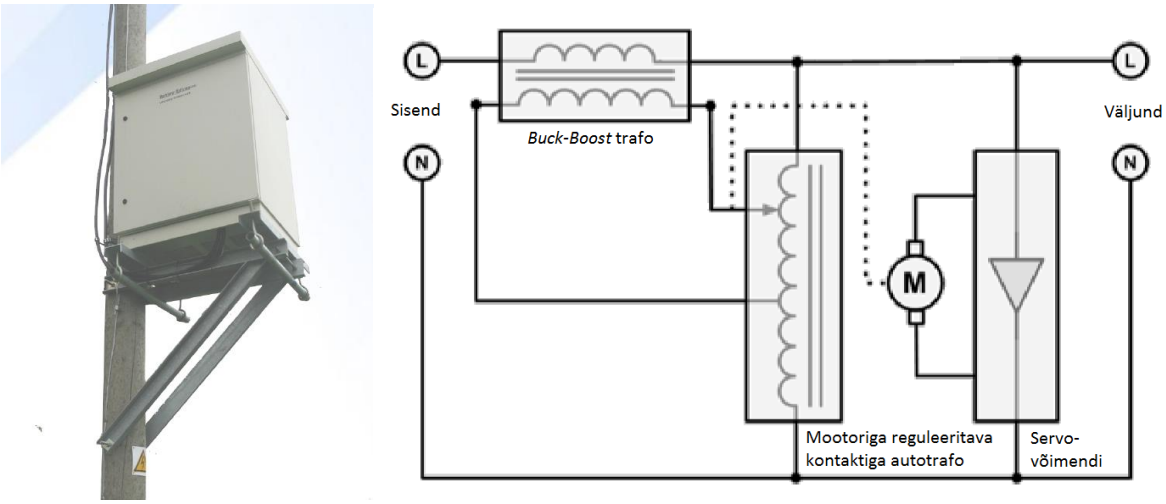
Tüüp	Sisendpinge	Väljundpinge	Nimivõimsus	Maksumus, €
Vega 15-15/35	230 +15%/-35%	230±0,5%	15 kVA	3420
Antares 15-15/45	230 +15%/-45%	230±0,5%	15 kVA	4085
Antares 15-15/45	230 +15%/-45%	230±0,5%	25 kVA	6821

Tabel 2.18 Servoajamiga kolmefaasiliste pingestabilisaatorite hinnanäiteid[24]

Tüüp	Sisendpinge	Väljundpinge	Nimivõimsus	Maksumus, €
Orion 15-15/25	380/220 +15/-25%/	380/220±0,5%	15 kVA	4370
Orion 15-15/45	380/220 +15/-45%/	380/220±0,5%	15 kVA	6717
Orion 20-25/15-30	380/220±25% (30%)	380/220±0,5%	20 kVA	5881
Orion 30-15/45	380/220 +15/-45%	380/220±0,5%	30 kVA	9405
Orion Plus 30-15/45	380/220 +15/-45%	380/220±0,5%	30 kVA	13072
Sirius 1000	380/220 +15/-45%/	380/220±0,5%	60 kVA	35663

2.3.1.1 Ashley Edison pingestabilisaatorid väliskeskkonda

Ashley Edison firma valmistab ühe- ja kolmefaasilisi automaatseid sujuvalt muudetava väljundpingega pingestabilisaatoreid. Seadmed võimaldavad stabiliseerida pingekõikumisi kuni 40% nimipingest. Pinge sujuv reguleerimine toimub energiatõhusa servomootori abil (Joonis 2.7). Jooksvalt jälgitakse pinge erinevust lubatud pingest, mille alusel sujuvalt reguleeritakse väljundpinget. Kasutatud tehnoloogia on väga kiire reaktsiooniga. Tootja sõnul on tegemist praktiliselt hooldevabade seadmetega.



Joonis 2.7. *Ashley-Edison* pingestabilisaator paigalduse näide põhimõtteskeem[25]

Järgnevas kahes tabelis on esitatud ühe- ja kolmefaasiliste pingestabilisaatorite tehnilised andmed ja hinnad (Tabel 2.19 ja Tabel 2.20).

[23] http://магазин-стабилизаторов.рф, http://ortea-market.ru/
[24] http://магазин-стабилизаторов.рф, http://ortea-market.ru/
[25] https://www.ashleyedison.com/outdoor-servo-voltage-stabilizers-761/

Tabel 2.19. Ühefaasiliste 30kVA pingestabilisaatorite andmed ja hinnad

	OCVC-30H-S5	OSES-30H-S20	OSES-30H-S40
Sisendpinge (L-N) [V]	168...252	184...276	138...322
Väljundpinge seaded [V]	220, 230, 240		
Nimivõimsus [kVA]	30		
Väljundpinge regul. täpsus [%]	1		
Kasutegur [%]	98%		
Faaside arv	1		
Kaitseaste	IP54		
Konstruktsioon	BS EN5490 IEC60529	BS EN 60529	
Temperatuur [°C]	–15…50	–15...45	
EMC vastavus	EN50081-1;2 IEC61000-4-3;4	BS EN 55022 BS EN 61000	
CE vastavus	EN55022, EN50082-2, ENV50140-1	2004/108/EC (The EMC Directive) 2006/95/EC (The Low Voltage Directive).	
Garantii	2 aastat		
Hind [€]	14995	8964	21105

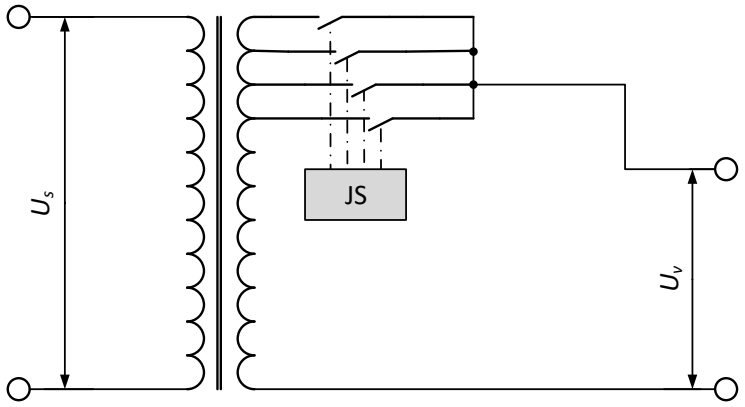
Tabel 2.20. Kolmefaasiliste 30kVA pingestabilisaatorite andmed ja hinnad

	OCVC-30H-3P-S5	OSES-30H-3P-S20	OSES-30H-3P-S40
Sisendpinge (L-L) [V]	290V...430V	320V...480V	240V...560V
Sisendpinge (L-N) [V]	168V...252V	184V...276V	138V...322V
Väljundpinge seaded [V]	380/220; 400/230; 415/240		
Nimivõimsus [kVA]	30		
Väljundpinge regul. täpsus [%]	1%	0,5%	
Kasutegur [%]	98		
Faaside arv	3		
Kaitseaste	IP54		
Temperatuur [°C]	-15...50	–15...45	
Konstruktsioon	BS EN 60529		
EMC vastavus	BS EN 55022 BS EN 61000		
CE vastavus	2004/108/EC (The EMC Directive) 2006/95/EC (The Low Voltage Directive).		
Garantii	2 aastat		
Hind [€]	8595	8316	15066

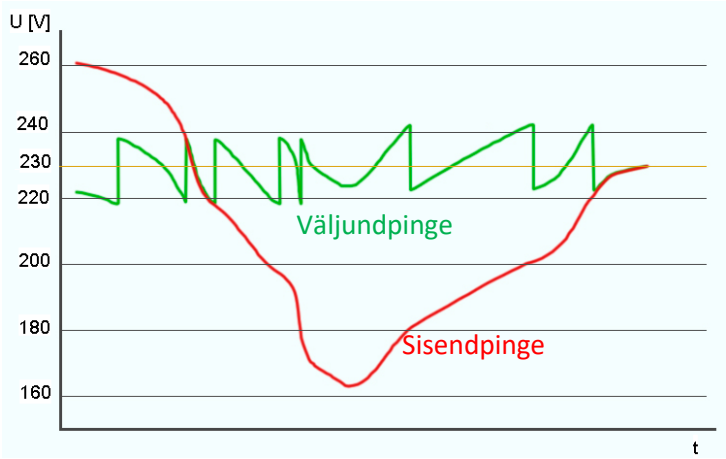
2.3.2 Astmeliselt reguleeritava väljundpingega pingestabilisaator

Konstruktsiooniliselt koosneb astmeliselt reguleeritava väljundpingega pingestabilisaator mitmete väljavõtetega trafost ja peamiselt elektrooniliste pooljuhtlülitite juhtplokist (harvem on kasutusel elektromehaanilised lülitid). Lülituspõhimõtte järgi nimetatakse neid sageli elektroonilisteks

pingestabilisaatoriteks. Väljundpinge kõrvalekaldumisel etteantud vahemikust lülitab stabiliseerimiseks juhtplokk releede abil trafo mähised ümber (Joonis 2.8).



Joonis 2.8. Astmeliselt muudetava väljundpingega pingestabilisaatori funktsionaalskeem



Joonis 2.9. Astmeliselt muudetava väljundpingega pingestabilisaatori väljund- ja sisendpinge vaheline sõltuvus

Reguleerimistunnusjoon (Joonis 2.9) näitab, et väljundpinge ajaline kulg on paralleelne võrgupinge tasemega. Väljundpinge väljumisel seatud piirkonnast toimub trafo mähiste ümberlülitus ja ühtlasi väljundpinge järsk muutus, mis praktikas väljendub hõõgpirnide heleduse hetkelise kõikumisena ja võib tundlikumale tarbijale olla häiriv. Väreluse ulatus sõltub pingekõikumiste sagedusest, liidesega valgusallikad (säästu- ja leedlambid) on tänu sisseehitatud kondensaatoritele ja regulaatoritele sellistele hüpetele tundetumad.

Reguleerimistäpsus sõltub mähise väljavõtete arvust, jäädes reeglina piirkonda ±4 %...±10 %. Samas, ei sobi astmelised regulaatorid madalsageduslike (5…15) Hz perioodiliste pingekõikumiste kompensatsiooniks kontoriruumides, kuna sellisel sagedusel on isegi 1 % pingehüpped füsioloogiliselt häiriva mõjuga.

Astmeliselt muudetava väljundpingega pingestabilisaatorite eelisteks on:

1. Suur reguleerimiskiirus vahemikus 20 ms…50 ms, mis lubab kaitsta tarbijaid järskude võrgupinge kõikumiste vastu.
2. Suur sisendpinge tolerants, mis võib hõlmata isegi 75 V…280 V.
3. Suur töötemperatuuride vahemik (-30 °C…40 °C) ja lubatav suhteline õhuniiskus kuni 95 % ilma kondensaadi tekketa, mis ei eelda kasutamist köetud ruumides.
4. Moonutusteta väljundpinge kuju.
5. Kestev ülekoormatavus kuni 110 % ja lühiajaline kuni 200 %, mis sobib reaktiivkoormustele nagu külmikud, pumbad, pesumasinad ja elektriajameid sisaldavad seadmed.
6. Soodsaim maksumus võrreldes elektromehaaniliste pingestabilisaatoritega.
7. Töökindlus, mis on määratud ümberlülitavate releede kvaliteediga. Releede ajaline ressurss võib ulatuda 10 aastani pooljuhlülitite puhul veelgi kauem.
8. Kõrge kasutegur (kuni 98 %), suhteliselt väikesed mõõtmed ja madal müratase.

Põhipuuduseks on astmelise reguleerimisega kaasnevad pingehüpped, mis võivad väljenduda hõõglampide heleduse kõikumisena. Seega seade tarbijale tajutavat pingeproobleemi ei pruugi lahendada. Mõnikord kasutatakse valgustusahelate jaoks eraldi sujuva reguleerimisega väikesevõimsuselist pingestabilisaatorit.

Servoajamiga pingestabilisaatorite orienteeruvat hinnaskaalat kirjeldavad järgmised tabelid (Tabel 2.21, Tabel 2.22). Tabelis esitatud hinnad ei sisalda tarne-, paigaldus- ja käidukulusid, mis sõltuvad asukohamaast ja paigalduskohast.

Tabel 2.21. Astmelise reguleerimisega ühefaasiliste pingestabilisaatorite hinnanäiteid[26]

Tüüp	Sisendpinge	Väljundpinge	Nimivõimsus	Maksumus, €
Gemini 10-15/7-20	220 ±15%	220±0,5%	10 kVA	2100
Gemini 15-15/10-20	220 ±15%	220±0,5%	15 kVA	2271
Gemini 20-15/15-20	220 ±15%	220±0,5%	20 kVA	2651

Tabel 2.22. Astmelise reguleerimisega kolmefaasiliste pingestabilisaatorite hinnanäiteid[27]

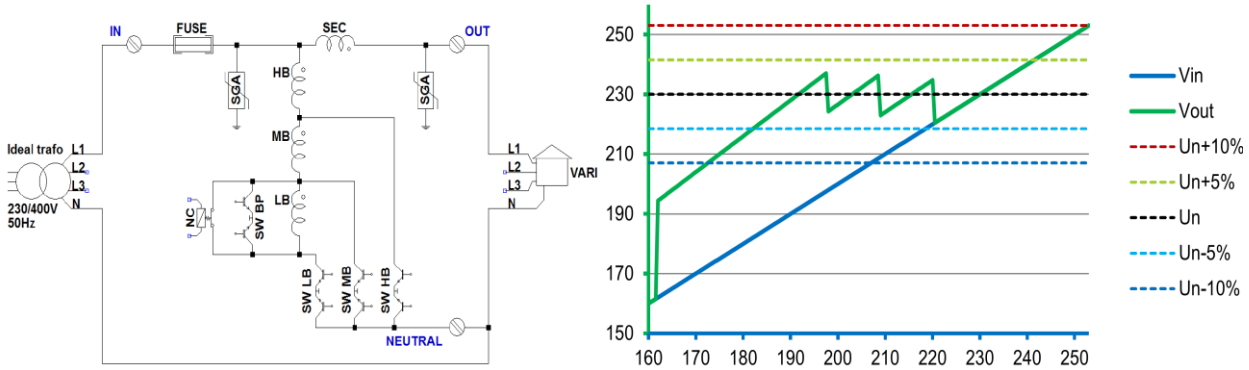
Tüüp	Sisendpinge	Väljundpinge	Nimivõimsus	Maksumus, €
Aquarius 30-15 / 20-20	380/220±15% (20%)	380/220±0,5%	30 kVA	6042
Aquarius 45-15 / 30-20	380/220±15% (20%)	380/220±0,5%	45 kVA	6859
Aquarius 60-15 / 45-20	380/220±15% (20%)	380/220±0,5%	60 kVA	7524

2.3.2.1 ENSTO astmeliselt muudetav pingestabilisaator

Ensto pingetasakaalustajas kasutatakse pingeallikana autotrafot. Primaarpoole vool suureneb koos väljundpinge väärtusega. Primaarahel on jagatud kolmeks alammähiseks (Joonis 2.1). Pingeastmed on määratud mähiste ülekandesuhtega (winding ratios): 20% - 13,3% - 6,7%. Juhtelektroonika mõõdab igas

[26] http://ortea-market.ru/
[27] http://ortea-market.ru/

faasis sisend- ja väljundpinget ning määrab pingetõstmise vajaduse. Mähiste pooljuht-ümberlülitite abil määratakse vastav ülekandesuhe ehk pingenivoo. Möödaviiklüliti aktiveerub kui puudub vajadus pinge reguleerimiseks või kui tuvastatakse liinis rike. Pingetõstmine toimub vahemikus 162…222V (Joonis 2.10).



Joonis 2.10. ENSTO pingetasandaja skeem ja juhtimine

Pingetõstmise funktsioon aktiveerub kui sisendpinge langeb allapoole alapinge seadeväärtust (162V). Kui kõigis 3 faasis langeb pinge alapinge seadeväärtusest allapoole, siis seadme möödaviiklüliti aktiveerub. Pingetasandaja aktiveerub uuesti kui vähemalt ühes faasi on pinge üle 185 V. Seadme jahutus toimub loomuliku konvektsiooni teel, mis ei vaja õlimahutit. Trafo osa kaitseaste on IP33, elektroonika on kindlalt suletud keskkonnas. Suurimad kaod ümberlülitusseadmes on 50W ning trafo kaod maksimumkoormusel ja pingetõstmisel on 40W. Ootetalitluses aktiveerub möödaviiklüliti, mistõttu tühijooksukaod ei ületa 10W.

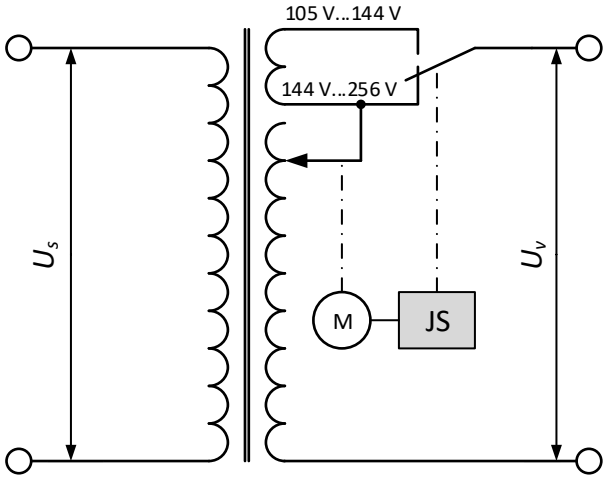
Tabel 2.23. ENSTO pingetasandaja andmed

Parameeter	Seadme tüüp
	VB30K
Nimivõimsus [kVA]	3 x 10
Nimivool [A]	3 x 44
Suurim sisendvool [A]	3 x 52
Faaside arv	3-phase
Reaktsiooniaeg [ms]	300
Tühijooksukaod	< 10W
Kasutegur [%]	> 98%
Kaal [kg]	130
Hind, [€]	7000
Pingetõstmise astmed	20% (U_{in} = 162…198V) 13,3% (U_{in} = 198…209V) 6,7% (U_{in} = 209…222V) möödaviik (U_{in} > 222V)
Korpus	Galvaniseeritud teras, värv RAL7035

2.3.3 Hübriidsed pingestabilisaatorid

Hübriidsetes pingestabilisaatorites on ühendatud kaks eelnevalt kirjeldatud pingereguleerimise põhimõtet, mis tagavad korraga nii sujuvuse kui ka laia reguleerimispiirkonna (Joonis 2.11).

Võrgupingete vahemikus 145 V…265 V toimib sujuv reguleerimine servoajami abil täpsusega ±3 %. Võrgupinge langemisel alla 145 V lülitab juhtimissüsteem sekundaarmähisel relee abil sisse täiendavad keerud, mis laiendab reguleerimispiirkonna 100 V…280 V. Samas väheneb reguleerimistäpsus suurusjärguni ±10 %.



Joonis 2.11. Hübriidse pingestabilisaatori funktsionaalskeem

Objektiivset hinnainfot Euroopa tootjate kohta ei õnnestunud saada. Kolmefaasiliste hübriidsete ning ***Hiina päritolu pingeregulaatorite hinnaklass maailmaturul jääb ilma maksude ja transpordi kuludeta vahemikku 700…1200 €[28] (mudelite nimivõimsus vahemikus 15... 60 kVA). Puuduseks on seda liiki süsteemidel, et täiendavate keerdude sisselülimisel võivad tekkida pingehüpped, mis on kliendi poolt valguse heleduse muutustena ehk flikkerina tuvastatavad.***

2.3.4 Soovitused pingestabilisaatorite kasutamiseks

- ***Eelnevast tekstist järeldub, et elektromehaaniliste pingestabilisatorite eripäraks on liikuvate detailide nagu servoajami ja kontaktide olemasolu.***
    - ***Sagedaste pingekõikumiste puhul tähendab see seadme kiiremat kulumist. Servoajamiga regulaatorite toimekiirus suurusjärgus (20…40) V/s pole piisav alla 500 ms kestvate lohkudega toimetulekuks, mis moodustavad kõigist pingelohkudest põhiosa (Tabel 1.2).***
    - ***Kiiretoimelisuse (mõned millisekundid) ja eluea poolest on soovitatavad staatiliste ehk pooljuhtlülititega astmeliselt reguleeritavad stabilisaatorid (Joonis 2.10), pikemate lohkude puhul võib kaaluda ka elektromagnetilisi pingetõstjaid (ptk 2.2), milles pinge reguleerimine toimub samuti kontaktivabalt.***
- ***Kohtades kus toimuvad aeglased pingemuutused on soovitav kasutada sujuvalt muudetava väljundpingega pingestabilisaatoreid, mis välistavad väljundpingete sh kliendi valgustuse hüppelised muutused.***

[28] http://powerhero.manufacturer.globalsources.com/si/6008846439712/pdtl/Voltage-regulator/1126206379/3-phase-15KVA-Hybrid-Automatic-Voltage-Regulator.htm

- ***Eelistada pingestabilisaatoreid olukordades kus pingekõikumised jäävad vahemikku ±20% nimipingest (U_n). Suuremate pingekõikumiste korral pingestabilisaatori hinnad kasvavad oluliselt. Näiteks üleminek piirkonnalt ±20%U_n piirkonnale ±40%U_n tähendab kahekordset hinnakasvu.***
- ***Sujuvalt muudetava väljundpingega pingestabilisaatorid võivad vajada lisasoojendusahelaid madalamatel temperatuuridel (nt allapoole -15***°C).

2.4 Dünaamilised pingeregulaatorid ehk dünaamilised pingetaastajad

Põhilised seadmed, mida kasutatakse jaotuvõrkudes elektrikvaliteedi parandamiseks on järgmised seadmed: DSTATCOM (*Distribution Static Synchronous Compensator*), AVC (*Active voltage compensator*) ehk DVR (*Dynamic Voltage Restorer*), UPQC (*Unified Power Quality conditioner*) jne. Nendest seadmetest tõhusaim on AVC ja DVR.

DVR puhul kasutatakse laialdaselt nime dünaamiline pingeregulaator või pingetaastaja. Peamiseks põhjuseks viimati nimetatud seadmete kasutamisel on madal hind, väikesed mõõtmed ja kiire reaktsioon häiringutele. Eristatakse energiasalvestita ja –salvestiga seadmeid.

Eelised:

- Võrrelduna DTSTATCOM ja UPS seadmetega on pingetaastajad odavuse tõttu enim soovitatud.
- Pingestabilisaatorid on mõõtudelt väiksemad ja suurema kasuteguriga kui UPS, SMES ja DTSTATCOM
- UPS seadmete käidukulud on suuremad suurema arvu akude tõttu
- Võrrelduna SVC (*Static VAR Compensator*) seadmetega võimaldab reguleerida nii aktiiv- kui ka reaktiivvõimsust
- Erinevalt *STATCOM*ist avaldab *DVR* mõju reeglina tema taha jäävale võrgu osale. Seade reguleerib tarbijale antavat pinget, lisades vajaduse korral täiendavalt kompenseerimiseks sobiva amplituudi, sageduse ja nurgaga pinge komponendi. Kasutusel on *DVR*-seadmeid võimsusega kuni 50 MVA.

2.4.1 Tööpõhimõte

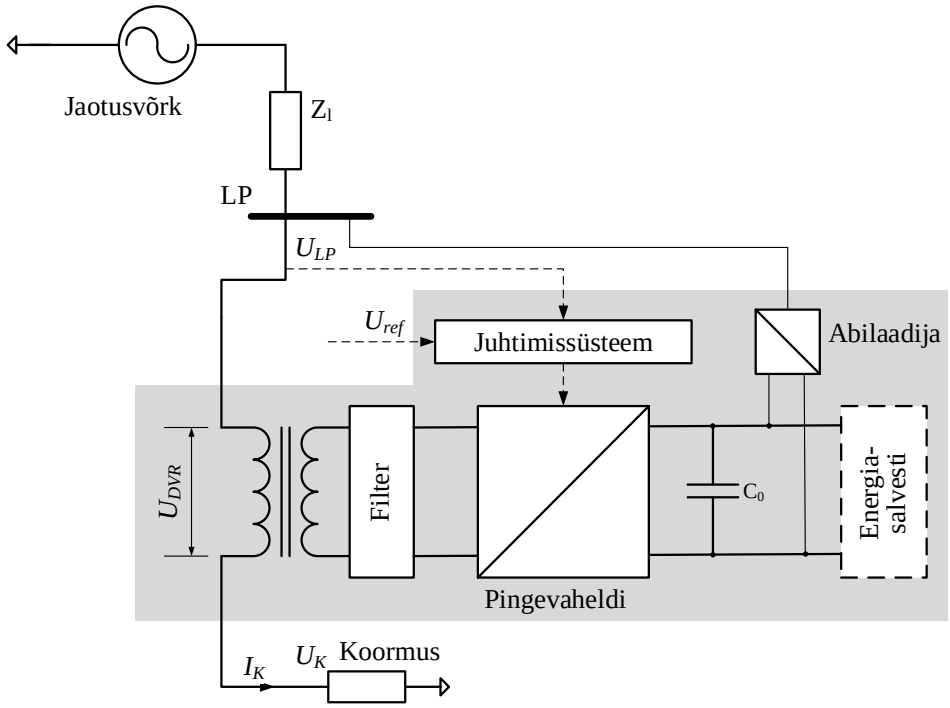
Dünaamiliste pingeregulaatorite (DVR) ajalugu ulatub 1990. aastate algusesse. Nagu nimigi ütleb, suudavad nad, asetatuna toite- ja kriitilise koormusfiidri vahele, kompenseerida pingelohkusid, taastades pinge nimiväärtuse loetud millisekundite vältel ja vältides nii toitekatkestust.

Dünaamiliseks pingeregulaatoriks nimetatakse jõuelektroonika lülitustel põhinevat jadakompensaatorit, mis kaitseb kriitilist tarbijat kõikide võrgupoolsete häirete eest peale täieliku pingekao. DVR suudab reguleerida sõltumatult aktiiv- ja reaktiivvõimsust, seadme põhisõlmeks on jõupooljuhtidel põhinev pingevaheldi, mis liidab sünkroonselt toitefiidri pingetele kolmefaasilise pingesüsteemi. Liidetud pingete amplituud ja faasinurk on reguleeritavad, mistõttu on reguleeritav ka aktiiv- ja reaktiivenergia vahetus seadme ja elektrivõrgu vahel.

Kuna DVR eeldab jada ühenduses trafo sekundarmähisel pinge indutseerimiseks suletud voolukontuuri, ei sobi ta täielike pingekadude kompenseerimiseks liinikatkestuste korral. Seetõttu ei saa teda käsitleda UPSina, kus voolukontuuri moodustab tarbijapaigaldis.

DVR põhikomponentideks on (Joonis 2.12):

1) pingevaheldi;
2) jadaühenduses trafo, mille primaarmähis on ühendatud jadamisi toitepunkti ja koormuse vahele;
3) harmooniliste filter;
4) alalisvooluallikas või energiasalvesti;
5) juhtimis- ja kaitseahelad.



Joonis 2.12. Dünaamilise pingeregulaatori üldistatud skeem

DVR alalisvooluklemmid on ühendatud kas vooluallika või sobiva mahtuvusega energiasalvestiga. Reaktiivenergia vahetus DVR ja võrgu vahel toimub pingevaheldi alalisvoolulülil paikneva elektrolüütkondensaatori C_0 abil, aktiivenergia vahetusel toimib alalisvooluklemmidele ühendatud vooluallikas või energiasalvesti. Abilaadija ülesandeks on laadida alalisvoolulüli kondensaator ja energiasalvesti algpingeni, samuti taastada energiasalvesti energianivoo peale lohu kompenseerimist.

2.4.2 DVR alamkoostud (komponendid)

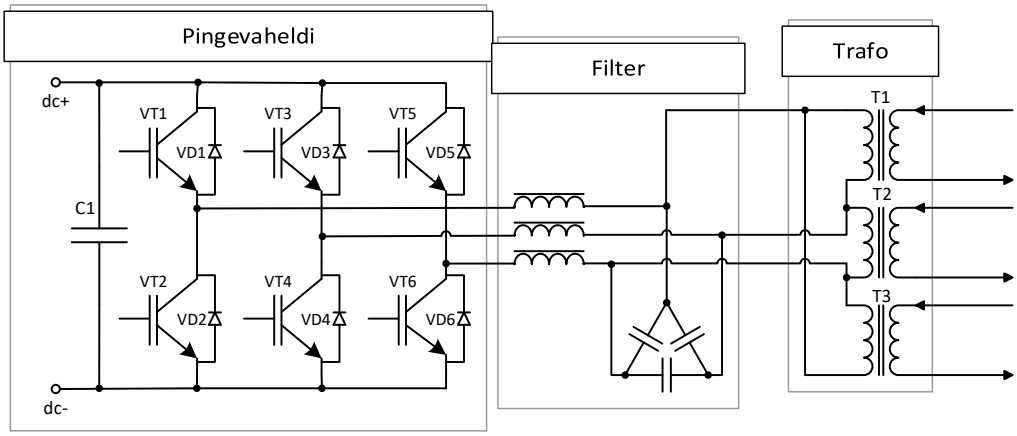
Reeglina kasutatakse dünaamilistes pingeregulaatorites pulsilaiusmoduleeritud (PWM) pingevaheldeid, mis muundavad energiasalvesti alalispinge vahelduvpingeks. Pingevaheldi vahelduvvooluväljundisse ühendatud trafod, mille primaarmähised on jadaahelas toiteallika ja koormuse vahel, lisavad lohu ajal puuduoleva pingekomponendi (Joonis 2.14).

Kuna enamik võrgus aset leidvaid pingelohkusid on ebasümmeetrilist laadi, peab pingevaheldi reguleerima igat faasi eraldi, mis saavutatakse jõupooljuhtlülitite ebasümmeetrilise kommuteerimisega. Lisaks võib pingelohk ühes faasis kaasa tuua pingemuhu teises, seetõttu peab DVR tulema toime nii pingelohkude kui ka –muhkude kompenseerimisega. Muhkude kompenseerimisel töötab pingevaheldi alaldina, suunates energiat trafolt alalisvoolulülile ja tekitades sellega primaarmähisel vajaliku pingelangu.

Madalpääsfilter on vajalik alalisvoolust siinuselise vahelduvvoolu moduleerimisel tekkinud harmooniliste mahasurumiseks. Vähendamaks voolukõvera moonutuste mõju trafole, ühendatakse filter enamasti pingevaheldi ja trafo sekundaarmähiste vahele.

Pinge kompenseerimisel kolmefaasilistes ahelates kasutatakse kas kolmefaasilisi või kolme ühefaasilist trafot, ühefaasiliste ahelate korral piisab ühest ühefaasilisest trafost. Sekundaarmähise tähtühenduse puhul saab kompenseerida nii pinge päri-, vastu- kui ka nulljärgnevuskomponenti, kolmnurkühenduse (Joonis 2.13) puhul ainult päri- ja vastujärgnevuskomponenti. Samas kolmnurkühendus võimaldab madalamat alalisvoolu vahelüli pinget.

Trafode valikul on vaja teada nimivõimsust, primaarmähise nimipinget, ülekandetegurit ja lühispinget. Tänu trafole saab DVR ja energiasalvesti dimensioneerida madalamale pingele, mis enamasti tähendab lihtsamat ehitust ja soodsamat maksumust.



Joonis 2.13. DVR põhisõlmed

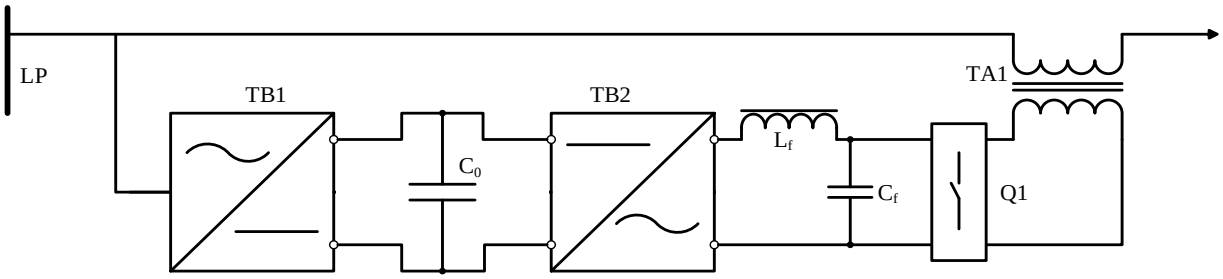
2.4.3 Energiasalvestita DVR

Energiasalvestita skeemi taga on tõsiasi, et lohu vältel kaob pinge ainult osaliselt ja järelejäänud osa on võimalik kasutada lisapinge tekitamiseks jadaühenduses trafol selleks, et hoida koormust nimipingel. Skeemilahenduse puuduseks on, et lohu ajal suureneb toiteliinist tarbitav vool ja koos sellega ka pingelang. Teisalt hoitakse kokku energiasalvestilt ja pikeneb kompenseeritavate lohkude võimalik kestus.

Joonis 2.14 ja Joonis 2.15 kujutavad klassikalisi energiasalvetita pingeregulaatori skeeme, esimesel juhul saab alaldi toite liitumispunkti ja jadühenduses trafo, teisel jadaühenduses trafo ja koormuse vahelt. Alaldi TB1 muundab vahelduv-sisendpinge(d) alalispingeks, mida stabiliseerib vahelüli kondensaator C_0. Vaheldi TB2 moduleerib väljundis vahelduvpinge(d), mida silutakse drosselist L_f ja kondensaatorist C_f koosnevas filtris. Möödaviigulüliti Q1 lühistab jadaühenduses trafo muunduri- ehk sekundaarpoole ülekoormuse või sisemise rikke korral, ühendades koormuse otse liitumispunktile.

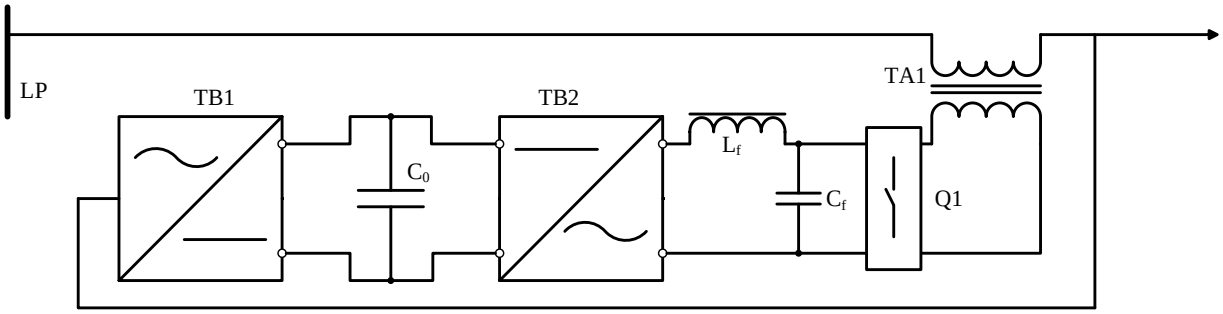
Toitepoolse alaldi puhul (Joonis 2.14) sõltub alalisvoolu vahelüli ja kondensaatori C_0 pinge liitumispunkti pingetest. Alaldi TB1 ja vaheldi TB2 võimsusnäitajad pole võrdsed, kuna vaheldi võimsus on võrdeline

puuduva pingeosaga, aga alaldi maksimumvool ja maksimumpinge ei esine üheaegselt, kuna tema vool kasvab sügavate pingelohkude vältel ja kompenseerimiseks saadaolev pinge pole enam piisav.



Joonis 2.14. Energiasalvestita pingeregulaator toitepoolse alaldiga

Koormuspoolse alaldi puhul (Joonis 2.15) hoiab DVR koos koormuspingega alaldi väljundit, st vahelüli ja kondensaatori C_0 pingeid konstantsetena ja lohkude kompenseerimise võimekus on parem kui eelmisel skeemil. Põhieripäraks on asjaolu, et vaheldi ja jadaühenduses trafo voolud suurenevad pöörvõrdeliselt pingega. Näiteks toitepinge kolmekordsel vähenemisel peavad TB2 ja TA1 voolud kasvama samuti kolm korda.



Joonis 2.15. Energiasalvestita pingeregulaator koormuspoolse alaldiga

Eripärad:

- Kompenseerib 3-faasilisi ja 1-faasilisi pingekõikumisi (tavaliselt kestusega 30s) kuni etteantud nimipingeni
    - Alapingeid ja pingelohke (nt täiskoormusel kuni 90% nimipingest)
    - Ülepingeid ja pingemuhke (nt kuni 110% nimipingest)
- Kompenseerib pingete asümmeetriat
- Summutab flikkerit
- Kompenseerib automaatselt pingelangu
- Võimaldab kiiret reaktsiooni pingelohule (isegi < 1ms) koos täieliku pinge tasandusega poole tsükli jooksul
- Võimaldab andmeid logida ja salvestada ning nimetatud andmete koht- ning kaughaldust.
- Kõrge kasutegur, kuni 99%.
- Väikeste pingemuutuste korral suur täpsus pinge reguleerimisel (alla 1% seadeväärtusest)
- Kannatavad lühiajalist ülekoormust

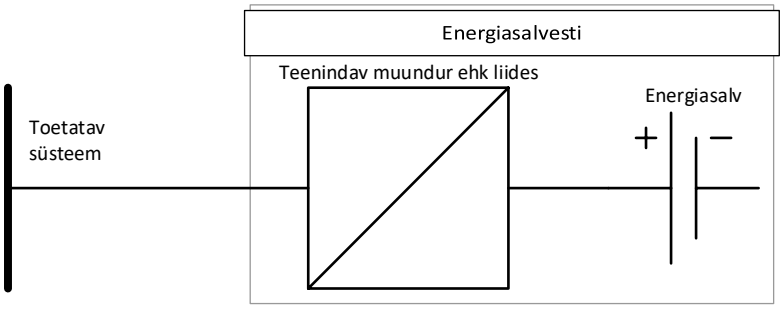
- Võimaldab vähendada hooldus- ja käidukulusid
- Ei oma salvesteid, mistõttu ei vaja laadimisaega ja võimaldab kompenseerida sagedasi järjestikuseid pingekõikumisi

Hooldus- ja käidukulude vähenemine saavutatakse seeläbi, et pingekõikumiste mõju, mis tekitavad elektriseadmete komponentide rikkeid, väheneb oluliselt. Seda on kinnitanud tööstusettevõtete vastavad kogemused. Alapinge reguleerimisel enamasti tuleb arvestada tarbimise kasvuga 1-2%. Ülepinge korral võib rääkida sunnitud tarbimise vähenemisest ja täiendavast rahalisest kokkuhoiust.[29]

Seade on loodud lahendamaks probleeme võimsusteguri, pingelohkude ning harmoonikutega võrgus. Sisestades võrku reaktiivvoolu, et stabiliseerida pinget, suudab ta korrigeerida enimlevinud pinge kvaliteediprobleeme, tehes seda seejuures väga kuluefektiivselt. Seade on võimeline parandama tavalisi pingekvaliteedi probleeme, mis on põhjustatud kiiresti muutuvast koormusest nagu näiteks keevitusaparaatidest, PV süsteemidest või kaarahjudest.

2.4.4 Energiasalvestiga DVR

Energiasalvestiga DVR täiendavaks komponendiks on energiasalv, kus salvestatakse energia mitmesugusel kujul (mehaaniliselt, elektrokeemiliselt, elektrostaatiliselt, magnetiliselt) ja milleks võib olla akupatarei, ülikondensaatorpatarei, hooratas vms, ja teda teenindavast muundurist ehk liidesest, mille ülesandeks on reguleerida energiavooge salve ja toetatava süsteemi vahel (Joonis 2.16). Pingestabilisaatoris aitab ta reguleerida lisatava pinge aktiivkomponenti ehk reaalosa. Kuna pingelohkude kestuseks on standardi määratlusega kuni 1 minut, on energiasalvesti valikul prioriteetne erivõimsus, seetõttu tulevad DVR skeemides kasutatavate elektrienergia salvestitega kõne alla eelkõige ülikondensaatorid ja liitiumakud.

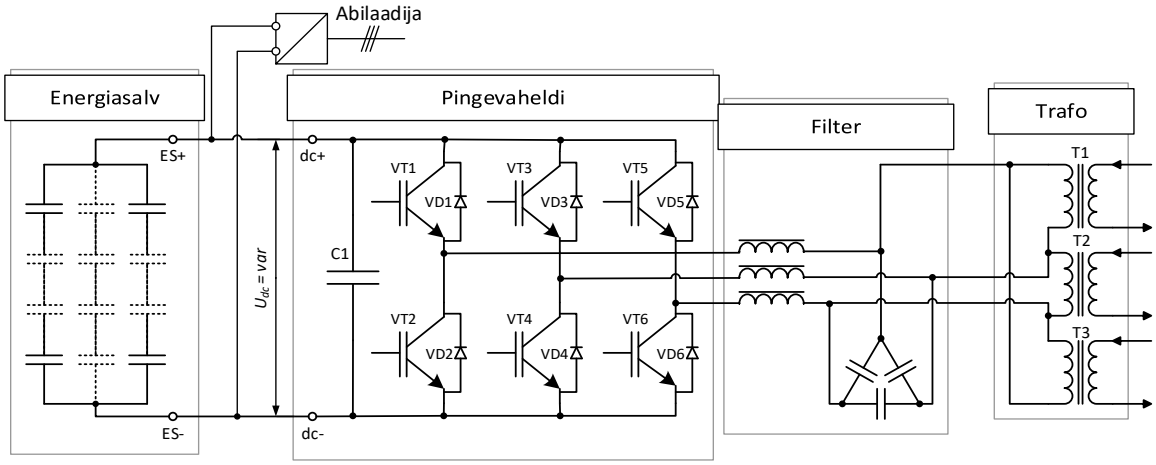


Joonis 2.16 Energiasalve ja –salvesti mõiste selgituseks

2.4.4.1 Muutuva alalisvoolulüli pingega energiasalvesti

Lohu kompenseerimisel hakkab sõltuvalt energiasalve eripärast viimase pinge vähenema, kusjuures vähenemine toimub kiiremini ülikondensaatorite puhul (Joonis 2.17). Koos alalisvoolulüli pingega kahaneb ka vaheldi võime moduleerida puuduolevat pingekomponenti. Kuna abilaadija on väikese võimsusega ning ette nähtud vaid energiasalve alglaadimiseks ja energianivoo taastamiseks peale lohu kompensatsiooni, ei suuda ta sügavate ja pikaajaliste lohkude korral alalisvoolulüli pinget hoida. Pingevaheldi täidab ka ühtlasi energiasalve teenindava muunduri rolli.

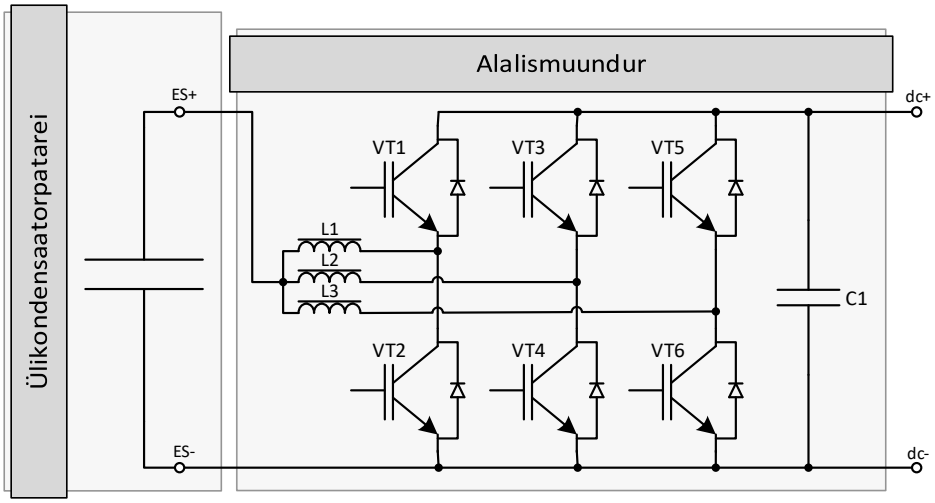
[29] http://www.measurlogic.com/PowerQuality/VoltageSagSupport/avcdetails.html



Joonis 2.17. Muutuva alalisvoolulüli pingega ja energiasalvestiga DVR skeem

2.4.4.2 Konstantse alalisvoolulüli pingega energiasalvesti

Alalisvoolulüli pinge hoidmiseks konstantsena on vajalik täiendav kahesuunaline alalismuundur, mis moduleerib energiavahetust salvega. Energiasalve (nt ülikondensaator- või akupatarei) pinge on madalam alalisvoolulüli pingest, mistõttu saab selle dimensioneerida väiksemana võrreldes muutuva alalisvoolulüli pingega salvestiga, samuti suureneb efektiivne pingevahemik energiavahetusel. Näiteks ülikondensaatorite puhul võetakse praktikas minimaalpinge sageli võrdseks 50 % maksimaalpingega, akude puhul jääb see suhe vahemikku 67 %...72 %. Joonis 2.18 esitab ülikondensaator-energiasalvesti põhimõtteskeemi. Ülikondensaatorpatarei ehk energiasalv on ühendatud DVR alalisvooluklemmidega läbi pinget tõstva ja langetava alalismuunduri, mis tagab pingevaheldi sisendis stabiilse pinge. Viimane on vajalik selleks, et moduleerida vahelduvpinge hetkväärtusi, mille väärtus jadaühenduses trafo sekundaarmähistel peab jääma allapoole sisendalalispinget.



Joonis 2.18. Ülikondensaatorpatarei ühendamine DVR alalisvooluklemmidele

Antud skeemis toodud alalismuunduri skeem ühtib suures osas pingevaheldi omaga, seetõttu kasutatakse mõlema tootmisel ühesuguseid nn täissild-pooljuhtmooduleid. Kolm poolsilda moduleerivad pingeid faasinihkega (põimitud modulatsioon), mille tulemuseks on väiksem pulsatsioon. Ühe suure siludrosseli

asemel kolme väiksema kasutamine tähendab ka väiksemaid kadusid ja võimaldab kasutada samu komponente, mis vaheldi filtrites.

Tabel 2.24 võtab võrdlevalt kokku ülal kirjeldatud pingeregulaatorite omadused. Keerukust ja maksumust arvestamata on eelis energiasalvestiga DVR-idel, mille mõju toitevõrgule on väiksem. Samas on tööstuses hetkeseisuga levinumad just toitepoolse alaldiga pingeregulaatorid, nt ABB toodangust PCS-100 seeriast AVC-20 ja AVC-40. Tuleb märkida, et PCS-100 näol on tegemist filtriga varustatud pingevaheldiga (vt Joonis 2.13), mida saab sobitada erinevatele rakendustele.

Tabel 2.24. DVR skeemilahenduste võrldus [NIE02]

	Energiasalvestita		Energiasalvestiga	
Näitaja	Toitepoolne alaldi (Joonis 2.14)	Koormuspoolne alaldi (Joonis 2.15)	U_{dc} = var (Joonis 2.17)	U_{dc} = const (Joonis 2.18)
Pikad lohud	++	++	-	+
Sügavad lohud	-	+	-	++
Ebasümmeetrilised lohud	--	+	+	++
Energiasalve suurus			+	++
Võrguvoolu stabiilsus	--	-	+	+
Keerukus	+	+	++	-
Maksumus	+	+	-	--

Märkus: „++“ on väga hea; „+“ on hea; „-“ on halb „--“ on väga halb

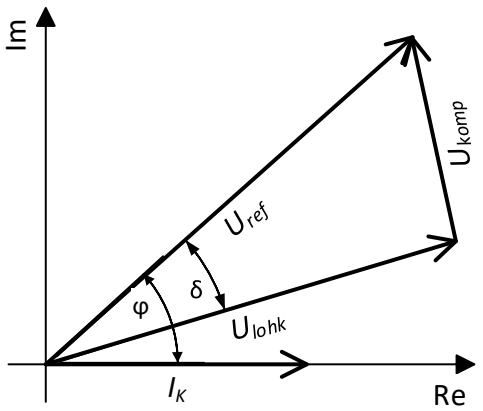
Kuna DVR seadmeid tehakse majanduslikel kaalutlustel peamiselt suurtele võimsustele (tööstusele alates 100 kVA), mistõttu hajapiirkonnas kasutamiseks sobivaid seadmeid ja hindasid ei õnnestunud uuringu käigus leida.

2.4.5 Kompensatsioonimeetodid

Pingelohkude kompenseerimiseks leiavad enamjaolt kasutamist kolm põhimeetodit:

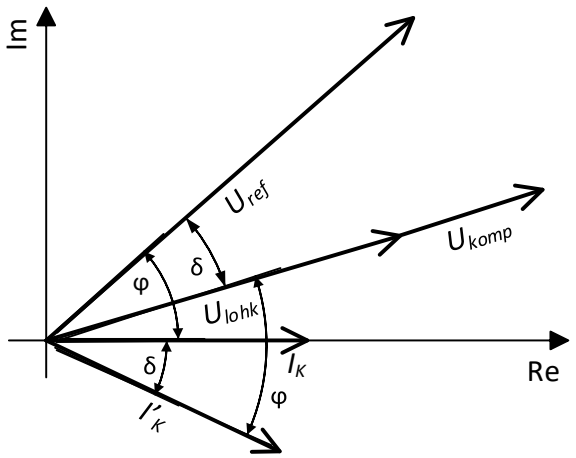
1) lohueelne kompensatsioon;
2) absoluutväärtuse kompensatsioon;
3) optimeeritud kompensatsioon.

Lohueelsel kompensatsioonil (Joonis 2.19) liidab DVR liinile lohuaegse ja lohueelse pinge vahe ehk puudujäägi. Kompenseeritakse nii absoluutväärtust kui ka faasinurka; meetod leiab kasutust eeskätt faasinurga järskude muutuste suhtes tundlike seadmete puhul.



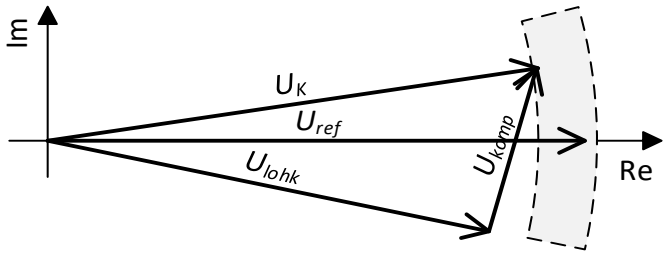
Joonis 2.19. Lohueelne kompensatsioon

Absoluutväärtuse kompensatsioonil (Joonis 2.20) on juurdeliidetud pinge samas faasis toitepingega. Lohueelse ja koormuspinge faasinurgad on erinevad, kuid olulisima toitekvaliteedi kriteeriumina säilib koormuspinge absoluutväärtus. Seega kompenseeritakse ainult pinge absoluutväärtust, meetod on kasutatav koormustel, mis taluvad faasinurga järske muutusi.



Joonis 2.20. Pinge absoluutväärtuse kompensatsioon

Optimaalsel ehk minimaalse energiakuluga kompensatsioonil on eesmärgiks suurendada võrgust võetavat aktiivvõimsust, hoides näivvõimsust konstantsena ja kompenseerida ainult reaktiivvõimsust (Joonis 2.21). Koormuspingel on lubatud kõikuda tolerantsi piirides (hall ala).



Joonis 2.21. Minimaalse energiakuluga ehk optimeeritud kompensatsioon

2.4.6 Ülikondensaatorpatarei energiamahutavuse vajaduse arvutus DVR seadmele

Vajalik energiamahutavus džaulides lohkude kompenseerimiseks kolmefaasilises ahelas

$$E_{lohk} = \frac{(d_{L1}+d_{L2}+d_{L3})\cdot t_L \cdot S_n}{3\cdot\eta}$$

kus d_{L1} … d_{L3} on lohkude sügavused vastavalt faasides L1, L2 ja L3, t_L lohu kestus, S_n nimi-näivvõimsus ja η süsteemi kasutegur.

Puudujääv näivvõimsus

$$S_{lohk} = \frac{(d_{L1}+d_{L2}+d_{L3})\cdot S_n}{3\cdot\eta}$$

Eeldame, et koormus on takistuslik. Sellisel juhul cosϕ = 1 ja $P_{lohk} = S_{lohk}$. Kondensaatorpatarei mahtuvus faradites

$$C = \frac{2\cdot E_{lohk}}{b_C\cdot(U_1^2-U_2^2)}$$

kus U_1 on ülikondensaatorpatarei suurim tööpinge, U_2 ülikondensaatorpatarei vähim tööpinge ja b_C tegur, mis võtab arvesse kondensaatori mahtuvuse vähenemist ekspluatatsiooniaja lõpul.

Kontrollarvutusel leiame tugiaja konstantsel võimsusel, võttes arvesse ka sisetakistust

$$t = \frac{b_C\cdot C}{2\cdot P_{lohk}}(U_{11}^2 - U_2^2) - b_C \cdot b_R \cdot R_i \cdot C \cdot \ln\left(\frac{U_{11}}{U_2}\right)$$

kus R_i on ülikondensaatorpatarei sisetakistus ja b_R tegur, mis võtab arvesse sisetakistuse suurenemist ekspluatatsiooniaja lõpul. U_{11} on pinge ülikondensaatorpatarei klemmidel peale koormuse rakendamist:

$$U_{11} = \frac{U_1}{2}\left(1 + \sqrt{1 - \frac{4\cdot b_R R_i \cdot P_{lohk}}{U_1^2}}\right)$$

2.4.6.1 Arvutusnäide

Olgu tarbija nimi-näivvõimsuseks S_n = 250 kVA. Toidet iseloomustavad aegajalised sümmeetrilised pingelohud $d_{L1} = d_{L2} = d_{L3}$ =40 % kestusega kuni t_L = 5 s. DVR kasutegurina eeldame η = 90 %.

Kompensatsiooniks vajalik energia $E_{lohk} = \frac{(0{,}4+0{,}4+0{,}4)\cdot 5\cdot 250\cdot 10^3}{3\cdot 0{,}9} = 556\cdot 10^3$ J.

Kompenseerimiseks vajalik võimsus $P_{lohk} = \frac{(0{,}4+0{,}4+0{,}4)\cdot 250\cdot 10^3}{3\cdot 0{,}9} = 111\cdot 10^3$ W

Olgu ülikondensaatorpatareid teenindava alalismuunduri (Joonis 2.18) ülemiseks sisendpingeks U_1 = 360 V. Ülikondensaatorite puhul valitakse alumiseks pingeks 50 % ülemisest, seejuures tuleb jälgida, et muunduri sisendvool konstantsel tarbimisvõimsusel ei ületaks lubatut. Seega $U_2 = 0{,}5U_1$ = 180 V.

Kui tootelehel pole kirjas teisiti, siis üldreeglina b_C = 80 % ja b_R = 200 %. Seega vajalik mahtuvus

$$C = \frac{2\cdot 556\cdot 10^3}{0{,}8\cdot(360^2-180^2)} = 14{,}3 \text{ F}$$

Olgu meil kasutada ülikondensaatormoodulid järgmiste tootjaandmetega:

U_n = 125 V;

C_{moodul} = 67 F;

R_{moodul} = 10 mΩ;

b_C = 80 %; b_R = 200 %.

Vajaliku pingenivoo saavutamiseks ühendame kolm moodulit jadasse. Jadaühenduse korral tuleb summaarseks mahtuvuseks

$$C = \frac{C_{moodul}}{3} = 22{,}3\ \mathrm{F}$$

ja sisetakistuseks

$$R_i = 3 \cdot R_{moodul} = 30 \cdot 10^{-3}\ \Omega.$$

Tugiaja kontrollarvutus

$$U_{11} = \frac{360}{2}\left(1 + \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 111 \cdot 10^3}{360^2}}\right) = 354\ \mathrm{V}$$

$$t = \frac{0{,}8 \cdot 22{,}3}{2 \cdot 111 \cdot 10^3}(354^2 - 180^2) - 0{,}8 \cdot 2 \cdot 30 \cdot 10^{-3} \cdot 22{,}3 \cdot \ln\left(\frac{354}{180}\right) = 7{,}42\ \mathrm{s}$$

Järelikult täidab valitud kondensaatorpatarei püstitatud eesmärgi. Tuleb ainult silmas pidada, et suurim kondensaatorpatarei vool, mida muundur peab taluma, on

$$I_{max} = \frac{P_{lohk}}{U_{min}} = \frac{111 \cdot 10^3}{180} = 617\ \mathrm{A}.$$

2.5 Faasikoormusi ühtlustavad seadmed

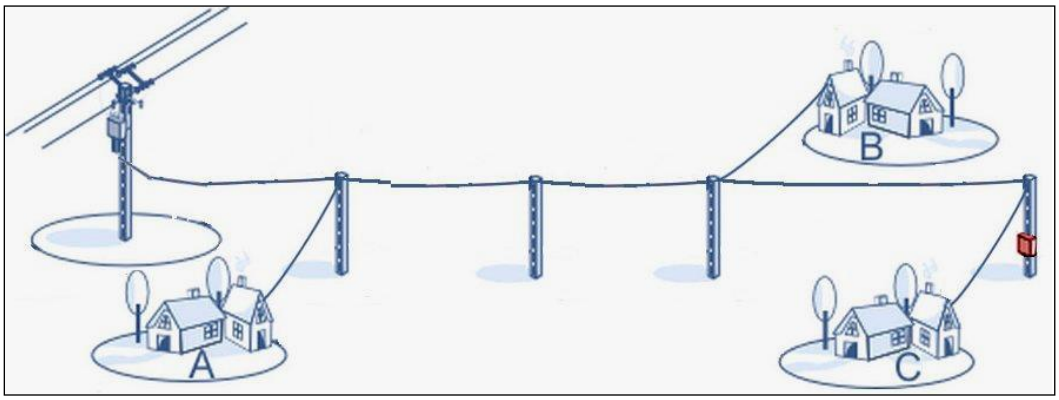
Suurte pingehälvete üheks põhjuseks madalpingevõrkudes on (kodu)tarbijate ühefaasilised või harvemini esinevad kahefaasilised asümmeetrilised koormused kolmefaasilises pingesüsteemis. Teoreetiliselt kõige halvemal juhul, kui kogu tarbija koormus on ainult ühes faasidest, on ühefaasilisest koormusest tingitud pingehälve kuni 6 korda suurem võrreldes selle olukorraga, kui samasuur koormus oleks ühtlaselt jagatud kolme faasi vahel. See tuleneb kahest asjaolust, esiteks - vool faasijuhis on sümmeetrilisel kolmefaasilisel koormusel 3 korda väiksem ja teiseks – tasakaalus faasikoormuste puhul vool neutraaljuhis puudub, kuna 3 voolu, mis on võrdse suurusega, kuid faasis 120^0 võrra nihutatud summeeruvad neutraaljuhis kokku 0-ks. Faasikoormuste, st faasivoolude ja võimsuste ühtlustamine kolmes faasijuhis ehk voolude tasakaalustamine (sümmetreerimine) on üks tuntud võtetest, mis aitab vähendada pingete asümmeetriat ning vähendada ka pingehälbeid, mida põhjustavad ühefaasilised või ka kahefaasilised tarvitid ja

elektriseadmed klientide paigaldistes. Samuti vähenevad sümmeetrilisel koormusel võimsuskaod MP liinides ja KP/MP trafodes.

Faasivoolude ühtlustamine sellise võttega toimub nn sikk-sakk lülituses võrgutrafo või lisatrafo(de) abil. Sikk-sakk lülituses mähised võivad paikneda kas trafo kahel sambal või koguni kolmel sambal. Antud juhul vaadeldakse just iseseisva(te) trafo(de) kasutamist, kuna sel juhul saab tasakaalustada koormusi nii liinis kui ka trafos.

Järgnevalt on kirjeldatud juba kasutuselolevat faasivoolude tasakaalustusseadet, mis on eraldiseisev seade kilbis ja ei nõua seega MP võrgus suuremaid ümberehitusi või võrgu rekonstrueerimist. Selline lisatrafodest koosnev seade võib olla ühtse magnetahelaga, või ka eraldi kolme magnetahelaga. Antud juhul kasutatakse madalate kadudega kolme toroidsüdamikku, kus igal südamikul on kaks mähist. Mähised ühendatakse liinijuhtide ja neutraalijuhi vahele.

Seade võib olla paigaldatud näiteks liini lõpumastile, nagu näidatud all oleval joonisel (Joonis 2.22).

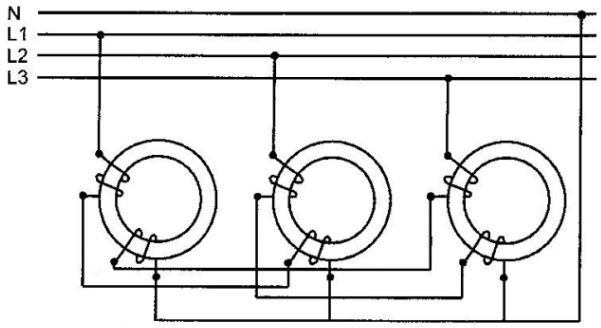


Joonis 2.22. Näide - faasikoormuste tasakaalustusseadme paigaldamine pika liini lõppu, pingekvaliteet paraneb tarbijatel B ja C

Antud tasakaalustusseade ühendatakse MP võrku paralleellülituses. Ühte punkti või sõlme võib ühendada ka kaks seadet paralleelselt, samuti võib seadmeid ühendada võrgu erinevatesse punktidesse. Faasikoormuste tasakaalustusseadme paigaldamine fiidritele (näiteks fiidri lõpumastile või tarbija liitumispunkti) võib olla põhjendatud, kui on tegemist pika liiniga, pikkusega üle 700 m ja toiteahela ehk toitesilmuse (faas-netraal-trafo) takistusega üle 0,7 Ω. Lisaks peavad liini lõpus olema tarbijad (kas üks või mitu), kelle poolt tarbitav või genereeritav vool ühes faasidest on aeg-ajalt piisavalt suur neutraalinihke tekitamiseks (liinivool ühes faasidest vähemalt 30 A).

Tasakaalustusseadme trafomähiste ühendusskeem on näidatud järgneval joonisel, vt Joonis 2.23.

Tabel 2.25 on esitatud näidetena faasipinged ja voolud erinevates asümmeetrilistes koormus-olukordades. Tabelist selgub, et kui ilma tasakaalustusseadmeta on faaspinged väljapool lubatud vahemikku, siis koos seadmega jäävad pinged lubatud vahemiku sisse ka äärmuslikes koormusolukordades. Samuti vähenevad võimsuskaod liinides.



Joonis 2.23. Faasikoormuste tasakaalustusseadme trafode ühendusskeem

Tabel 2.25. Faasipingete ja –voolude võrdlus ilma tasakaalustusseadmeta ja koos seadmega erinevates talitlustes (kollase taustaga on näidatud probleemsed pingeolukorrad)

Koormus ja jaotus faasides	**Faasipinged (V) ilma tasakaalustusseadmeta**				**Faasipinged (V) koos tasakaalustusseadmega**			
	L1	L2	L3	Võimsus-kaod liinis ΔP (W)	L1	L2	L3	Võimsus-kaod liinis ΔP (W)
Koormus ühes faasis L1 – 50A	190	249	249	1750	218	234	234	608
Koormus kahes faasis L1 ja L2 – kummaski 50A	204	204	260	2625	217	217	233	993
Genereerimine ühes faasis L1 – 5,5kW	255	230	230	339	242	235	235	118
	Faasivoolud I(A) ilma tasakaalustusseadmeta			**Neutraal-vool I(A)**	**Faasivoolud I(A) koos tasakaalustusseadmega**			**Neutraal-vool I(A)**
	L1	L2	L3	N	L1	L2	L3	N
Koormus ühes faasis L1 – 50A	50	0	0	50	36	14	14	7
Koormus kahes faasis L1 ja L2 – kummaski 50A	50	50	0	50	36	36	14	7
Genereerimine ühes faasis L1 – 5,5kW	22	0	0	22	16	6	6	3

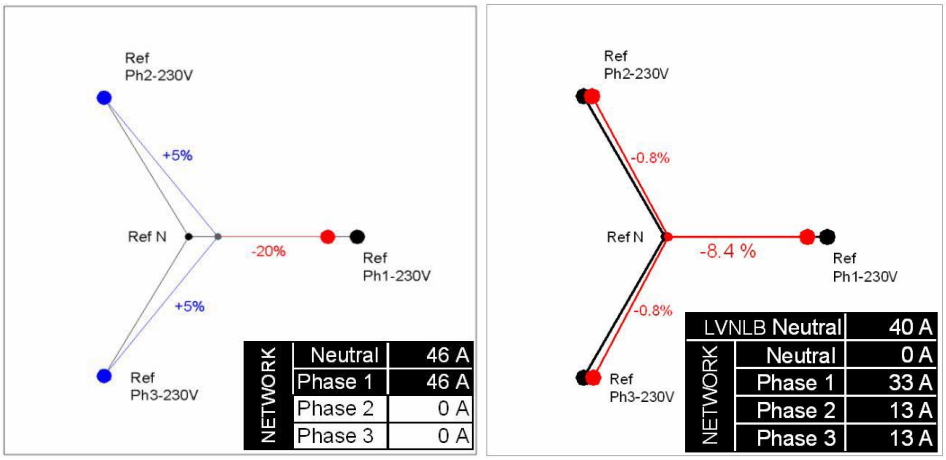
***Märkused.** Arvutuste aluseks on liin pikkusega 750 m ristlõikega AL 4 x 70 mm^2, iga liinijuhtme takistus on 0,35 Ω ja tühijooksupinge trafo klemmidel 235V.

Neutraalinihet iseloomustavad hästi vektordiagrammid. Joonis 2.24 on näidatud ühefaasilisest koormusest tingitud neutraalinihe, kus koormatud faasis langeb pinge 20% võrra ning teistes faasides tõuseb 5% võrra. Kasutades koormuste tasakaalustusseadet väheneb pingelang koormatud faasis 8,4%-ni. Teistes faasides on pingemuutus väga väike, ca 0,8%.

Soovituslikud fiidri parameetrid tasakaalustusseadme kasutamiseks on järgmised.

Fiidri moodustab üks pikk vähese hargnemisega liin – tüviliini pikkus vähemalt 800 m (1000 m) või enam, liini lõpus 2 kuni 4 aktiivset klienti/liitumispunkti. Kliendid (tarbijad) on täheldanud pingeprobleeme, näiteks vilguvad lambid mingi seadme sisselülitamisel või ka juhuslikul hetkel, mõni seade lülitub ootamatult välja vms.

Liini takistuse ligikaudne hinnang on järgmine: takistus 1 Ω vastab ligikaudu 1000 m pikkusele liinile ristlõikega 4x70AL.



Joonis 2.24. Neutraalinihe ühefaasilise koormuse korral ning selle kompenseerimine tasakaalustusseadme abil.

2.5.1 Tasakaalustusseadme kasutamine praktikas ja senised saadud kogemused

Tasakaalustusseadet on kasutatud 0,4kV madalpingevõrkudes järgmistel tingimustel. Liini lõppu on ühendatud üks või mitu ühe- või kolmefaasilist tarbijat (klienti). Ühefaasilise ühendusega tarbijate summaarne võimsus võib olla kuni 50 kW. Selline lahendus ühtlustab faasivoolud fiidri liinijuhtides ning vähendab ka aktiivvõimsuskadusid liinis. Lisaks paraneb pinge kvaliteet, vähenevad pingekõikumised ning väheneb ka harmooniliste tase pinges, kuna praktiliselt elimineeritakse liinist 3-ga kordsed harmoonilised voolud I_3 , I_9 , I_{15} , I_{21} jne. See on oluline, kuna kodutarbijate paigaldistes on tavaliselt ülekaalukas osa just ühefaasiliste seadmete osa, mis tarbivad 3-ga kordseid harmoonilisi voolusid (kuna kasutatakse ühefaasilisi alaldeid).

Lahendus on kasutusel näiteks Prantsusmaa 0,4 kV võrkudes selleks, et mitte rekonstrueerida heas seisukorras olevaid MP liine olukorras, kus voolukoormus ühes faasidest on piirväärtuse lähedal või veidi ületab seda, aga teistes faasides on väiksem. Lahendust on kasutatud nüüdseks juba ca 10 aastat ja selle tulemustest tehtud ka kokkuvõte on esitatud artiklis [FRI15]

2.5.1.1 Järeldused kasutamiskogemustest.

Artiklis on analüüsitud pingeolukorda ja tasakaalustusseadme mõju 60-s MP võrgupiirkonnas Prantsusmaal. Liini (toitesilmuse) keskmine takistus oli 0,9 Ω, miinimum oli 0,4 Ω ja maksimum 1,9 Ω. Liini keskmine pikkus uuritud võrkudes oli 800 m, liiniks oli õhukaabel 4x70AL.

Pingeprobleem lahenes peale tasakaalustusseadme paigaldamist 95%-l juhtudest. Tasakaalustusseadme keskmine maksumus koos paigaldusega oli viidatud uuringus 4500 €.

Täiendav positiivne efekt ehk eelis – 3-nda harmoonilise voolu ja 3-ga kordsete harmooniliste voolude elimineerimine või vähenemine liinis, sh eriti neutraalijuhis ja KP/MP trafo sekundaarmähises. See on hajaasustuses oluline, kuna 3-ga kordsete harmooniliste voolude allikad on just ühefaasilised alaldit või muundurit sisaldavad seadmed, millised enamasti on kodutarbijate kasutuses.

Joonis 2.25. Näide faasivoolude tasakaalustusseadmest nimivooluga 45 A, siin näitena seade EQUI8.

Joonis 2.26. Näiteid paigaldatud tasakaalustusseadmetest.

2.5.1.2 Seadme orienteeruv hind ja paigaldamiskulud.

Seadme hinnad (seisuga 06.2016, tootja - CME Transformateurs, maksetingimused - exw) on järgmised.

Ühe seadme hind - 2650 eurot. Viis ja enam seadet - 2550 eurot/tk. Üheksa ja enam seadet - 2400 eurot/tk

Juhul kui trafod arvutada ja koostada piisava võimsusvaruga ning isolatsioonivaruga, siis võiks veelgi lihtsustada seadet jättes ära shunteeriva kontaktoriahela ja termokontrolli. Seega jääks kilpi ainult toroidtrafod ja sularid.

2.5.1.3 Seadme võimsuskaod.

Tühijooksul on võimsuskaod ca 20 W, koormusega olekus vahemikus 20…200 W. Seadme kasutegur täiskoormusel on 97,7%.

Liigse kuumenemise vältimiseks on seadmele mõnel juhul lisatud sundventilatsioon ja termorelee, kuid Eesti oludes on ilmselt võimalik hakkama saada ka loomuliku ventilatsiooniga, juhul kui seda on kilbi konstruktsioonis ja jahutustingimustes arvestatud.

Lubatud töötemperatuuri vahemik on -40 kuni +70^{0}C.

2.5.1.4 Seadme hooldustegevused

Soovitatavalt on vajalik seadme visuaalne ülevaatus ca 1 kord aastas, sh sularite olukorra kontroll, kohtkuumenemiste tuvastamine.

2.6 Muud seadmed ja lahendused

2.6.1 Staatilised sünkroonkompensaatorid

Staatiline sünkroonkompensaator (STATCOM) on pulsilaiusmoduleeritud pingevaheldi, mis tekitab kolmefaasilise muutuva amplituudiga ja faasivooludega 90° nihkes oleva pingesüsteemi. Tavapärane STATCOM võib olla nii reaktiivenergia tootjaks (mahtuvuslik koormus) kui ka tarbijaks (induktiivne koormus), tüüpilisteks kasutusaladeks võrkudes on pingelohkude, -väreluste, -ebasümmeetriate ja -harmooniliste kompenseerimine.

2.6.1.1 Tööpõhimõte

Sarnaselt dünaamilisele pingeregulaatorile on STATCOM põhisõlmeks jõupooljuhtidel põhinev pingevaheldi. Erinevalt DVR-ist on STATCOM ühendatud koormusega rööbiti, st kui DVR toimib reguleeritava pingeallikana, siis STATCOM reguleeritava vooluallikana. Kuna pinge reguleerimine, mis on STATCOMI vaikeülesanne, toimub ainult reaktiivenergia vahetusega, piisab energiasalvestiks alalisvoolulülile ühendatud silukondensaatoritest. Vastupidiselt DVR-ile, mis stabiliseerib pinget koormusel, võib STATCOMi paigaldada tsentraliseerituna, st näiteks panna stabiliseerima pinget juba liitumispunktis.

Vooluallikana toimiv STATCOM lisab liitumispunktist tarbitavale voolule I_{LP} kompenseeriva reaktiivkomponendi I_{komp}, millest vastavalt Kirchhofi I seadusele kujuneb vajalik koormusvool I_K (Joonis 2.27). Energiavoogude juhtimine toimub:

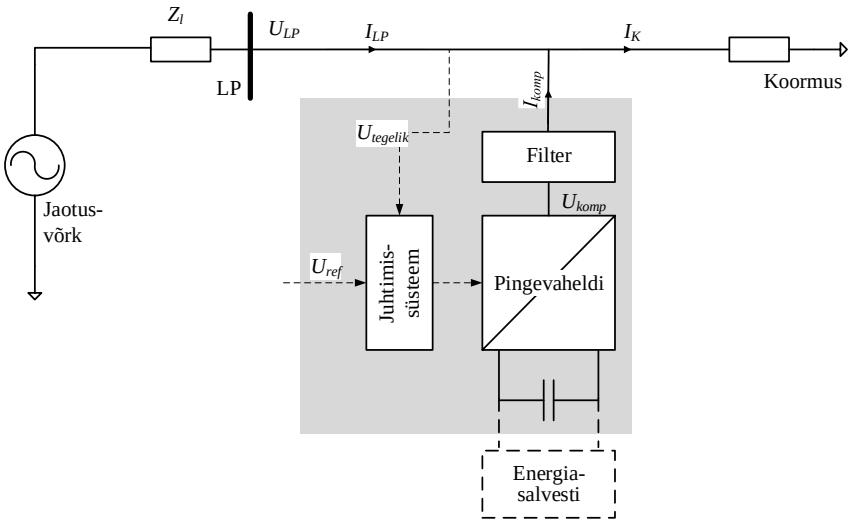
1) pinge stabiliseerimisega liini otstes, kuna nõrgas võrgus võib pinge kõikuda ja nt avariijärgses talitluses langeda kriitilise väärtuseni;
2) pingetevahelise faasinihke muutmisega liini otstes;
3) liini summaarse reaktiivtakistuse muutmisega.

Täiendava energiasalvesti lisamisel nimetatakse kõne all olevat seadet energiat salvestavaks staatiliseks sünkroonkompensaatoriks ehk E-STATCOM -iks. Taoline seade on lisaks reaktiivenergiale võimeline vahetama võrguga ka aktiivenergiat, mis on oluline just olukordades, kus elektrienergia kvaliteedi probleemid on seotud kõikuva aktiivvõimsusega, näiteks nõrkades võrkudes.

Enamasti lubab STATCOMi kasutamine:

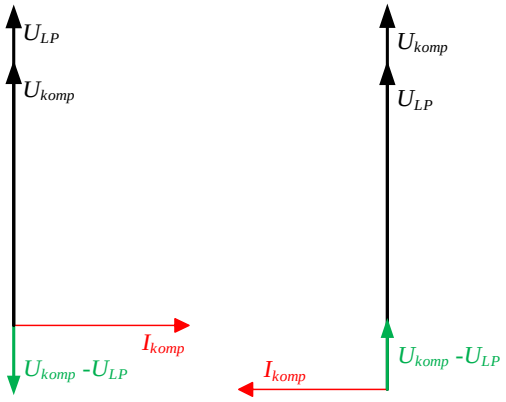
1) loobuda täiendavate astmelise või türistorreguleerimisega kondensaatorseadmete paigaldamisest;
2) parandada elektrienergia kvaliteeti ja vähendada pingehüppeid siirdeprotsessidel;

3) tänu kontaktivabale lülitusele vähendada mõjusid vahelduvvooluvõrgule;
4) vähendada reaktiivenergia kompensatsiooniseadmete vajalikku paigalduspinda.



Joonis 2.27. Staatilise sünkroonkompensaatori (STATCOM) põhimõtteskeem

Joonis 2.28 kujutab STATCOMi pingete ja voolude vektordiagramme. Reaktiivenergia tarbimiseks peab pinge pingevaheldi vahelduvvooluklemmidel olema väiksem pingest liitumispunktis U_{LP}, sellisel juhul jääb vool pingest maha 90° võrra (induktiivne koormus). Reaktiivenergia tootmiseks reguleeritakse pingevaheldi vahelduvvooluväljund kõrgemaks tarbija latipingest, mille tulemusena hakkab vool pinget ennetama (mahtuvuslik koormus).



Joonis 2.28. STATCOMi pingete ja voolude vektordiagrammid reaktiivenergia tarbimisel (vasakul) ja tootmisel (paremal)

STATCOM- ja *DVR*-seadmete kombineerimisel on tulemuseks seade, mida kutsutakse ühitatud võimsusvoogude regulaatoriks (*unified power flow controller, UPFC*). Sisuliselt on selle seadmega võimalik reguleerida mitmesuguseid elektrivõrgu talitlusparameetreid, olgu siis eesmärgiks elektri kvaliteedi probleemide lahendamine jaotusvõrgus või süsteemi stabiilsuse tõstmine põhivõrgus. Seadme puuduseks on kõrge hind, mistõttu madalpingeliste seadmete tootmine ja kasutamine jaotusvõrgus ei ole levinud.

2.6.2 DVR ja STATCOM toimekiirusest

Topeltmuundamisega UPS seadmetes, kus pingeväljund moduleeritakse alalisvoolu vahelüli pingest, on reaktsiooniaeg tühine, kuna akusüsteem koos vahelüli kondensaatoritega tagab piisava elektrilise inertsi, samuti on ka tarbija võrgust galvaaniliselt lahutatud. Seega vaheldi juhtimissüsteem peab toime tulema aeglaste vahelüli pinge muutustega.

DVR ja STATCOM seadmed pole ühendatud liitumispunkti ja tarbijapaigaldise vahele mitte kaskaadselt, vaid vastavalt järjestikku või rööbiti. Seetõttu peab juhtimissüsteem kõigepealt tuvastama kõrvalekalded ja seejärel moodustama regulaatoris vastavad juhttoimed, seejuures kaasaegsed juhtimissüsteemid reageerivad lohkudele 1 ms jooksul.

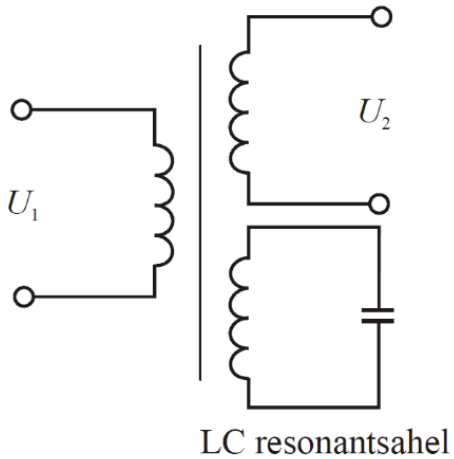
Kompenseerimise esimeses etapis võetakse vajaminev energia vahelüli kondensaatoritelt. Kuna tegemist on väikese mahtuvusega elektrolüütkondensaatorite koostuga (kogumahtuvus suurusjärgus 1 mF), siis on väike ka nende ajakonstant RC ja nad on võimelised kiirelt, 2…3 vahelduvpinge perioodi vältel energiat loovutama. Ajavahemik on piisav täiendavate energiasalvestite rakendumiseks (nt ülikondensaatorid ja akupatareid).

RC ajakonstant on ka suurus, mis ülikondensaatorite puhul iseloomustab nende energiavahetuse võimalikku kiirust. Varasemas näites (2.4.6.1) toodud väärtuste C_{moodul} = 67 F, R_{moodul} = 10 mΩ juures kujuneks ajakonstandiks 0,67 s, seejuures jada- ja rööpühenduste seaduspärasuste tõttu mahtuvuste ja takistuste muutumised kompenseerivad teineteist. Seega ülikondensaatoritel põhinevat kompensaatorit pole mõistlik dimensioneerida ajakonstandist lühematele lohkudele, kuna nad ei suudaks tagastada kogu salvestunud energiat ja oleksid antud rakendusele üledimensioneeritud.

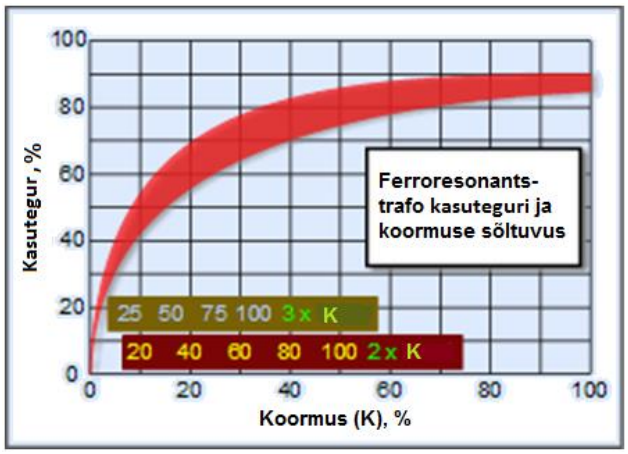
2.6.3 Ferroresonantstrafod

Ferroresonantstrafod on pinge kvaliteeti tõstvad seadmed, mis suudavad toime tulla enamiku pingelohkude tüüpidega. Tegemist on trafoga, mille ülekandesuhe on 1:1 ning mis talitleb südamiku püsiva küllastumise juures. Seetõttu ei avalda primaarpinge muutused mõju südamiku magnetvoo tihedusele ning trafo sekundaarmähise väljundpinge on peaaegu konstantne olenemata primaarmähise sisendpinge muutustest. Südamiku küllastumine põhjustab siinuspinge moonutusi, tekitades harmoonikuid. Harmoonikute väljafiltreerimiseks on trafol lisasekundaarmähis (Joonis 2.29), millega ühendatud kondensaator moodustab resonantsahela. See ahel filtreerib ka sekundaarmähisega ühendatud mittelineaarsete koormuste põhjustatud harmoonikuid. Lisaks salvestab filter energiat, mis aitab säilitada püsivat väljundpinget sisendpinge lühikeste katkestuste korral.

Ferroresonantstrafode eelised tulenevad tema ehitusest, mis tagab hea isolatsiooni liigpingetest ja transientidest. Seadmed on väga vastupidavad ja nende tootjad annavad isegi kuni 10 aastapikkuse garantii. Ferroresonantstrafode eeliseks on lihtsus jõuelektroonikaseadmetega võrreldes. Ferroresonantstrafod taluvad hästi ülekoormust ja transientliigpingeid, kuid nende kaod ja reaktiivvõimsuse tarve on suured. Tänu ebatavalisele talitlusviisile suudab trafo piirata koormusvoolu. Kui koormusvool ületab nimikoormust 150%, siis langeb väljundpinge väga madalale, mis takistab voolu kasvamist. Sama magnetismiga seotud printsiip, mis tagab pinge reguleerimise, on ka seadme puuduseks. Nende seadmete kasutegur on täiskoormusel kuni 92%, kuid väikestel koormustel langeb oluliselt.



Joonis 2.29. Ferroresonantstrafo põhimõtteskeem



Joonis 2.30. Ferroresonantstrafo tõhususe ja koormuse vaheline seos[30]

Joonis 2.30 kirjeldab hästi seadme tõhususe sõltuvust koormusest. Vastavalt sellele 50% koormuse juures on seadme tõhusus vahemikus 75...85%. Samas tavalise trafo tõhusus on sama koormuse juures 90% ja enam. Trafod sobivad enam püsikoormuste korral. Muutuvad koormused, eriti aga suured käivitusvoolud, pole soovitavad. Kohtades kus esineb 2-3 kordne ülekoormus ja kasutatakse sedalaadi trafosid, väheneb trafode üledimensioonimise vajaduse tõttu ka oluliselt nende tõhusus. Juuresolev joonis ilmestab hästi, mis juhtub kui trafo on 2-3 korda üledimensioonitud: 3 kordse üledimensioonimise korral 75% koormuse korral jääb trafo tõhusus vahemikku 60...75% ning 50% koormuse korral jääb tõhusus 50..65% vahele. Võrreldes elektrooniliste pingeregulaatoritega, mille tõhusus võib ulatuda kuni 99%, on ferroresonantstrafode tõhusus keskmiselt vahemikus 75...80% (sageli ka 50% juures).

2.7 Majandusliku otstarbekuse hindamine

Majandusliku otstarbekuse hindamisel on kaks aspekti. Mõju lõpptarbija ja mõju võrguettevõtte kuludele Lõpptarbija seisukohalt on pingelohud ja –katkestused Euroopa Liidus kõige levinumaid lõpptarbija seadmete rikete põhjuseid, mis toob aastas ainuüksi ärisektoris kaasa kulutusi kuni 86 miljardi euro ulatuses (kokku 150 miljardi euro ulatuses) [TAR07, CHA10]. Edasise majandusliku otstarbekuse hindamisel pole arvestatud kaudsete kulude vähenemist lõpptarbijale, mida võiks tulevastes uuringutes vaadelda ja mis oleks täiendav ja mitte vähemtähtis eesmärk pingeprobleemide lahendamisel.

Järgnev majandusliku otstarbekuse võrdlus on koostatud kolmele Elektrilevi OÜ poolt kirjeldatud variandile (Tabel 2.26) ja lähtutud on ettevõtte poolt esitatud andmetest. Võrdluse koostamisel ei ole arvestatud pingeprobleemist tulenevat võrgutasu alandamist, tööjõukulude perspektiivset kasvu, inflatsiooni jms majanduslike näitajaga. Majandusliku otstarbekuse hindamisel võrreldakse järgmiste lahenduste kulusid.

1. Variant 1 – Keskpinge (KP) isoleerjuhtmega õhuliin samas trassis koos trassi laienduse, uuete mastide ja mastalajaamaga, mille eeldatav eluiga on 40 aastat.

[30] http://www.ustpower.com/comparing-automatic-voltage-regulation-technologies/avr-guide-ferroresonant-transformer-type-voltage-regulator/avr-guide-ferroresonant-transformer-advantages-disadvantages/

2. Variant 2 – Madalpinge (MP) paljasjuhtmeline liin, mille eeldatav eluiga on 20 aastat
3. Variant 3 – MP rippkeerdkaabliga liin koos mastide ja juhtmete vahetusega, mille eeldatav eluiga on 35 aastat.

Majandusliku otstarbekuse hindamise käigus taandati kirjeldatud variantide kulud aasta peale (Tabel 2.26), mille alusel arvutati nelja ajaperioodi kohta (10, 20, 30 ja 40 aastat) liini eri pikkustele (100...4000m) kogukulud (Tabel 2.27).

Kogukulude tabeli (Tabel 2.27) alusel saab teha allolevad järeldused

1. **MP rippkeerdkaabliga liini kulud on kõige madalamad**
2. **1500 meetri peal muutuvad MP paljasjuhtmeline ja KP isoleerjuhtmega õhuliini kulud võrdseks. MP paljasjuhtme amortiseerumisel või pingeprobleemi avaldumisel**
    a. **üle 1500 m liinis, mis asub arenevas piirkonnas (koormused kasvavad), on mõistlik üle minna KP isoleerjuhtmega liinile.**
    b. **kuni 1500 m liinis, mis asub stabiilses piirkonnas (nt viimase 10 aasta jooksul koormused on stabiilsed), on mõistlik üle minna MP rippkeerdkaabliga liinile.**
3. **Väga pika distantsi (nt 4 km) ja eluea (nt 40 a) korral on soovitav kaaluda amortiseerunud võrgu asendamist saartalitluses lahendusega. Saartalitluses lahenduse hind koos käidukulud peavad olema oluliselt madalamad vaadeldava distantsi korral konkreetse võrgu eluea kuludest**

Saartalitluse korral näiteks alajaamast 4 kilomeetri kaugusel töötava lahenduse kogukulu (sh investeering ja käit jms) ei tohiks 40 aastase eluea korra ületada keskpingeliini rajamise ja käidu kogukulu 132767€. MP rippkeerdkaabliga liini korra ei tohiks vaadeldaval perioodil eelmainitud kulud ületada 126400€.

Kogukulude vahede tabelist (Tabel 2.28) saab distantsi ja eluea alusel teha allolevad järeldused:.

1. **MP rippkeerdkaabliga liini kogukulud on kõige madalamad, mistõttu pingeprobleemi avaldumisel**
    a. **liini korral vahemikus 500...2000 m, mis asub mistahes piirkonnas (koormused kasvavad, kahanevad või on stabiilsed), tuleks kaaluda pingetasandaja kasutamist, mille kogukulud ei ületa keskpingeliini ja MP rippkeerdkaabli kogukulude vahet vaadeldaval perioodil**
    b. **Üle 2000 m liini korral, mis asub stabiilses või arenevas piirkonnas (koormused kasvavad), tuleks kaaluda üleminekut keskpingeliinile**
2. **MP paljasjuhtmelises liinis pingeprobleemi avaldumisel tuleks**
    a. **Taandarenevas piirkonnas (koormused vähenevad) kaaluda mistahes distantsi korral pingetasandaja kasutamist**
    b. **Stabiilses või arenevas piirkonnas (koormused kasvavad), kaaluda**
        i. **Kuni 1500 m liini korral selle asendamist MP rippkeerdkaabliga liiniga**
        ii. **Üle 1500 m liini korral selle asendamist keskpinge isoleerjuhtmega liiniga**

Ühe näidisena on tabelist tuletatav, et

1. Variantide 1 ja 2 võrdlemisel 40 aasta perspektiivis ja 1 km pikkuse liini korral on madalpinge paljasjuhtmelise liini asendamine keskpinge isoleerjuhtmega õhuliiniga tasuv kui investeering pingetasandusseadmesse ületab 3067 eurot.
2. Variantide 1 ja 3 võrdlemisel 40 aasta perspektiivis ja 1 km pikkuse liini korral on madalpinge rippkeerdkaabliga liini asendamine keskpinge isoleerjuhtmega õhuliiniga tasuv kui investeering pingetasandusseadmesse ületab 8952 eurot.
3. Variantide 2 ja 3 võrdlemisel 40 aasta perspektiivis ja 1 km pikkuse liini korral on madalpinge paljasjuhtmelise liini asendamine madalpinge rippkeerdkaabliga liiniga tasuv mistahes distantsi korral. Seega madalpinge paljasjuhtmelise liini korral ei tasu investeerida pingetasandusseadmesse.

Tabel 2.26. Variantide kulud taandatuna keskmisele aasta kulule

Variant 1	Ühik	Kulu aastas
Investeeringu püsiosa	€	[redacted]
Mastalajaam	€	[redacted]
Trafo 30 kVA	€	[redacted]
MP MS ja arvesti	€	[redacted]
Projekteerimine, sh maakasutusõigus	€	[redacted]
Teostusjoonis, audit	€	[redacted]
Investeeringu muutuvosa	€/m	[redacted]
KP isoleerjuhe 62 mm², 3 f	€/m	[redacted]
Mast, sh traavers	€/m	[redacted]
Trassilaiendus	€/m	[redacted]
MP demontaaž	€/m	[redacted]
Korrashoid	**€/m**	[redacted]
Trassihooldus	€/m	[redacted]
Rikke likvideerimine	€/m	[redacted]
Ülevaatus, sh tormijärgne	€/m	[redacted]
Audit	€/m	[redacted]

Variant 2	Ühik	Kulu aastas
Investeeringu püsiosa	€	[redacted]
Projekti-juhtimine	€	[redacted]
Investeeringu muutuvosa	€/m	[redacted]
Mastide vahetus	€/m	[redacted]
Juhtmete korrastamine	€/m	[redacted]
Korrashoid	**€/m**	[redacted]
Trassihooldus	€/m	[redacted]
Rikke likvideerimine	€/m	[redacted]
Ülevaatus	€/m	[redacted]
Masti vahetus, defekt	€/m	[redacted]
Audit	€/m	[redacted]

Variant 3	Ühik	Kulu aastas
Investeeringu püsiosa	€	[redacted]
Remondiprojekt	€	[redacted]
Töö vastuvõtmine, mõõtmine, audit	€	[redacted]
Investeeringu muutuvosa	€/m	[redacted]
Mastide vahetus	€/m	[redacted]
Juhtme vahetus 70 mm²	€/m	[redacted]
Demontaaž (2-4 juhet)	€/m	[redacted]
Korrashoid	**€/m**	[redacted]
Trassihooldus	€/m	[redacted]
Rikke likvideerimine	€/m	[redacted]
Ülevaatus	€/m	[redacted]
Masti vahetus, defekt	€/m	[redacted]
Audit	€/m	[redacted]

Märkused:

1. **Variant 1**: keskpinge (KP) isoleerjuhtmega õhuliin samas trassis koos trassi laienduse, uuete mastide ja mastalajaamaga, eeldatava elueaga 40 aastat.
2. **Variant 2**: madalpinge (MP) paljasjuhtmeline liin, mille eeldatav eluiga on 20 aastat
3. **Variant 3**: MP rippkeerdkaabliga liin koos mastide ja juhtmete vahetusega, mille eeldatav eluiga on 35 aastat.

Tabel 2.27. Variantide kogukulud nelja vaadeldava ajaperioodi kohta sõltuvalt liini pikkusest

Liini pikkus, m	Variant 1 – KP isoleerjuhtmega õhuliin samas trassis, mastalajaam				Variant 2 – MP paljasjuhtmeline liin				Variant 3 – MP rippkeerdkaabliga liin			
	Kogukulu ajaperioodi kohta, €				Kogukulu ajaperioodi kohta, €				Kogukulu ajaperioodi kohta, €			
	10 a	20 a	30 a	40 a	10 a	20 a	30 a	40 a	10 a	20 a	30 a	40 a
100	3389	6778	10168	13557	1018	2035	3053	4070	957	1914	2871	3829
200	4153	8307	12460	16613	1960	3920	5880	7840	1743	3486	5229	6971
300	4918	9835	14753	19670	2903	5805	8708	11610	2529	5057	7586	10114
400	5682	11363	17045	22727	3845	7690	11535	15380	3314	6629	9943	13257
500	**6446**	**12892**	**19338**	**25783**	**4788**	**9575**	**14363**	**19150**	**4100**	**8200**	**12300**	**16400**
600	7210	14420	21630	28840	5730	11460	17190	22920	4886	9771	14657	19543
700	7974	15948	23923	31897	6673	13345	20018	26690	5671	11343	17014	22686
800	8738	17477	26215	34953	7615	15230	22845	30460	6457	12914	19371	25829
900	9503	19005	28508	38010	8558	17115	25673	34230	7243	14486	21729	28971
1000	**10267**	**20533**	**30800**	**41067**	**9500**	**19000**	**28500**	**38000**	**8029**	**16057**	**24086**	**32114**
1100	11031	22062	33093	44123	10443	20885	31328	41770	8814	17629	26443	35257
1200	11795	23590	35385	47180	11385	22770	34155	45540	9600	19200	28800	38400
1300	12559	25118	37678	50237	12328	24655	36983	49310	10386	20771	31157	41543
1400	13323	26647	39970	53293	13270	26540	39810	53080	11171	22343	33514	44686
1500	**14088**	**28175**	**42263**	**56350**	**14213**	**28425**	**42638**	**56850**	**11957**	**23914**	**35871**	**47829**
1600	14852	29703	44555	59407	15155	30310	45465	60620	12743	25486	38229	50971
1700	15616	31232	46848	62463	16098	32195	48293	64390	13529	27057	40586	54114
1800	16380	32760	49140	65520	17040	34080	51120	68160	14314	28629	42943	57257
1900	17144	34288	51433	68577	17983	35965	53948	71930	15100	30200	45300	60400
2000	**17908**	**35817**	**53725**	**71633**	**18925**	**37850**	**56775**	**75700**	**15886**	**31771**	**47657**	**63543**
2100	18673	37345	56018	74690	19868	39735	59603	79470	16671	33343	50014	66686
2200	19437	38873	58310	77747	20810	41620	62430	83240	17457	34914	52371	69829
2300	20201	40402	60603	80803	21753	43505	65258	87010	18243	36486	54729	72971
2400	20965	41930	62895	83860	22695	45390	68085	90780	19029	38057	57086	76114
2500	**21729**	**43458**	**65188**	**86917**	**23638**	**47275**	**70913**	**94550**	**19814**	**39629**	**59443**	**79257**
2600	22493	44987	67480	89973	24580	49160	73740	98320	20600	41200	61800	82400
2700	23258	46515	69773	93030	25523	51045	76568	102090	21386	42771	64157	85543
2800	24022	48043	72065	96087	26465	52930	79395	105860	22171	44343	66514	88686
2900	24786	49572	74358	99143	27408	54815	82223	109630	22957	45914	68871	91829
3000	**25550**	**51100**	**76650**	**102200**	**28350**	**56700**	**85050**	**113400**	**23743**	**47486**	**71229**	**94971**
3100	26314	52628	78943	105257	29293	58585	87878	117170	24529	49057	73586	98114
3200	27078	54157	81235	108313	30235	60470	90705	120940	25314	50629	75943	101257
3300	27843	55685	83528	111370	31178	62355	93533	124710	26100	52200	78300	104400
3400	28607	57213	85820	114427	32120	64240	96360	128480	26886	53771	80657	107543
3500	**29371**	**58742**	**88113**	**117483**	**33063**	**66125**	**99188**	**132250**	**27671**	**55343**	**83014**	**110686**
3600	30135	60270	90405	120540	34005	68010	102015	136020	28457	56914	85371	113829
3700	30899	61798	92698	123597	34948	69895	104843	139790	29243	58486	87729	116971
3800	31663	63327	94990	126653	35890	71780	107670	143560	30029	60057	90086	120114
3900	32428	64855	97283	129710	36833	73665	110498	147330	30814	61629	92443	123257
4000	**33192**	**66383**	**99575**	**132767**	**37775**	**75550**	**113325**	**151100**	**31600**	**63200**	**94800**	**126400**

Tabel 2.28. Võimalik investeering nelja vaadeldava ajaperioodi ja liini pikkuse kohta

Liini pikkus, m	Keskpingeliini ja MP paljasjuhtme liini kogukulude vahe vaadeldaval perioodil, € (Variantide 1 ja 2 kogukulude vahe)				Keskpingeliini ja MP rippkeerdkaabli kogukulude vahe vaadeldaval perioodil, € (Variant 1 ja 3 kogukulude vahe)				MP rippkeerdkaabli ja paljasjuhtme kogukulude vahe vaadeldaval perioodil, € (Variant 3 ja 2 kogukulude vahe)			
	10 a	**20 a**	**30 a**	**40 a**	**10 a**	**20 a**	**30 a**	**40 a**	**10 a**	**20 a**	**30 a**	**40 a**
100	2372	4743	7115	9487	2432	4864	7296	9728	-60	-121	-181	-241
200	2193	4387	6580	8773	2410	4821	7231	9642	-217	-434	-651	-869
300	2015	4030	6045	8060	2389	4778	7167	9556	-374	-748	-1122	-1496
400	1837	3673	5510	7347	2367	4735	7102	9470	-531	-1061	-1592	-2123
500	**1658**	**3317**	**4975**	**6633**	**2346**	**4692**	**7037**	**9383**	**-687**	**-1375**	**-2063**	**-2750**
600	1480	2960	4440	5920	2324	4649	6973	9297	-844	-1689	-2533	-3377
700	1302	2603	3905	5207	2303	4605	6908	9211	-1001	-2002	-3003	-4004
800	1123	2247	3370	4493	2281	4562	6844	9125	-1158	-2316	-3474	-4631
900	945	1890	2835	3780	2260	4519	6779	9039	-1315	-2629	-3944	-5259
1000	**767**	**1533**	**2300**	**3067**	**2238**	**4476**	**6714**	**8952**	**-1471**	**-2943**	**-4414**	**-5886**
1100	588	1177	1765	2353	2217	4433	6650	8866	-1628	-3256	-4885	-6513
1200	410	820	1230	1640	2195	4390	6585	8780	-1785	-3570	-5355	-7140
1300	232	463	695	927	2173	4347	6520	8694	-1942	-3884	-5825	-7767
1400	53	107	160	213	2152	4304	6456	8608	-2099	-4197	-6296	-8394
1500	**-125**	**-250**	**-375**	**-500**	**2130**	**4261**	**6391**	**8521**	**-2255**	**-4511**	**-6766**	**-9021**
1600	-303	-607	-910	-1213	2109	4218	6326	8435	-2412	-4824	-7236	-9649
1700	-482	-963	-1445	-1927	2087	4175	6262	8349	-2569	-5138	-7707	-10276
1800	-660	-1320	-1980	-2640	2066	4131	6197	8263	-2726	-5451	-8177	-10903
1900	-838	-1677	-2515	-3353	2044	4088	6132	8177	-2883	-5765	-8647	-11530
2000	**-1017**	**-2033**	**-3050**	**-4067**	**2023**	**4045**	**6068**	**8090**	**-3039**	**-6079**	**-9118**	**-12157**
2100	-1195	-2390	-3585	-4780	2001	4002	6003	8004	-3196	-6392	-9588	-12784
2200	-1373	-2747	-4120	-5493	1980	3959	5939	7918	-3353	-6706	-10059	-13411
2300	-1552	-3103	-4655	-6207	1958	3916	5874	7832	-3510	-7019	-10529	-14039
2400	-1730	-3460	-5190	-6920	1936	3873	5809	7746	-3666	-7333	-10999	-14666
2500	**-1908**	**-3817**	**-5725**	**-7633**	**1915**	**3830**	**5745**	**7660**	**-3823**	**-7646**	**-11470**	**-15293**
2600	-2087	-4173	-6260	-8347	1893	3787	5680	7573	-3980	-7960	-11940	-15920
2700	-2265	-4530	-6795	-9060	1872	3744	5615	7487	-4137	-8274	-12410	-16547
2800	-2443	-4887	-7330	-9773	1850	3700	5551	7401	-4294	-8587	-12881	-17174
2900	-2622	-5243	-7865	-10487	1829	3657	5486	7315	-4450	-8901	-13351	-17801
3000	**-2800**	**-5600**	**-8400**	**-11200**	**1807**	**3614**	**5421**	**7229**	**-4607**	**-9214**	**-13821**	**-18429**
3100	-2978	-5957	-8935	-11913	1786	3571	5357	7142	-4764	-9528	-14292	-19056
3200	-3157	-6313	-9470	-12627	1764	3528	5292	7056	-4921	-9841	-14762	-19683
3300	-3335	-6670	-10005	-13340	1743	3485	5227	6970	-5078	-10155	-15233	-20310
3400	-3513	-7027	-10540	-14053	1721	3442	5163	6884	-5234	-10469	-15703	-20937
3500	**-3692**	**-7383**	**-11075**	**-14767**	**1699**	**3399**	**5098**	**6798**	**-5391**	**-10782**	**-16173**	**-21564**
3600	-3870	-7740	-11610	-15480	1678	3356	5034	6711	-5548	-11096	-16644	-22191
3700	-4048	-8097	-12145	-16193	1656	3313	4969	6625	-5705	-11409	-17114	-22819
3800	-4227	-8453	-12680	-16907	1635	3270	4904	6539	-5861	-11723	-17584	-23446
3900	-4405	-8810	-13215	-17620	1613	3226	4840	6453	-6018	-12036	-18055	-24073
4000	**-4583**	**-9167**	**-13750**	**-18333**	**1592**	**3183**	**4775**	**6367**	**-6175**	**-12350**	**-18525**	**-24700**

3 Salvestusseadmete tüüpsed moodulid välitingimustes pingeprobleemide lahendamiseks ja leevendamiseks

3.1 Väikesed madalpinge salvestusseadmed

Välitingimustesse rajatavaid energiasalvesteid ehk UPS-seadmeid toodavad mitmed ettevõtted nagu Mak Plus Power Systems UG (Saksamaa), Harland Simon UPS Limited (Inglismaa), Shenzhen SORO Electronics Co., Ltd. (Hiina), TSi Power Corporation (USA) jne. Parim ülevaade tehnilistest andmetest, välistingimustesse paigaldamiseks vajalikest komponentides sh UPSi hindadest on esitatud Mak Plus Power Systems UG inglis- ja saksakeelsel lehel: http://de.mak-powersis.de/usv.html. Alloleval joonisel on esitatud tüüpilise välitingimustesse paigaldatava UPS-i andmed (Tabel 3.1).

Tabel 3.1. Välitingimustesse paigaldatav UPS[31]

Parameeter	Väärtus	Seadme pilt
1-faasiliste võimsusvahemik 3-faasiliste võimsusvahemik	1...60kVA 10...1000kVA	
Sisendpinge piirkond (erijuhtudel)	±15% (50% ja rohkem)	
Faaside arv	1 või 3	
Kasutegur ligikaudu • 50% koormusel • 100% koormusel	 >90% >95%	
Katestuste kestus	Kuni 12 h	
Välisteperatuur (lahjematel variantidel) :	-30°C … + 65°C (-10°C … + 55°C)	
Sisene kliimaseade mis hoiab temperatuuri vahemikus 0°C … 20°C	Jah	
Kaitseaste	IP55 (IP65)	
Pingeeraldustrafo lisamine	Jah	
Andmeside	SNMP, RS232, RS485, USB, MODBUS	
Müra	<60dB	
Standarditele vastavus	EN 62040-1, EN62040-2	
Hinnad[32] • 1-faasilistel • 3-faasilistel	 352...10260€ 3690...166000€	

[31] http://www.mak-powersis.de/outdoor-ups.html
[32] Hinnad ei sisalda tarne- ja paigalduskulusid, korpuse hinda, hinnavahemik on seadmetel katkestuste kestusega 5minutit

3.2 Suured madalpinge salvestusseadmed ja nende komponendid[33]

Ühe tüüpse energiasalvestuslahendusena on järgnevalt kirjeldatud Saksamaal Wildpoldsried külla paigaldatud energiasalvestit. Väljatöötatud energiasalvestussüsteemi eesmärgiks on peamiselt lahendada PV-süsteemide poolt põhjustatud ülepingeprobleeme ja pingemuhke. Seadme teine eesmärk on uuringute ja katsetuste läbiviimise kaudu kogemuste saamine. Seade sobiks perspektiivis energiaühistutele.

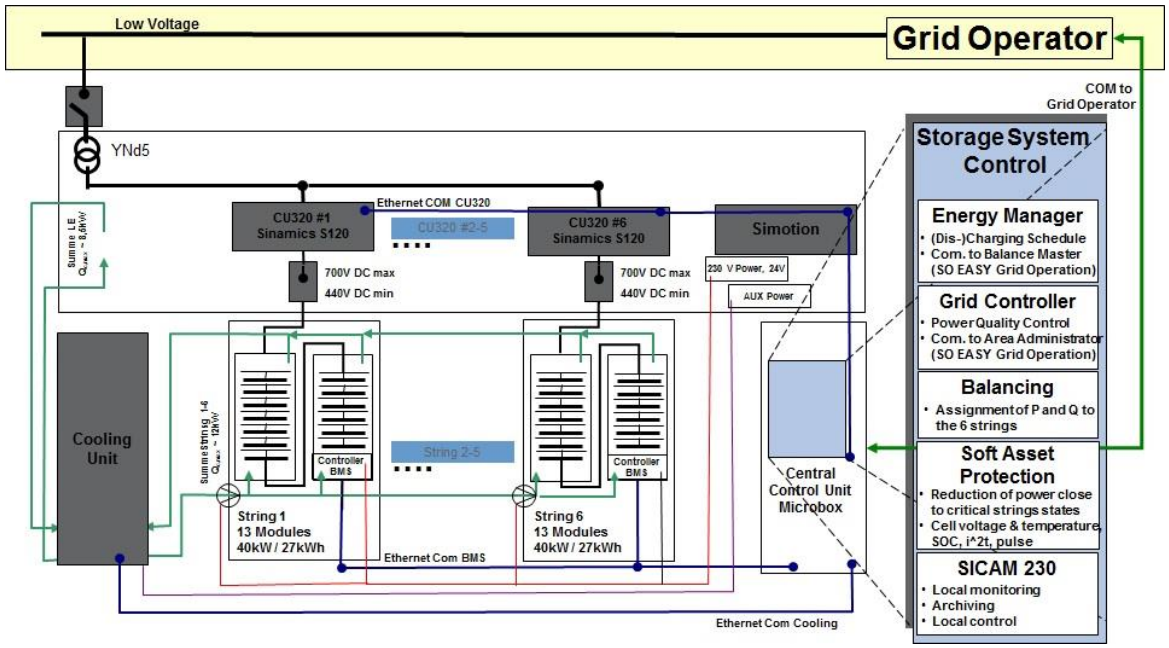
Joonis 3.1. Merekonteinerisse ehitatud energiasalvesti

Energiasalvesti on paigaldatud merekonteinerisse mõõtmetega ca. 7,3x2,4x3,1m. Seadme struktuurist annab ülevaate järgnev joonis (Joonis 3.2). Süsteem koosneb kuuest akustringist (tootja *ads-tec*), mis sisaldavad *Leclanché* liitium-titanaat (*Lithium Ion LTO NCO*) akuelemente. Igat stringi juhitakse üle eraldi *Sinamics-120* muunduri. Stringid on kolme kaupa üle trafode ühendatud madalpingevõrguga (joonisel näha vaid üks trafo). Süsteemi alamseadmete seire ja juhtimise eest vastutab *Simatic Industrie-PC*. Süsteemi sisene andmeside toimub üle lokaalse *Ethernet* võrgu. Süsteemi kaughaldus toimub DSL-modemi kaudu üle Interneti. Süsteem on varustatud kliimaseadmega, mis tagab konteineri sisese temperatuuri vahemikus 10°C kuni 30°C. Samuti on seade varustatud CO2-tulekustutuslahendusega. Süsteemi nimimahutavus on 162 Wh (C10). Tagamaks salvesti laetus vahemikus 10...95%, on salvesti mahutavusest reaalselt kasutatav 138 kWh. Seadme vahelduvvoolu poole võimsus on 230kW (1,5C), mis impulsstalitluses tähendab 300kW (2C, kuni 60 s). Akude eeldatav eluiga temperatuuril 25°C ja tühjendamissügavuse 85% korral on 5000 tsüklit. Nagu kogemused seadmega on näidanud, siis sellist eluiga seoses tehnoloogia uudsuse tõttu tehtavate projekteerimisvigadega pole reaalselt õnnestunud veel saavutada.

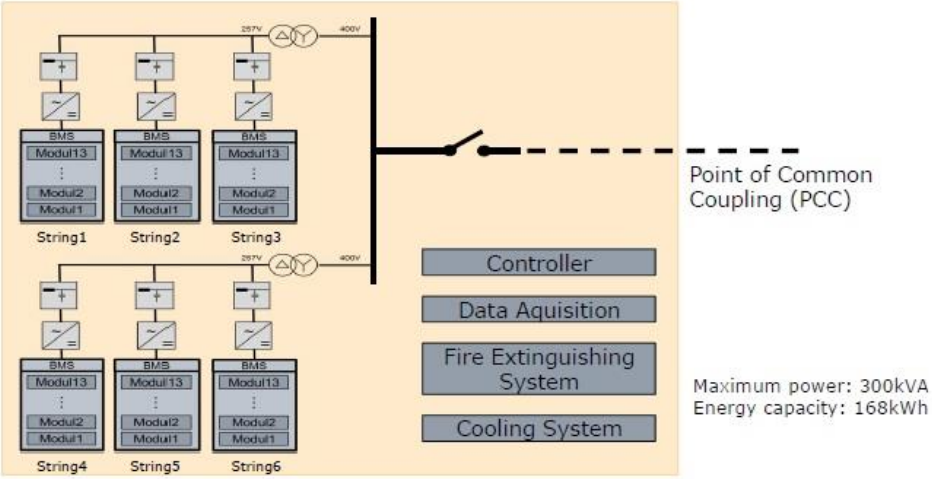
Tööstusarvutil kasutatav SIMOTION- tarkvararakendus (*Simatic Industrie-PC*) on mõeldud peamiselt seadeväärtuste sisestamiseks ja seire eesmärgil nt temperatuurinäitude, muunduri töö jälgimiseks.

[33] https://www.vde-verlag.de/proceedings-en/453550060.html

Tarkvara omab laienduvõimalust integreerida uusi rakenduspõhiseid juhtimislahendusi. Iga akustringi aktiiv- ja reaktiivvõimsuste etteandeväärtused saab SIMOTION- tarkvararakendus *StorageRackController*'ilt. Viimaste ülessanne on ka tagada, et seadeväärtuste muutmisega akud ei langeks kriitilisse tööpunkti, mis põhjustab seadme töö katkestuse.

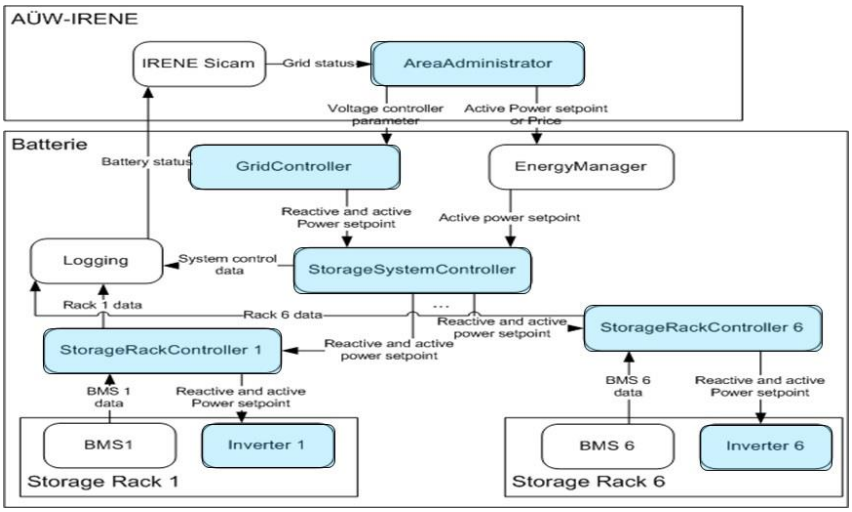


Joonis 3.2. Madalpingevõrgu energiasalvestussüsteemi struktuurskeem



Joonis 3.3. Energiasalvesti lihtsustatud struktuurskeem

StorageSystemControl saab süsteemi aktiivvõimsuse etteandeväärtused *EnergyManager*'ilt ning süsteemi reaktiivvõimsuse etteandeväärtused ning aktiivvõimsuse muutmise signaalid *GridController*'ilt, mis edastatakse konkreetsetele akustringidele. Nimetatud kahe süsteemi abil tagatakse süsteemi maksimaalne paindlikkus võrgupinge stabiliseerimisel. Ülejäänud süsteemi komponendid on süsteemi seadistamiseks ja andmete arhiveerimiseks. Süsteemi seiret teostab SICAM 230 SCADA-süsteem.



Joonis 3.4. Energiasalvesti üldine juhtimisskeem

3.2.1 Perspektiivsete salvestusseadme tehnilised parameetrid ja näidisnõuded

Perspektiivsete salvestusseadmete ja selle komponentide tehnilised parameetrid määratakse sõltuvalt tegelikust vajadusest. Järgnevalt on esitatud näidisloetelu parameetritest salvestussüsteemi hankimiseks.

3.2.1.1 Konteineri parameetrite soovitav kirjeldus hangetes

Pos.nr.	Parameetri nimetus	Näidis esitlus, ühik
1.	Mõõtmed (LxBxH): 1. Mõõtmed seest ja väljast: pikkus, laius, kõrgus meetrites 2. Sisemine ja väline maht	(6x2,4x2,9)m
2.	Termiline korpuse isoleerimine (paksus, soojusjuhtivus)	(paksus 80mmm, soojusjuhtivus 0,556W/m^{2}K)
3.	Värv	RAL7035
4.	Suletav tuulutusava	Jah
5.	Võrguühenduseks vajalik kaabli läbiviik	Jah
6.	Uks paanikalukuga, mille mõõtmed on ca	(1000x2400)mm
7.	Lume taluvus soovitavalt	>3,91 kN/m^2
8.	Küte ja jahutus valida vastavalt seadmete töötemperatuurile, tagades konteineri sisetemperatuuri enamike seadmete puhul vahemikus	10...30 °C
9.	Nõuetele vastav tulekustutuslahendus	CO2
10.	Omatarbe tagamine allolevatele seadmetele: 1. Valgustid koos lülitiga, 2. 2 x 230V pistikupesa koos kaitsmetega 3. 1 x 400V pistikupesa koos kaitsmega 4. 1 kaitse kliimaseadmele 5. Vähemalt 1 reservkaitse 6. 2...4 lampi, vastavalt valgustuse nõuetele 7. Turvavalgustus vähendatud heledusega (pingekatkestusel kuni 60 minutit) 8. Maanduslati paigaldus 9. Kaablikanalid	 Jah Jah Jah Jah Jah Jah Jah Jah Jah

3.2.1.2 Salvesti parameetrite soovitatav kirjeldus hangetes

Pos.nr.	Parameetri nimetus	Näidis esitlus, ühik
1.	Vähim pinge maksimaalse koormuse korral kui SOC=0:	455V
2.	Suurim pinge tühijooksul kui SOC=1:	675V
3.	Nimipinge:	580 V±5 %
4.	Püsivõimsus laadimisel/tühjendamisel ligi (1,5C)	>75 kW
5.	Tipuvõimsus laadimisel/tühjendamisel kuni 60 s (2C):	>90kW
6.	Nimimahutavus (C/10)	160 kWh
7.	Kasutatav mahutavus (SOC 10%...95%)	135 kWh
8.	Kasutegur AC/AC (laadimisel/tühjendamisel 1C)	>80%
9.	Kliimaseadmega süsteemil eluiga tsüklites DOD=0,6 korral temperatuuril 20°C:	>5000 tsükli
10.	Sisendtakistuse kasv vananemise käigus SOC=0,1 korral:	kuni 50%
11.	Kalendriline eluiga temperatuuril 20°C ja SOC=1 korral:	>10 aastat
12.	Tsükliline eluiga 1. Li-Ion akudele temperatuuril 25°C ja DOD=0,85 korral: 2. Plii akudele temperatuuril 25°C ja DOD=0,3 korral:	 >5000 tsüklit >5000 tsüklit
13.	Konteineri sisetemperatuur	10-30°C
14.	Suurim püsikoormus töötemperatuuri vahemikus (0-45°C):	0,85C
15.	Akude paigaldus	19-tollistele raamidele.
16.	Integreeritud akuhaldussüsteemi omadused 1. Akumoodulite seire (voolud, pinged, temperatuur) 2. Andmete pidev kogumine: a. SOC (*state of charge*) ja SOH (*state of health*) b. Aku pinge, laadimis- ja tühjendamisvoolud c. Vähimad ja suurimad elementide pinged igas akumoodulis d. Vähimad ja suurimad temperatuurid igas akumoodulis e. Suurimad olekust sõltuvad laadimis- ja tühjendamisvoolud f. Veateated (vt 3.2.2.4) g. Andmeside	 Jah Jah Jah Jah Jah Jah Jah IEC61850
17.	Integreeritud alalisvoolu lahuti aku ja muunduri vahel	Jah
18.	Automaatne enesekontroll käivitamise ja töö faasis	Jah

3.2.1.3 Muunduri parameetrite soovitatav kirjeldus hangetes

Pos.nr.	Parameetri nimetus	Näidis esitlus, ühik
1.	Kahesuunaline energiavahetus	
2.	Kaitseahelad 1. Võrguriketele: a. võrgu sagedus ületab lubatud vahemikku b. võrgu pinge ületab lubatud vahemikku 2. alapinge ja ülevoolukaitse 3. ületemperatuur	 95...105% 75...110% 75°C (inverter), 100°C (trafodel),

Pos.nr.	Parameetri nimetus	Näidis esitlus, ühik
3.	Vahelduvvoolu poole andmed: 1. Pinge 2. Sagedus 3. Nimivõimsus 4. Suurim võimsus (60s):	 400V±10% 50 Hz 75kW 90kW
4.	Alalisvoolu poole andmed 1. Vähim pinge: 2. Suurim võimsus:	 288V 720V
5.	Vähim kasutegur tühjendamisel:	>94%
6.	Vähim kasutegur laadimisel:	>90%
7.	Reguleerimine (kõik talitlusviisid väljalülitatavad): 1. Pingevahemiku hoidmine 2. Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse juhtimine 3. Laadimisel voolu/pinge kõverad peavad vastama aku tehnilistele nõuetele 4. Pingekõikumiste vähendamine sõltuval toitekõikumisest	
8.	Juhtimis- ja kasutajaliidesel seadistatavad ja jälgitavad andmed	P, Q, U, I
9.	Integreeritud võrgu jälgimine	pinge, sagedus, näivtakistus
10.	Integreeritud mõõtetehnika kõigi faaside mõõtmiseks 1. Mõõtemeetodid ja –täpsus vastavalt EN 61000-4-27:2000, IEC 61557-12 2. Hetkväärtused, miinimum-, maksimum- ja libisevad keskväärtused 3. Pingete ja voolude efektiivväärtused (L-L, L-N) 4. Aktiiv-, reaktiiv- ja näivvõimsused ja energiad 5. Võimsustegur, Faasinihe, Faasidevaheline nurk 6. Võrgusagedus 7. Harmooniliste osakaal AC ja DC poolel a. Pingeharmoonilised kuni 31 harmooniliseni b. Vooluharmoonilised kuni 31 harmooniliseni 8. Amplituudi, pinge ja voolu ebasümmeetria 9. Pinge- ja voolumoonutus 10. AC ja DC poole kaitseahelad 11. Vaheldi peab olema paigaldatav elektrikilpi	

3.2.1.4 Tulekustutuslahenduse parameetrite soovitatav kirjeldus hangetes

Pos.nr.	Parameetri nimetus	Näidis esitlus, ühik
1.	Kustutusvahend	CO2 gaas
2.	Pneumaatiline häälalarm hoiatuseks	
3.	Salvesti, mis tagab 72h pingekatkestuse korral süsteemi töö	
4.	Optiline suitsuandur	

3.2.2 Tehnilised kirjeldused juhtimisele, andmehõivele ja andmesidele

3.2.2.1 Juhtimise funktsionaalsuse soovitatav kirjeldus hangetes

Pos.nr.	Parameetri nimetus	Näidiskirjeldus
1.	Pinge juhtimine	Akusüsteem kontrollib/juhib vastavalt etteantud algoritmile kohtvõrgu jooksva pinge alusel aktiiv- ja reaktiivvõimsust. Vastavad parameetrid juhtimisalgoritmile määratakse sõltuvalt võrgu olekust tarkvõrgu kontrolleri poolt. Näiteks kui elektritootmine ja koormus muutuvad ning energiaallikate ja salvestite piirväärtused muutuvad või neid ületatakse. Akusüsteem edastab kohtvõrgu seisundist pidevat infot ka tarkvõrgu kontrollerile.
2.	Laetuse juhtimine	akusüsteem peab tagama kindla laetuse, mis aitab tagada piisava paindlikkuse pinge juhtimiseks, mis võib tähendada nii aktiivvõimsuse genereerimist (tühjendamist) või tarbimist (laadimist). Tavaliselt optimaalne SOCi valik sõltub elektrihinna, -tootmise ja koormuse ennustatavusest ning akusüsteemi vananemise dünaamikast
3.	Taastuv-energiaallikate tasakaalustamine	tagamaks juhusliku ja ebaühtlase toodanguga taastuvenergiaallikate tõhus integreerimine, salvestab akusüsteem energiat tipptoodangu tundidel, kui energiatootmine ületab tarbimist. Kui tarbimine ületab toodangut, tagab akusüsteem tekkinud puudujäägi. See funktsioon on otseselt seotud laetuse juhtimise funktsiooniga.
4.	Pingekõikumiste summutamine	võrgu kontroller juhib aktiiv- ja reaktiivvõimsust nii, et pingekõikumised hoitakse etteantud piirides.
5.	Võrgurikked	võrgu rikete osas peetakse logi ja koostatakse automaatsed aruanded. Võrgu rikete all peetakse silmas sageduse ja pinge hälbeid. Eristatakse aeglaseid ja kiireid rikkeid. Aeglastele riketel reageerivad kõrgema taseme juhtseadmed. Kiirete rikete korral toimub suurte hälvete korral inverteerite automaatne väljalülitamine. Lubatavaks pingepiirkonnaks loetakse 75...110% nimipingest. Lubatavaks sageduspiirkonnaks loetakse 95...105% nimisagedusest
6.	Seire ja kaugjuhtimine	võimekus seisata või käivitada kogu süsteemi (rakendust) või osaprotsessi, näha alamsüsteemide olekut (seiskamine, käivitamine, töötamine, rike jms), näha süsteemi parameetreid ja sätteid, reageerida alamsüsteemide vigadele (nt andmeside katkestused jms)

3.2.2.2 Reguleerimisfunktsioonide soovitatav kirjeldus hangetes

Pos.nr.	Parameetri nimetus
1.	Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse seadeväärtuste lokaalne muutmine
2.	Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse seadeväärtuste kaugmuutmine
3.	Pingest sõltuva aktiiv- ja reaktiivvõimsuse juhtimine
4.	Tulevikus: muud juhtimisstrateegiad (nt. Turuhinnast vms sõltuvad)

3.2.2.3 Muude funktsionaalsete võimaluste (kasutusmudel) soovitatav kirjeldus hangetes

Pos.nr.	Parameetri nimetus	Näidiskirjeldus
1.	Tarkvarauuendused	tarkvarauuendusi saab üle turvalise kaugside sessiooni kaudu läbi viia
2.	Logimine	logimiseks kasutatakse pantheios library. Pantheios on Open Source C/C++ Diagnostika logiks ettenähtud API library. Võimaldab logi sõnumite filtreerimist sõltuvalt tasemetest (sh 8 taset vastavalt SysLog protokollile) jpm.
3.	Arhiveerimine	valitud protsesside andmed, seisundid ja veasõnumid arhiveeritakse lokaalselt. Lokaalse arhiivi sisu kopeeritakse etteantud ajaperioodi tagant üle kaugandmeside võrgu keskserverisse ja tühjendatakse
4.	Häired	kui jälgitavate andmete väärtused ületavad etteantud piirväärtused või mõni süsteemi komponent väljastab veateate, siis sellest teavitatakse lokaalselt ja info edastatakse üle kaugandmesidevõrgu keskserverisse.
5.	Kaugteeninduse liides	andmeside on krüpteeritud, juurdepääs peab olema autentimisega. Tagab juurdepääsu lokaalsele seire- ja juhtimissüsteemile.

3.2.2.4 Rikete stsenaariumite soovitatav kirjeldus hangetes

Pos.nr.	Parameetri nimetus	Näidiskirjeldus
1.	Võrgurikked	võrgu rikete osas peetakse logi ja koostatakse automaatsed aruanded. Võrgu rikete all peetakse silmas sageduse ja pinge hälbeid. Eristatakse aeglaseid ja kiireid rikkeid. Aeglastele riketel reageerivad kõrgema taseme juhtseadmed. Kiirete rikete korral toimub suurte hälvete korral inverteerite automaatne väljalülitamine. Lubatavaks pingepiirkonnaks loetakse 75...110% nimipingest. Lubatavaks sageduspiirkonnaks loetakse 95...105% nimisagedusest
2.	Ülevool	kaitsmed süsteemis, inverterite väljalülitamine (sisendkaitsmed, trafo kaitsmed jms)
3.	Ületemperatuur	süsteem peab vähendama võimsust kui tekkib trafo või inverterite ülekuumenemine. Süsteem peab väljalülituma kui inverteri temperatuur saavutab 75°C ja trafo 100°C. Temperatuuri mõõdetakse inverteri ja trafo seest.
4.	Akuhaldussüsteemi väljalülimine	Kui laadimisel DC siini pinge kasvab, siis inverteri juhtimine tuleb piirväärtuse ületamisel katkestada. Kui tühjendamisel DC siini pinge kahaneb, siis inverteri juhtimine tuleb piirväärtuse ületamisel katkestada.
5.	Andmeside viga	TCP, Profinet või muu andmeside seadmete vahel katkeb, siis tuleb toimida ohutusreeglite järgi, tagades ohutus inimesel ja seadmetele.
6.	Madalpingeahelate rike	AC lüliti lahutamine, süsteem väljalülimine ja aku juhtimine katkestatakse
7.	Isolatsiooni seire viga	hoiatus edastakse
8.	Ühefaasiline katkestus	inverter lülitatakse välja

3.2.2.5 Andmeside soovituslik kirjeldus hangetes

Elektrilevi alajaamade sidumiseks dispetšertalitlusega on seni kasutatud andmesideprotokolli IEC 60870-5-101 ja signaaliedastuseks valdavalt mobiilivõrku. Tegelikkuses kasutatav andmeside formaat on määratud kasutajapoolsete tingimustega, seejuures elektripaigaldise haldajal võivad olla oma nõudmised. Kuna kaasaegsed telemaatikakontrollerid toetavad mitut kaugliidest, võib kaaluda eraldi andmesidet võrguettevõtja ja paigaldise halduri jaoks. Silmas pidades, et ka tööstuslik andmeside kasutab järjest enam TCP/IP protokolli, on mõttekas kasutada objekti visualiseerimiseks kaugarvutis veebiliidest, kusjuures andmeside loomisel tuleb tähele panna järgmiseid asjaolusid:

1) ligipääsetavus: kohvõrgust või internetist
2) IP aadress: staatiline või dünaamiline;
3) pordid: avatud või suletud;
4) tulemüüri olemasolu;
5) alla-/üleslaadimiskiirus.

4 Lahendusalternatiivide tõepärasuse võrdlus

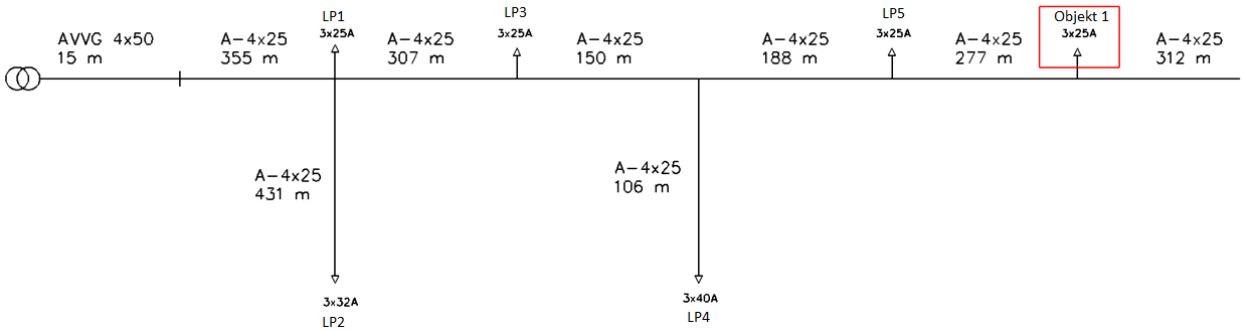
4.1 Objektide tehniline kirjeldus

4.1.1 Objekt 1, Leanderi 10/0,4 kV alajaama F4

Leanderi alajaam asub Rapla maakonnas Kaiu alevikus ja saab toite Kaiu 35/10 kV alajaama Kaiu II 10 kV liini kaudu. Leanderi alajaamas on kaks 160 kVA võimsusega 10/0,4 kV trafot, lülitusgrupiga Y/yn-0.

Madalpingefiider F4 on kogu ulatuses neljajuhiline ja paljasjuhtmeline, A-4x25 alumiiniumjuhtmetega. Liini ehitusaasta on 1980. Fiidri esimene kolmandik paikneb kesktihedas varustuskindluse piirkonnas ja lõpuosa hajapiirkonnas.

Leanderi 10/0,4 kV alajaama F4 kuulub rühma 1 fiidrite hulka: pikem haru asub esimeses kolmandikus. Leanderi F4 liinil on kokku 6 liitumispunkti, fiidri kogupikkus on 2274 m. Kaugeim klient asub alajaamast 1319 m kaugusel. Liini aastatarbimine on ca 78 500 kWh. Fiidri üldvaade on toodud alloleval joonisel (Joonis 4.1).



Joonis 4.1. Leanderi 10/0,4 kV alajaama F4 skeem.

Mõõtmised tehti Leanderi F4 objekt 1 liitumispunktis (eeltoodud joonisel tähistatud punase kastiga), mis asub mööda liini alajaamast 1,3 km kaugusel. Sellel liitumispunktil on 3-faasiline peakaitse nimivooluga 25 A ja aastane tarbimine on ca 11 500 kWh. Liitumispunktis on tehniliselt tuvastatud pingeprobleem.

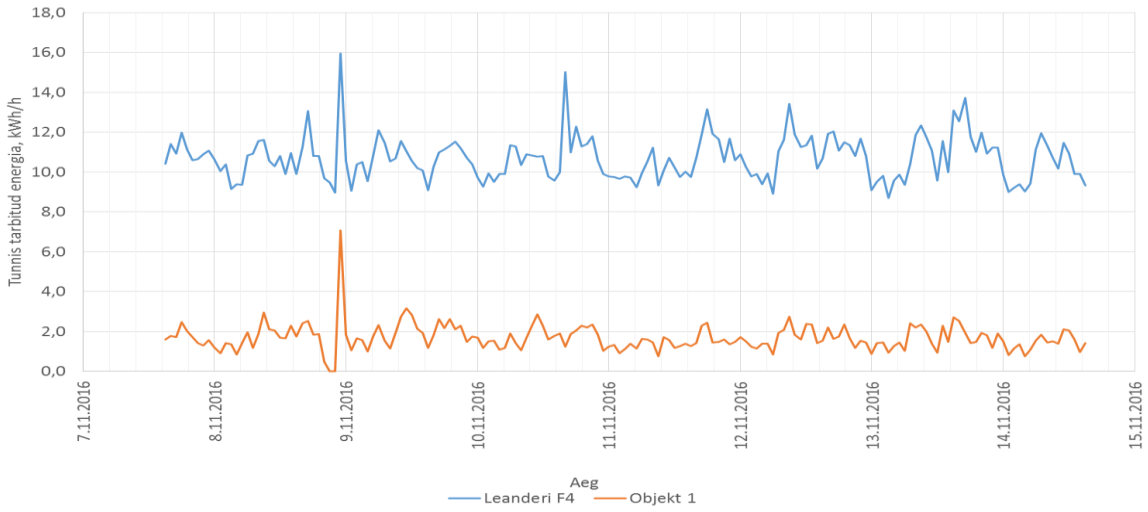
Ligikaudu 10 aastat tagasi asendati objekti 1 elumaja sisestuskaabel. Majasisene elektripaigaldis uuendatud ca 5 aastat tagasi. Majasiseses elektripaigaldises on kasutusel kaasaegsed vaskkaablid.

Objekt 1 peamised elektritarvitid:

- Pesumasin
- Elektripliit (4 rauda)
- Põrandaküte (6 m^2)
- Tolmuimeja
- Elektriahi
- Külmkapp
- Mikrolaineahi
- 2 õhksoojuspumpa
- Espressomasin
- Pesukuivati
- Veekeedukann
- Veepump
- Veeboiler 80 l
- Röster

Järgmisel joonisel (Joonis 4.2) on toodud Leanderi F4 kogutarbimine ja objekt 1 tarbimine mõõteperioodi nädalal, esmaspäevast 7.11.2016 kuni esmaspäevani 14.11.2016. Jooniselt on näha, et objekt 1 tarbimine

moodustab fiidri kogutarbimisest ca 18%. Fiidri suhteliselt suur tarbimine on seletatav asjaoluga, et liinilt saab toite ka Kaiu aleviku veepuhastusjaam, mis tarbib tunnis keskmiselt üle 6 kWh.



Joonis 4.2. Objekti 1 ning Leanderi F4 kogutarbimine mõõteperioodil.

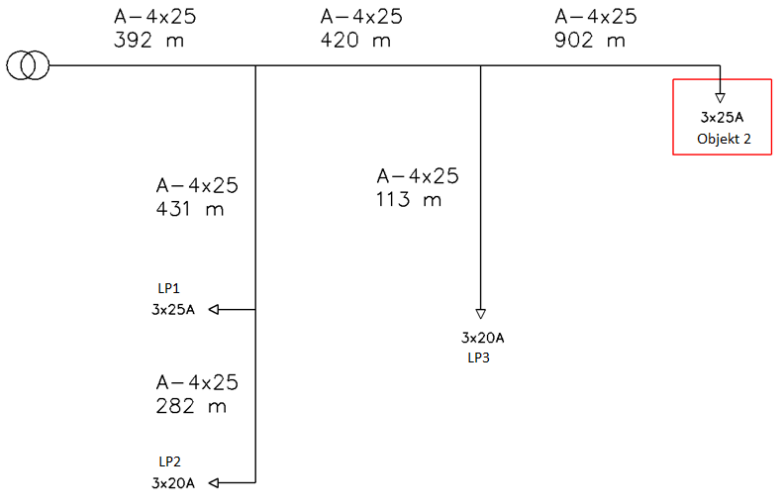
Tarbimisgraafikult on näha, et tarbimises on suur piik teisipäeva, 8. novembri õhtul kella 23:00 ja 00:00 vahel, millele on eelnenud kahe tunni jooksul objekt 1 liitumispunktis toite puudumine. Samal ajal fiidri teistes liitumispunktides on toide olemas olnud. Suur tarbimine pärast katkestust võib olla seotud salvestavate elekterkütteseadmete sisselülitumisega pärast katkestust (põrandaküte, veeboiler, veepump). Tunni keskmisele maksimaalsele võimsusele 7,07 kW vastab voolutugevus 10,21 A.

4.1.2 Objekt 2, Vastja 10/0,4 kV alajaama F2

Vastja KTP-tüüpi 10/0,4 kV alajaam asub Vastja külas, Kehtna vallas Raplamaal (Joonis 4.3). Alajaam saab toite Kehtna 110/10 kV alajaama Rõue 10 kV fiidri kaudu. Vastja alajaamas on üks 100 kVA võimsusega 10/0,4 kV trafo lülitusgrupiga Y/zn-11.

Joonis 4.3. Vastja 10/0,4 kV alajaam.

Vastja 10/0,4 kV alajaama F2 kuulub rühma 2 fiidrite hulka. Madalpingeliin F2 (ülaltoodud joonisel Vastja alajaamast paremale poole väljuv) on kogu ulatuses paljasjuhtmetega A-4x25, eeldatav ehitusaasta on 1980. Liin paikneb kogu ulatuses haja varustuskindluse piirkonnas. Fiidri kogupikkus on 2535 m ja kaugeima liitumispunkti kaugus alajaamast 1716 m. Liinil on 3 liitumispunkti, summaarse aastatarbimisega 17 200 kWh. Fiidri üldvaade on toodud järgmisel joonisel (Joonis 4.4).



Joonis 4.4. Vastja 10/0,4 kV alajaama F2 skeem.

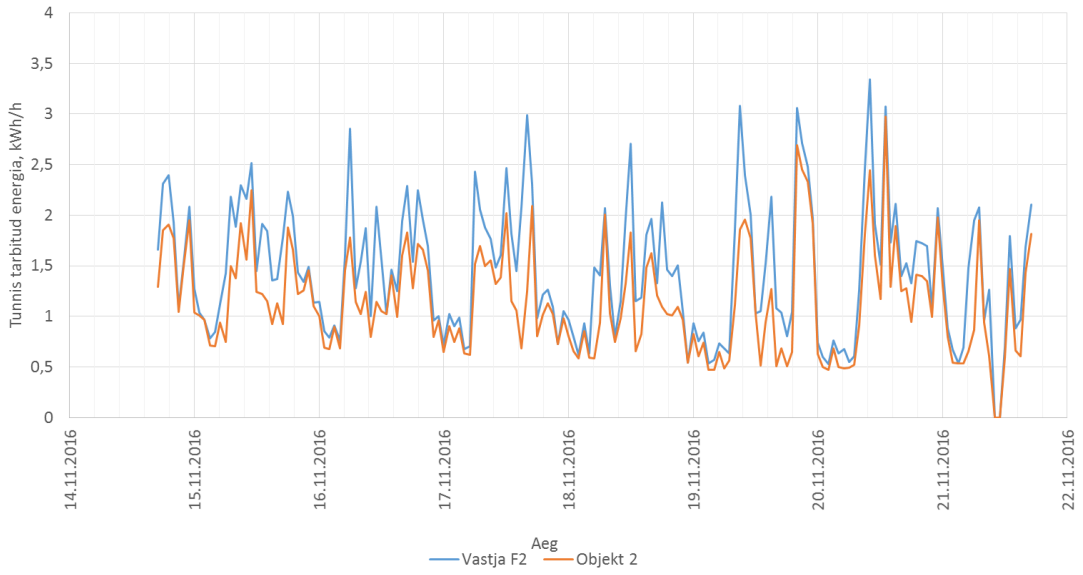
Mõõtmised tehti Vastja F2 objekt 2 liitumispunktis (eelmisel joonisel tähistatud punasega), mis asub mööda liini alajaamast 1,71 km kaugusel. Objekt 2 liitumispunktis on 3-faasiline peakaitse nimivooluga 25 A ja aastane tarbimine on ca 10 800 kWh. Liitumispunktis on tehniliselt tuvastatud pingeprobleem.

Objekt 2 majasisene elektripaigaldis on renoveeritud 7-8 aastat tagasi koos uue mõõtesüsteemi paigaldamisega. Majasiseses elektripaigaldises on kasutusel kaasaegsed vaskkaablid.

Peamised elektritarvitid

- Pesumasin
- Põrandaküte
- Tolmuimeja
- Saag
- Külmkapp
- Elektriradiaator
- Kohvimasin
- Nõudepesumasin
- Veepump
- Veeboiler
- Keevitusaparaat

Joonisel (Joonis 4.5) on toodud Vastja F2 kogutarbimine ja objekt 2 tarbimine mõõteperioodi nädalal, esmaspäevast 14.11.2016 kuni esmaspäevani 21.11.2016. Jooniselt on näha, et objekt 2 tarbib praktiliselt kogu fiidrit läbiva energia.



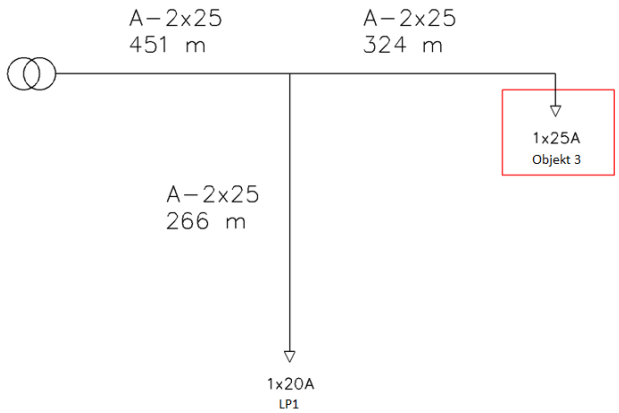
Joonis 4.5. Vastja F2 ja objekti 2 tarbimine mõõteperioodi jooksul.

Tarbimisgraafikult on näha objekti 2 maksimaalne tarbimisvõimsus 2,977 kWh/h pühapäeva, 20. novembri pärastlõunal kella 13:00 ja 14:00 vahel. Sellele võimsusele vastab keskmine voolutugevus 4,3 A.

4.1.3 Objekt 3, Tolla 10/0,4 kV alajaama F3

Tolla 10/0,4 kV alajaam asub Tolla külas Kaiu vallas Raplamaal ja saab toite Kaiu 35/10 kV alajaama Lihu 10 kV fiidrilt. KTP-tüüpi alajaamas on 50 kVA võimsusega trafo, lülitusgrupiga Y/yn-0.

Tolla 10/0,4 kV alajaama F3 kuulub rühma 3 fiidrite hulka. Liitumispunkte on fiidril kokku 2. Tolla F3 kogupikkus on 1042 m, kaugeim liitumispunkt asub 775 m kaugusel alajaamast. Liin on kogu ulatuses ühefaasiline ja paljasjuhtmeline A-2x25 juhtidega, eeldatav ehitusaasta 1977. Fiidri aastatarbimine on ca 12 200 kWh. Liini üldvaade on toodud järgmisel joonisel (Joonis 4.6).



Joonis 4.6. Tolla 10/0,4 kV alajaama F3 skeem.

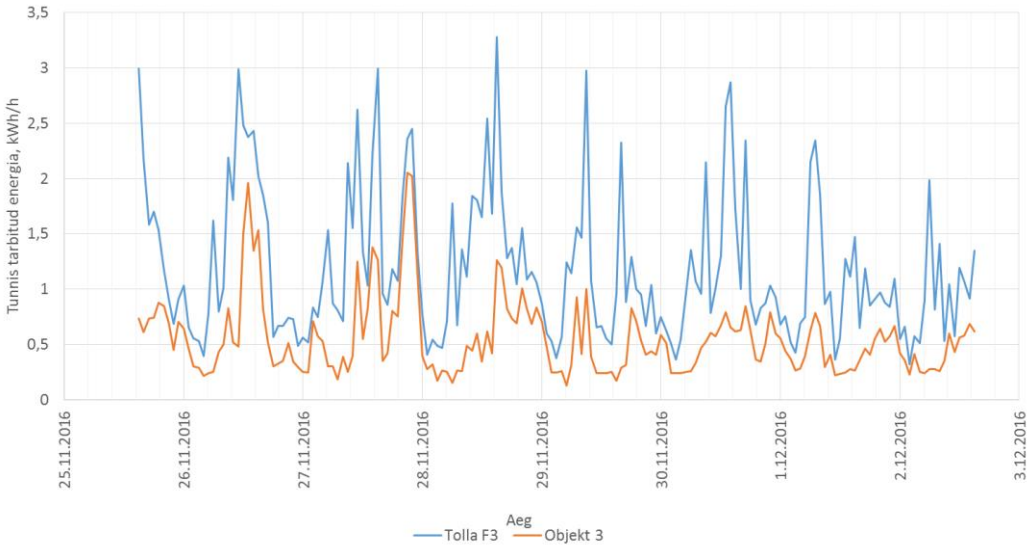
Mõõtmised tehti Tolla F3 objekt 3 liitumispunktis (joonisel tähistatud punase kastiga), mis asub mööda liini alajaamast 0,775 km kaugusel. Objekt 3 liitumispunkt on 1-faasiline peakaitse nimivooluga 25 A ja aastane tarbimine on ca 4700 kWh. Liitumispunktis tehniliselt tuvastatud pingeprobleemi ei ole.

Objekt 3 majasisene elektripaigaldis on uuendatud 2000. aastal. Samal ajal ehitati välja ka maanduspaigaldis. Majasiseses elektripaigaldises on kasutusel kaasaegsed vaskkaablid.

Peamised elektritarvitid

- Pesumasin
- Sügavkülmakirst
- Veekeedukann
- Elektripliit (2 rauda)
- Külmkapp
- Mikrolaineahi
- Veepump
- Veeboilerid 30 l ja 100 l

Joonisel (Joonis 4.7) on toodud Tolla F3 kogutarbimine ja objekt 3 tarbimine mõõteperioodi nädalal, reedest 25.11.2016 reedeni 2.12.2016. Tolla F3 liinil on kaks liitumispunkti. Fiidri teine liitumispunkt on objekt 3 tarbimiskohast rohkem kui kaks korda suurema aastatarbimisega (ca 10 000 kWh/a). Seetõttu võivad objekt 3 liitumispunktis olevad pingeprobleemid olla mõjutatud sama fiidri teisest tarbijast.

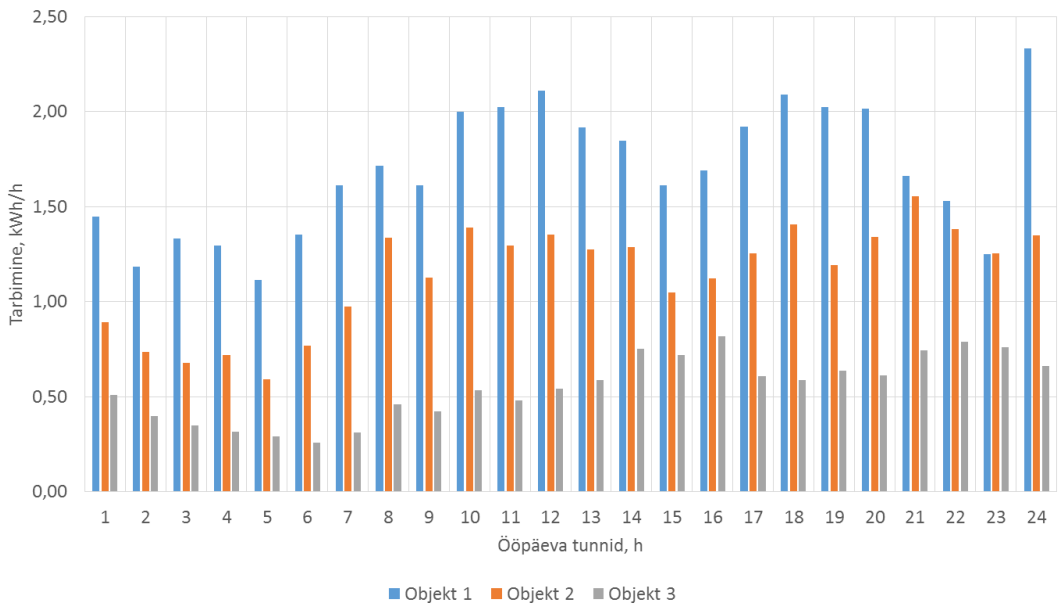


Joonis 4.7. Tolla F3 ja objekti 3 tarbimine mõõteperioodi jooksul.

Objekt 3 mõõtepunktis registreeriti mõõteperioodi maksimaalne võimsus 2,052 kWh/h pühapäeval 27. novembril 2016 kella 21:00 ja 22:00 vahel. Sellele keskmisele võimsusele vastav voolutugevus on 8,92 A.

4.1.4 Mõõdetud objektide tarbimise võrdlus

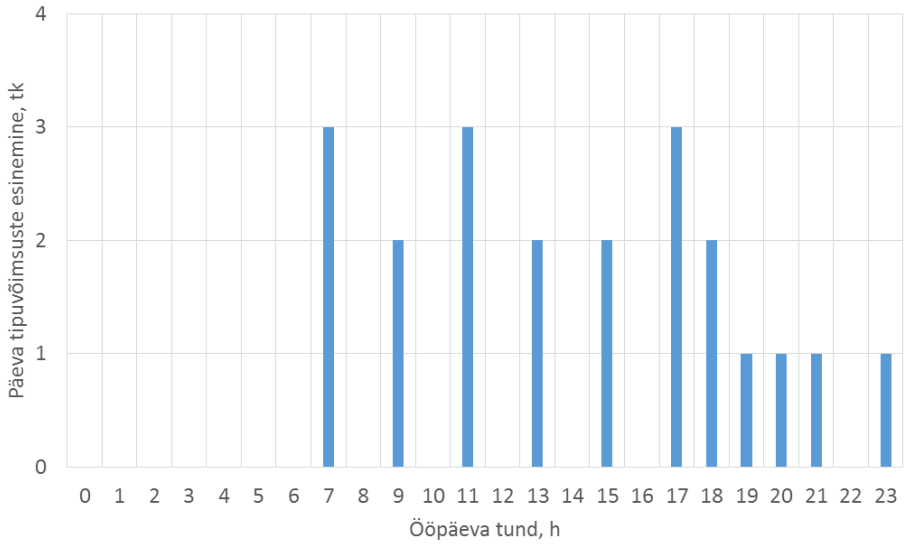
Analüüsides ööpäeva tundide lõikes keskmist tarbimist (Joonis 4.8), on näha, et tarbimisgraafikud sarnanevad keskmise kodutarbija graafikule: eristatavad on hommikune tarbimise tipuaeg ja õhtune tarbimise tipuaeg. Tarbimine on madalaim öösel kella 01:00 ja 06:00 vahel. Objekt 1 liitumispunkti keskmist tarbimist kella 23:00 ja 00:00 vahel on mõjutanud teisipäeva, 8. novembri õhtul olnud suur tarbimisvõimsuse kasv pärast katkestust.



Joonis 4.8. Mõõdetud objektide ööpäeva keskmised tarbimisgraafikud mõõteperioodil.

Erinevate nädalapäevade tipuvõimsuste esinemisaeg kolmes mõõdetud liitumispunktis langeb samuti kokku tarbimise hommikuse ja õhtuse tipuajaga (Joonis 4.9). Kõige sagedamini esinesid tippvõimsused hommikul 07:00-08:00 ja 11:00-12:00 ning õhtul 17:00-18:00.

Eeldatavalt on maksimaalne tarbimine seotud näiteks toidu valmistamisega, sest kahel majapidamisel kolmest on elektripliit. Õhtusel ajal võib tiputarbimisse panustada nii sooja vee tarbimisest tulenev veeboilerite kui ka veepumba sisselülitumine, sest veepumbad ja boilerid on olemas kõigil majapidamistel.



Joonis 4.9. Mõõdetud objektide ööpäeva tipuvõimsuste esinemisaegade jagunemine tundide lõikes.

4.1.5 Objektide varustuskindlus

Elektrilevi poolt esitatud viimase 11 aasta katkestusandmete andmete alusel koostati analüüs kolmele tüüpobjektil. Kõiki objekte ühendab see, et kuni 10 minutilistest katkestustest üle 90% katkestustest on kuni 3 minutit pikad (Tabel 4.1). Objektide 1 ja 3 sarnasus väljendub selles, et 66-67% katkestustest kuni 10 minutilised. Objekti 2 erineb eelnevatest selle poolest, et seal esineb valdavalt 58% juhtudest 10 minutist pikemaajalisi katkestusi.

Tabel 4.1. Kolme- ja kümneminutiliste katkestuste omavaheline suhe ja nende osakaal katkestuste koguarvu

Katkestuse kirjeldus	Vastava kestusega katkestuste osakaal kõikidest katkestustest (vastava kestusega katkestuse arv)		
	Objekt 1	Objekt 2	Objekt 3
≤3 min	65% (88)	41% (68)	65% (83)
≤10 min	67% (91)	42% (69)	66% (84)
	Kuni 3 minutiliste katkestuste osakaal 10 minutilistest katkestustest		
≤3 min/≤10 min	90%	96%	92%

Kuna kuni 10 minutilistest katkestustest üle 90% katkestuste tegelik kestus on alla 3 minuti, siis allolevas tabelis (Tabel 4.2) vaatleme kuni 3 minutiliste katkestuste peamisi põhjuseid, milledeks on määratlemata põhjused ja lühised. Määratlemta põhjused võivad olla tingitud tavapärasest erinevatest ilmaoludest või lõpptarbija poolsest käitumisest.

Tabel 4.2. Kolmeminutiliste katkestuste peamised põhjused

Katkestuse põhjus	Objekt 1	Objekt 2	Objekt 3
Määratlemata	65%	67%	70%
Lühis	17%	15%	13%
Kaitse rakendumine	11%	<1%	1%
Isolatsiooni ülelöögid, liinikoridori rike, kaabli vigastumine - liin, puu või oksad liini vastas, isolaatori purunemine, juhtme katkemine	6%	14%	6%

4.2 Objektide pinge kvaliteedi analüüs

4.2.1 Analüüsi tulemused Objektil 1, Leanderi 10/0,4 kV alajaama F4

4.2.1.1 Sagedus

Sagedus on ühendatud elektrivõrgus üldjuhul väga stabiilne ja tarbija elektriseadmeid ning elektritarbimist kuidagi ei mõjuta. Tavaliselt on sageduse hälbed vähemalt 10 korda väiksemad kui standardis lubatud hälbed ±1% nimisagedusest 50 Hz.

4.2.1.2 Pinge suurus ja pingenivoo

Pinge suurus tarbija liitumispunktis on kõige olulisem parameeter, mis otseselt mõjutab elektriseadmete tööd. Tarbijate elektriseadmed on tavaliselt nimipingega 230/400 V, kuid vahel ka 220/380 V või 240 V.

Ideaalsel juhul on pinge võrdne võrgu nimipingega, reaalselt kõigub pinge tegelik väärtus nii üles- kui ka allapoole nimipinget. Nii elektritarbimise kui ka võimsuskadude seisukohast on soovitatav, et pinge ei kõiguks väga suures ulatuses. Soovitavalt peaks pinge olema nimipinge lähedane, nimipingest mitte oluliselt kõrgem, kuid võib olla sellest kuni 5% madalam. Nimipingest kõrgem pinge põhjustab lisakadusid elektriseadmetes, eriti elektrimootorites ja trafodes ning vähendab elektriseadmete tööiga.

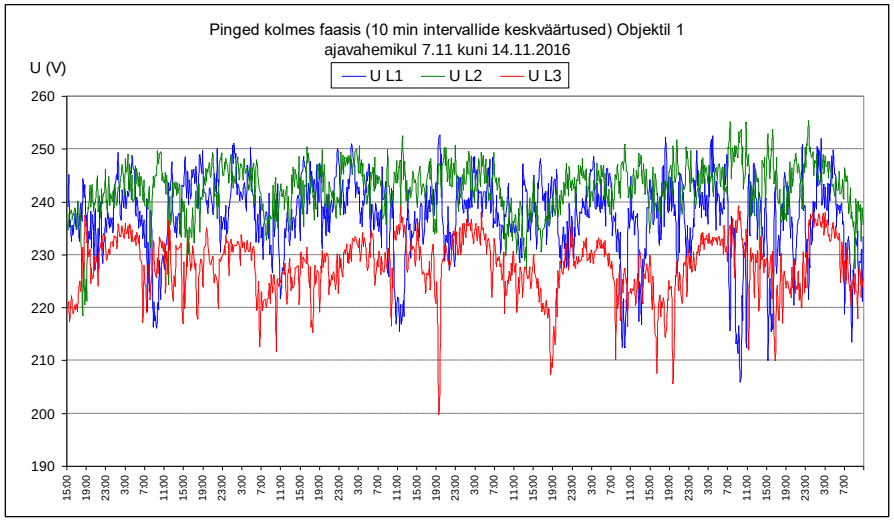
Antud juhul on toitepinge tugevasti varieeruv, ühe nädala keskmine pinge on küll nimipinge lähedane, ca 235 V, kuid kõigub vahemikus 200 V kuni 256 V.

Seega pinge mahub küll 95% ulatuses vaatlusvahemikest standardiga lubatud piiridesse 207 V kuni 253 V, kuid tarbijale võib nii suur pingekõikumine põhjustada probleeme ja on kindlasti visuaalselt märgatav ka valgustite valgusvoos.

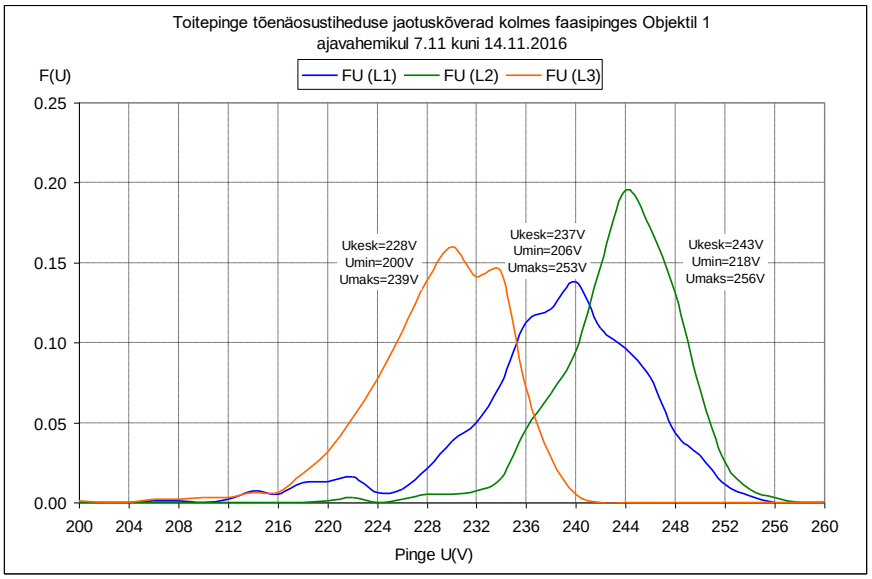
Probleemid võivad tekkida näiteks mingi võimsama ühefaasilise elektriseadme kasutamisel või mitme elektriseadme lülitamisel ühte faasi. Sel juhul pinge antud faasis langeb alla 207 V ja teistes faasides võib samaaegselt tõusta üle 253 V.

Kolme faasipinge 10min intervallide keskmised väärtused on esitatud (Joonis 4.10) ning faasipingete tõenäosustiheduse jaotuskõverad on esitatud (Joonis 4.11). Joonistelt selgub, et faasipinged on üksteisest tugevasti erinevad. Faasipingete keskmine väärtus ulatub 230 V-st kuni 244 V-ni. Samuti on pinged suuresti hajuvad. Hajumise ulatus on ligikaudu vahemikus 200 V kuni 256 V.

Põhjuseks on ilmselt suur toiteahela takistus, võib-olla ka suur takistus neutraaljuhis (PEN) ning asümmeetriline pinge fiidri alguses (trafo madalpingeklemmidel).



Joonis 4.10. Toitepinge kolmes faasis Objektil 1



Joonis 4.11. Toitepingete tõenäosustihedused Objektil 1

Kui pingenivoo on liiga kõrge või madal, siis mõnel juhul on võimalik seda reguleerida trafo astmelüliti abil, s.o. ±2,5% võrra. Antud juhul pole see võimalik, sest pingete hajumine on suur. Lisaks sellele on pinge liini alguses kindlasti kõrgem, kui antud mõõtepunktis liini lõpus. Tõenäoliselt on pinge fiidri alguses teatud ajavahemikel isegi liiga kõrge. Pingenivood vähendades jääks pinge liini lõpus koormuse puhul liiga madalaks.

Joonis 4.12 on esitatud tarbija voolud kolmes faasis. Sellelt selgub, et tarbitavad voolud olid vahemikus 0-st kuni 8,4 A-ni. Samuti selgub, et kõik tarbija elektriseadmed on ühefaasilised, mida antud ajavahemikul kasutati.

Joonis 4.13 on esitatud Objekti 1 pinge/voolu tunnusjoon faasi L1 kohta. Selle järgi saab määrata tõenäolise pingemuutuse vastavalt voolumuutusele ning nende alusel saame arvutada ühefaasiliste toitesilmuste ligikaudse näivtakistuse järgmiselt. Sarnaselt faasile L1 on arvutatud välja ka teiste faaside kohta ligikaudne toitesilmuse näivtakistus :

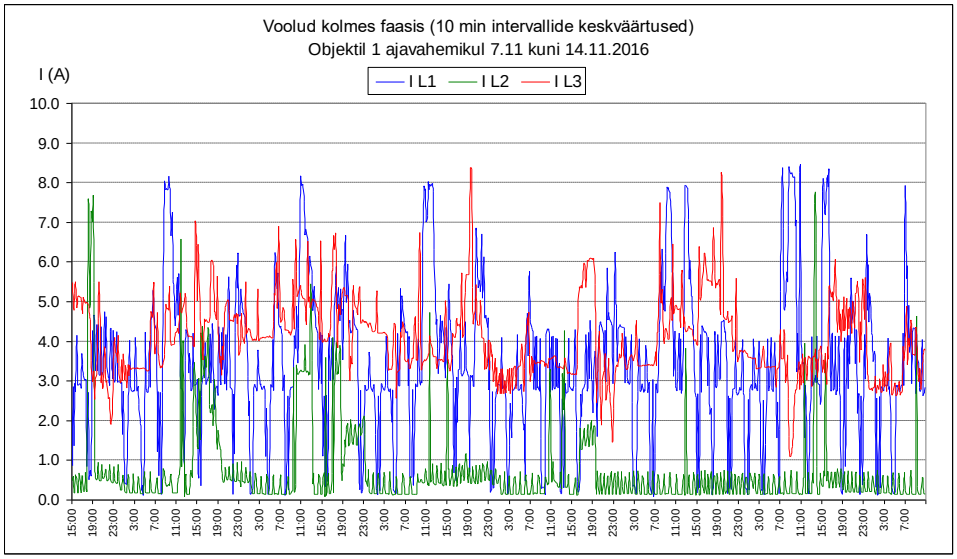
$Z_{L1N} \approx \Delta U_{L1N}/\Delta I_{L1} \approx 26/8{,}1 \approx 3{,}2\Omega$.

$Z_{L2N} \approx \Delta U_{L2N}/\Delta I_{L2} \approx 21/7{,}5 \approx 2{,}8\Omega$.

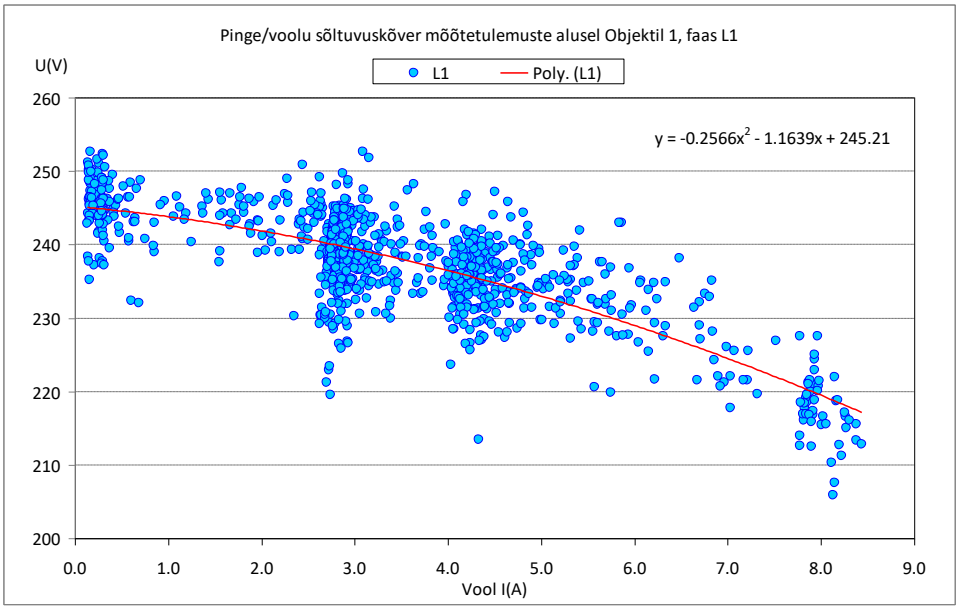
$Z_{L3N} \approx \Delta U_{L3N}/\Delta I_{L3} \approx 30/7{,}3 \approx 4{,}1\Omega$.

Antud tulemusi on võimalik võrrelda Elektrilevi andmetega Objekti 1 liitumispunkti kohta.

Saadud toitesilmuse näivtakistused on väga suured. Seetõttu näiteks ühefaasilise koormusvoolu 10 A puhul tekib toiteahelas pingelang keskmiselt 30 V. Seega suuremat koormust kui 10 A faasi kohta polegi antud liitumispunktis võimalik kasutada.



Joonis 4.12. Voolud kolmes faasis Objektil 1



Joonis 4.13. Pinge/voolu tunnusjoon faasis L1 Objektil 1

4.2.1.3 Pinge lühiajalised võrgusageduslikud hälbed

Pingehälbed on nii ajaliselt kui ka ulatuselt juhusliku iseloomuga. Osa neist põhjustab tarbija (klient) ise, osa neist põhjustavad teised samal MP liinil või sama trafo MP poolel asuvad tarbijad (kliendid). Osa pingehälvetest tulenevad keskpinge või kõrgepinge võrgust. Pinge lühiajalised võrgusageduslikud hälbed on tavaliselt kestusega alates 10 ms kuni 3 s. Tabel 4.3 on esitatud statistiline ülevaade pingehälvete kohta Objektil 1.

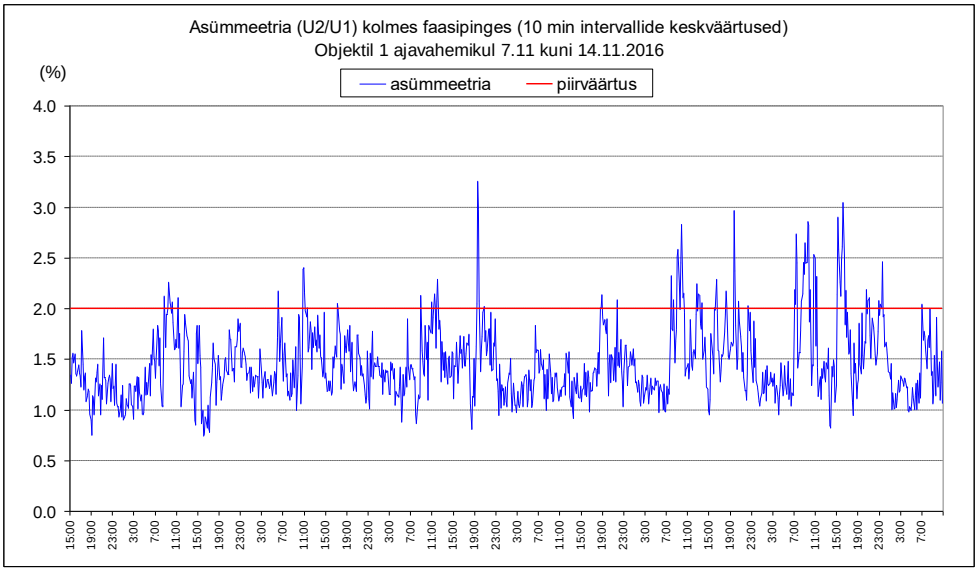
Tabel 4.3. Pingehälbed vaatlusnädala vältel Objektil 1

Pingelohu kestus ja sügavus	20 ms	20...100 ms	100...500 ms	0,5...1 s	1...3 s	3...60 s	üle 60 s
10 ... < 15%	2	13	331	4	13	162	35
15 ... < 30%	0	0	155	13	4	133	22
30 ... < 60%	0	0	0	0	0	0	0
60 ... < 99%	0	0	0	0	0	0	0
Katkestused	0	0	0	0	0	0	0
Pingemuhu kestus	20 ms	20...100 ms	100...500 ms	0,5...1 s	1...3 s	3...60 s	üle 60 s
> 15%	0	0	0	0	0	0	0
10 ... < 15%	0	1	28	11	21	309	170

Tabelist selgub, et pingehälvetest esines antud mõõtepunktis arvukalt pingelohkusid ja pingemuhkusid, mis väljusid pingevahemikust ±10% U_{nimi} ehk vahemikust 207 kuni 253 V. Pingelohud olid sügavusega kuni ca 170 V. Pingelohkude kestus oli valdavalt üle 100 ms. Kõige rohkem esines pingelohke kestusega 0,1s kuni 0,5s ja 3s kuni 60s. Liigpingeid esines samuti arvukalt, pingemuhkude ulatus oli kuni 264 V ja kestus oli samuti valdavalt üle 100 ms. Kõige enam oli pingemuhke kestusega 3s kuni 60s.

4.2.1.4 Toitepingete asümmeetria

Pingete asümmeetria kolmes faasis ehk faasipingete vastujärgnevuskomponendi suhe pärijärgnevuskomponenti oli keskmiselt 1,5% ja vahemikus 0,7…3,3% (Joonis 4.14). Standardiga EVS-EN:50160 on lubatud kuni 2%. Soovitatavalt ei tohiks asümmeetria ületada 1%. Seega tegelik asümmeetria tase ei vasta nii standardile kui ka soovituslikule väärtusele. Kuivõrd tarbijate elektriseadmed on ilmselt kõik ühefaasilised, siis asümmeetria iseenesest täiendavaid lisakadusid ei põhjusta.

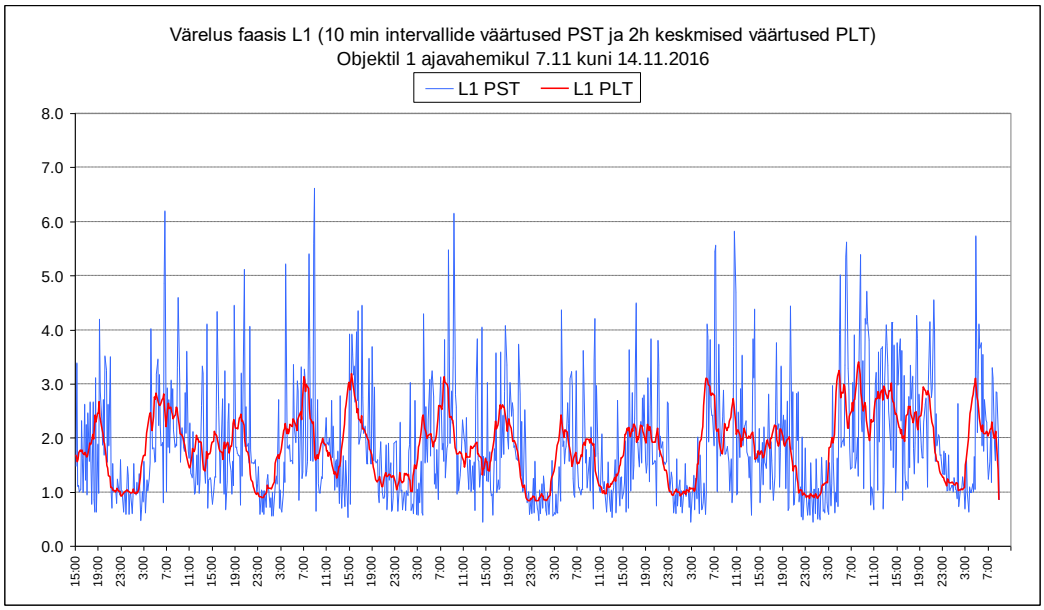


Joonis 4.14. Pingete asümmeetria Objektil 1

4.2.1.5 Värelus ehk flikker

Valguse värelus ehk flikker on energiavoo häiring, mida põhjustab valgustite toitepinge pidev muutumine. Kõige häirivam on valguse värelus, mille sagedus on 8…9 Hz, sellest sagedusest üles- ja allapoole värelus väheneb. Värelust tajub inimene valgusvoo muutustena.

Väreluse intensiivsust arvutatakse kui pingekõikumise suhet keskmise pinge efektiivväärtusesse. Tavaliselt mõõdetakse värelust kahes erineva pikkusega intervallis: 10min intervallides nn lühiajaline värelus P_{ST} ja 2h intervallides nn pikaajaline värelus P_{LT}. Normitud on ainult pikaaajalise väreluse intensiivsus. Standardi kohaselt ei tohi normaaltingimustel väreluse intensiivsus 2h väärtusena ületada väärtust $P_{LT} = 1$ tõenäosusega 95% nädalasest mõõteperioodist. Antud juhul oli väreluse intensiivsus vahemikus 0,8 kuni 3,5 (Joonis 4.15), seejuures kõrgem päeval ja madalam öösel. Lühiajalise väreluse intensiivsus 10 minuti intervallides on veelgi kõrgem ja ulatub kuni 6,7-ni. Seega ülatab värelus oluliselt soovitusliku standardiga lubatud normi 1,0.



Joonis 4.15. Värelus faasis L1 Objektil 1

4.2.1.6 Järeldused Objekti 1 kohta

- ***Pingete hajuvus on suur (pinged kõiguvad vahemikus 200 V-st kuni 260 V-ni), sest toitesilmuse näivtakistused on väga suured, vahemikus 2,8…4,1 Ω. Toiteahelas tekkiva pingelangu tõttu suuremat voolukoormust kui 10 A faasi kohta pole antud liitumispunktis võimalik kasutada.***
- ***Pingete asümmeetria kolmes faasis ehk faasipingete vastujärgnevuskomponendi suhe pärijärgnevuskomponenti on vahemikus 0,7…3,3%. Seega ületatakse soovituslikus standardis EVS-EN 50160 esitatud piirväärtust 2%.***
- ***Väreluse intensiivsus eri faasides vahemikus 0,8 kuni 3,5, seejuures kõrgem päeval ja madalam öösel. Kirjeldatud näit ületab standardis EVS-EN 50160 esitatud piirväärtust 1,0.***
- ***Mõõtepunktis esines arvukalt pingelohke ja muhke. Pingelohud olid sügavusega kuni ca 170 V ja kestusega valdavalt üle 100 ms. Kõige rohkem esines pingelohke kestusega 0,1 s kuni 0,5 s ja***

3 s kuni 60 s. Pingemuhkude ulatus oli kuni 264 V ja kestus oli valdavalt üle 100 ms. Kõige enam oli pingemuhke kestusega 3 s kuni 60 s.

4.2.2 Analüüsi tulemused Objektil 2, Vastja 10/0,4 kV alajaama F2

4.2.2.1 Sagedus

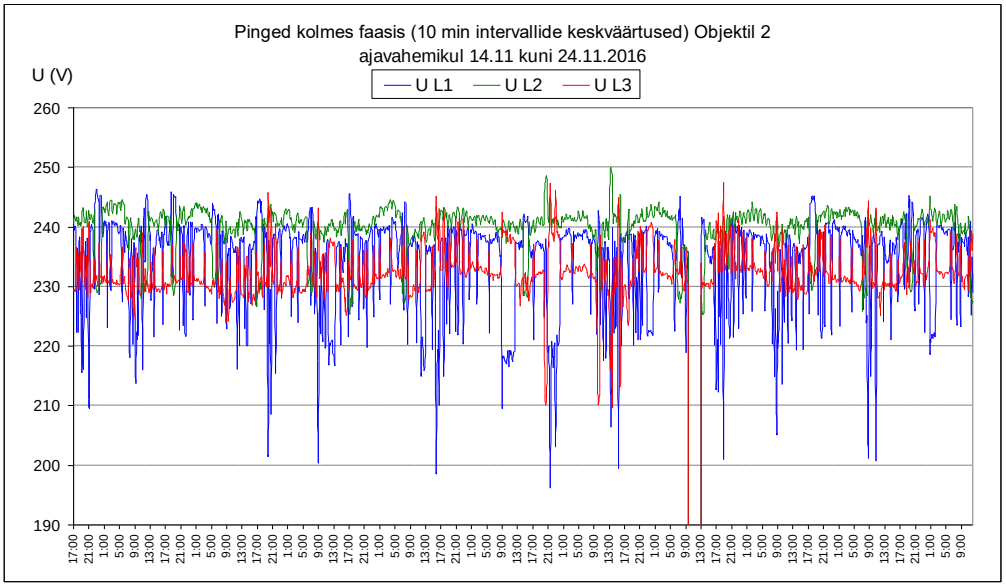
Sagedus on üldjuhul väga stabiilne ja tarbija elektriseadmeid ning elektritarbimist kuidagi ei mõjuta. Reeglina on sageduse hälbed vähemalt 10 korda väiksemad kui standardis lubatud hälbed ±1% nimisagedusest 50 Hz.

4.2.2.2 Pinge suurus ja pingenivoo

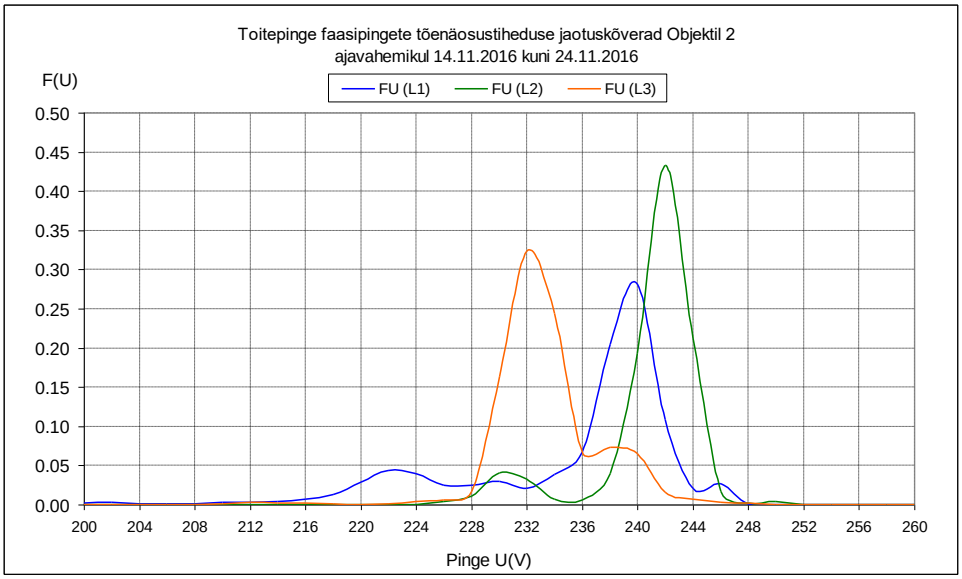
Antud juhul on toitepinge tugevasti hajuv, ühe nädala keskmine pinge on küll nimipinge lähedane, ca 236 V, kuid kõigub vahemikus 196 V kuni 250 V. Seega pinge mahub küll 95% ulatuses vaatlusvahemikest standardiga lubatud piiridesse 207 V kuni 253 V, kuid tarbijale võib nii suur pingekõikumine põhjustada probleeme ja on kindlasti visuaalselt märgatav ka valgustite valgusvoos. Probleemid võivad tekkida näiteks mingi võimsama ühefaasilise elektriseadme kasutamisel või mitme elektriseadme lülitamisel ühte faasi. Sel juhul pinge antud faasis langeb alla 207 V ja teistes faasides võib samaaegselt tõusta üle 253 V.

Kolme faasipinge 10min intervallide keskmised väärtused on esitatud (Joonis 4.16) ning faasipingete tõenäosustiheduse jaotuskõverad on esitatud (Joonis 4.17). Joonistelt selgub, et faasipinged on üksteisest tugevasti erinevad. Faasipingete keskmine väärtus ulatub 232 V-st kuni 240 V-ni. Samuti on pinged suuresti hajuvad. Hajumise ulatus on ligikaudu vahemikus 196 V kuni 250 V.

Põhjuseks on ilmselt suur toiteahela takistus, võib-olla ka suur takistus neutraaliahleas ning asümmeetriline pinge fiidri alguses (trafo madalpingeklemmidel).



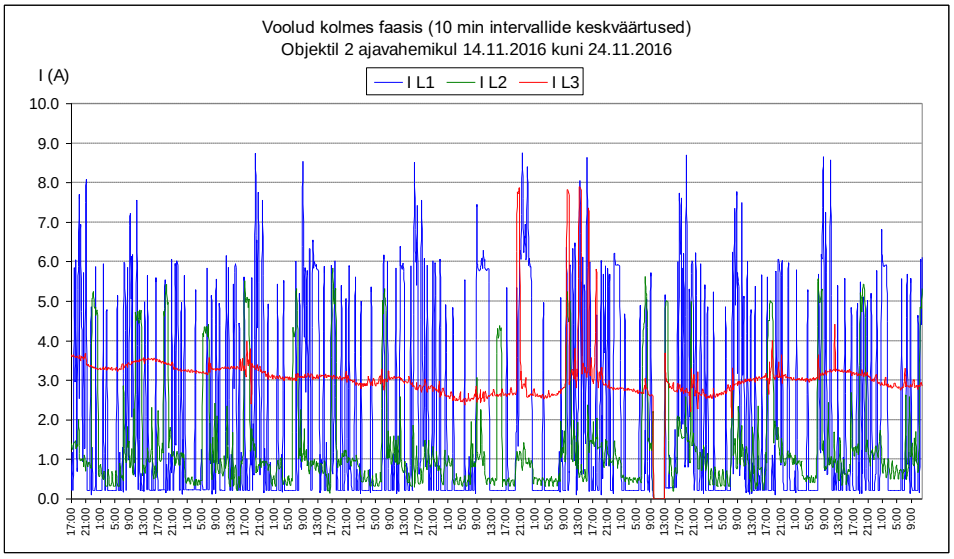
Joonis 4.16. Toitepinged kolmes faasis Objektil 2



Joonis 4.17. Toitepingete tõenäosustihedused Objektil 2

Kui pingenivoo on liiga kõrge või madal, siis mõnel juhul on võimalik seda reguleerida trafo astmelüliti abil, s.o. ±2,5% või ±5% võrra. Antud juhul pole see võimalik, sest pingete hajumine on väga suur ning pinged faasides L2 ja L3 on niigi liiga kõrged. Lisaks sellele on pinge liini (fiidri) alguses kindlasti kõrgem, kui antud mõõtepunktis (liini lõpus). Tõenäoliselt on pinge fiidri alguses teatud ajavahemikel isegi liiga kõrge. Pingenivood vähendades jääks pinge liini lõpus koormuse puhul liiga madalaks.

Joonis 4.18 on esitatud tarbija voolud kolmes faasis. Sellelt selgub, et tarbitavad voolud olid vahemikus alates 0,2 A-st kuni 8,8 A-ni. Samuti selgub, et kõik tarbija elektriseadmed on ühefaasilised, mida antud ajavahemikul kasutati.



Joonis 4.18. Voolud kolmes faasis Objektil 2

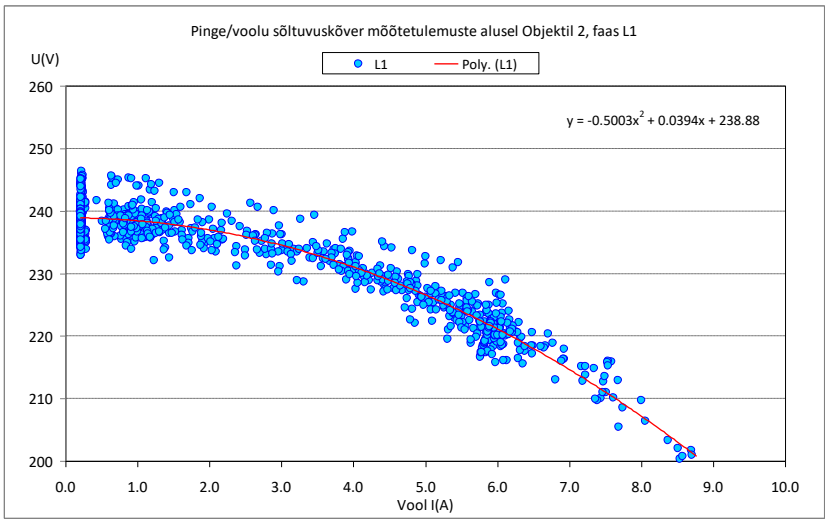
Joonis 4.19 on esitatud Objekti 2 pinge/voolu tunnusjoon faasi L1 kohta. Selle järgi saab määrata tõenäolise pingemuutuse vastavalt voolumuutusele ning nende alusel saame arvutada ühefaasiliste toitesilmuste ligikaudse näivtakistuse järgmiselt. Sarnaselt faasile L1 on arvutatud välja ka teiste faaside kohta ligikaudne toitesilmuse näivtakistus:

$Z_{L1N} \approx \Delta U_{L1N}/\Delta I_{L1} \approx 38/8{,}7 \approx 4{,}4\Omega$.

$Z_{L2N} \approx \Delta U_{L2N}/\Delta I_{L2} \approx 17/5{,}8 \approx 3{,}0\Omega$.

$Z_{L3N} \approx \Delta U_{L3N}/\Delta I_{L3} \approx 22/5{,}8 \approx 3{,}8\Omega$.

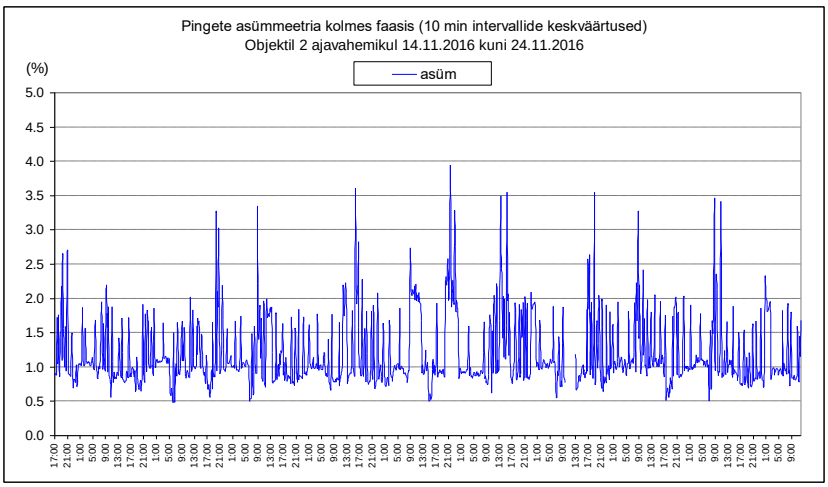
Mõõtmise tulemusel saadud reaalsed toitesilmuse näivtakistused on väga suured. Seetõttu näiteks ühefaasilise koormusvoolu 10 A puhul tekib toiteahelas pingelang ca 30 kuni 44 V. Seega suuremat koormust kui 10 A faasi kohta pole antud liitumispunktis võimalik kasutada. Antud tulemusi saab võrrelda Elektrilevi andmetega Objekti 2 liitumispunkti kohta ja kasutada tulemusi arvutusmetoodikatesse parenduste sisseviimiseks. Takistuste mõningased erinevused võivad olla põhjustatud mitmetest asjadest sh liinide ja trafode enda ebasümmeetriast, liinide amortiseerumisest jpm.



Joonis 4.19. Pinge/voolu tunnusjoon faasis L1 Objektil 2

4.2.2.3 Toitepingete asümmeetria

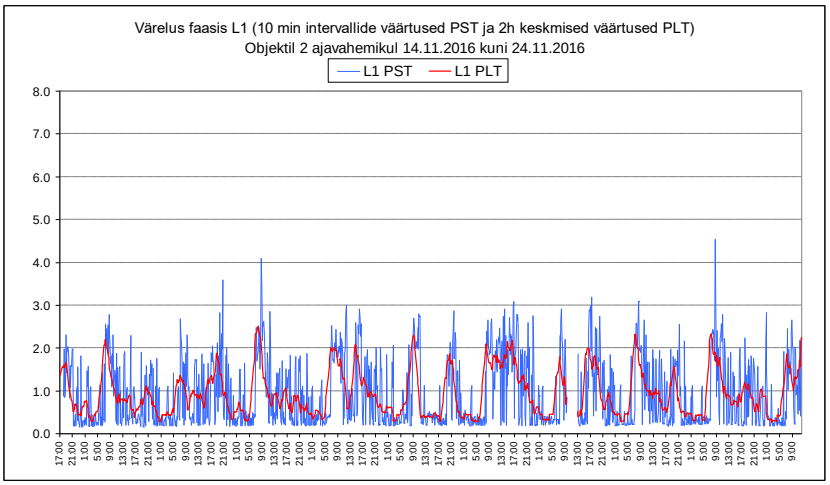
Pingete asümmeetria kolmes faasis ehk faasipingete vastujärgnevuskomponendi suhe pärijärgnevuskomponenti on keskmiselt 1,5% ja vahemikus 0,5…3,9% (Joonis 4.20). Soovitusliku standardiga EVS-EN 50160 on lubatud kuni 2%. Soovitatavalt ei tohiks asümmeetria ületada 1%. Seega tegelik asümmeetria tase ei vasta nii standardile kui ka soovituslikule normile. Kuivõrd tarbijate elektriseadmed on ilmselt kõik ühefasilised, siis asümmeetria iseenesest täiendavaid lisakadusid ei põhjusta.



Joonis 4.20. Pingete asümmeetria Objektil 2

4.2.2.4 Värelus ehk flikker

Antud juhul oli väreluse intensiivsus faasis L1 vahemikus 0,3 kuni 2,5 (Joonis 4.21), seejuures kõrgem päeval ja madalam öösel. Lühiajalise väreluse väärtus ulatub kuni 4,5-ni. Seega ülatab värelus oluliselt standardiga lubatud normi 1,0.



Joonis 4.21. Värelus ehk flikker faasis L1 Objektil 2

4.2.2.5 Järeldused Objekti 2 kohta

- ***Pinge hajuvus on suur (pinge kõigub vahemikus 196 V-st kuni 250 V-ni), sest toitesilmuse näivtakistused on väga suured, ca 3,0…4,4 Ω. Toiteahelas tekkiva pingelangu tõttu suuremat voolukoormust kui 10 A faasi kohta pole antud liitumispunktis võimalik kasutada.***
- ***Pingete asümmeetria kolmes faasis ehk faasipingete vastujärgnevuskomponendi suhe pärijärgnevuskomponenti on vahemikus 0,7…3,3%. See ületab standardis EVS-EN 50160 toodud piirväärtust (2%).***
- ***Väreluse intensiivsus eri faasides vahemikus 0,3 kuni 2,5, seejuures kõrgem päeval ja madalam öösel. Seega ületatakse standardis EVS-EN 50160 toodud piirväärtust 1,0.***

4.2.3 Analüüsi tulemused Objektil 3, Tolla 10/0,4 kV alajaama F3

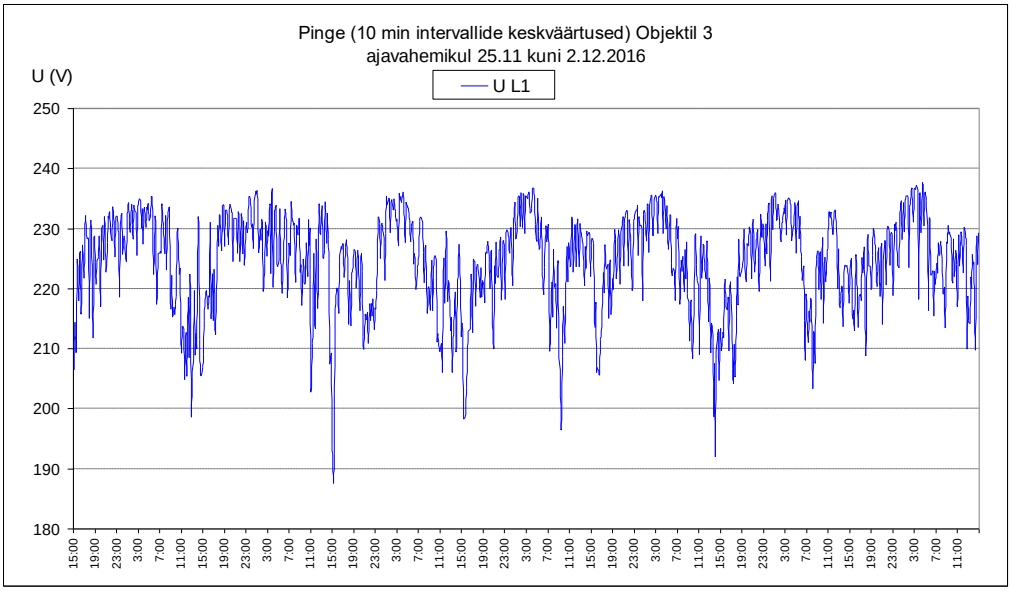
4.2.3.1 Sagedus

Sagedus on üldjuhul väga stabiilne ja tarbija elektriseadmeid ning elektritarbimist kuidagi ei mõjuta. Reeglina on sageduse hälbed vähemalt 10 korda väiksemad kui standardis lubatud hälbed ±1% nimisagedusest 50 Hz.

4.2.3.2 Pinge suurus ja pingenivoo

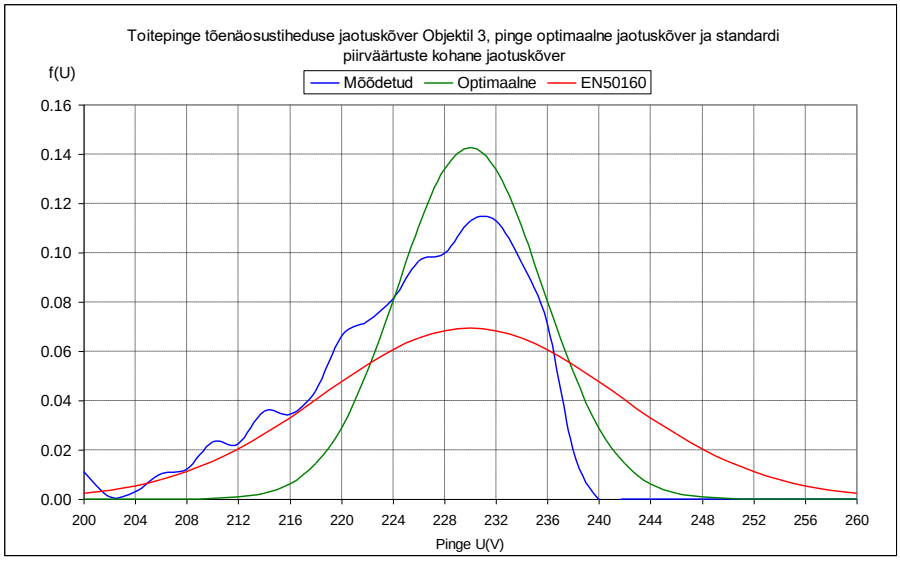
Objekt 3 on ühefaasiline tarbija, mõõtetulemused on ühe faasipinge ja ühe voolu kohta. Seetõttu ka näiteks pinge neutraalinihet määrata ei saa. Antud juhul on toitepinge tugevasti hajuv, ühe nädala keskmine pinge on küll nimipinge lähedane, ca 224,6 V, kuid kõigub vahemikus 187,6 V kuni 237,5 V. Seega pinge mahub küll 95% ulatuses vaatlusvahemikest standardiga lubatud piiridesse 207 V kuni 253 V, kuid tarbijale võib nii suur pingekõikumine põhjustada probleeme ja on kindlasti visuaalselt märgatav ka valgustite valgusvoos.

Probleemid võivad tekkida näiteks mingi võimsama ühefaasilise elektriseadme kasutamisel või mitme elektriseadme üheaegsel kasutamisel. Sel juhul pinge antud faasis langeb alla 200 V. Põhjuseks on suur toiteahela takistus, võib-olla ka madal pinge trafo klemmidel. Faasipinge 10 minuti intervallide keskmised väärtused on esitatud (Joonis 4.22) ning pinge tõenäosustiheduse jaotuskõver on esitatud (Joonis 4.23).



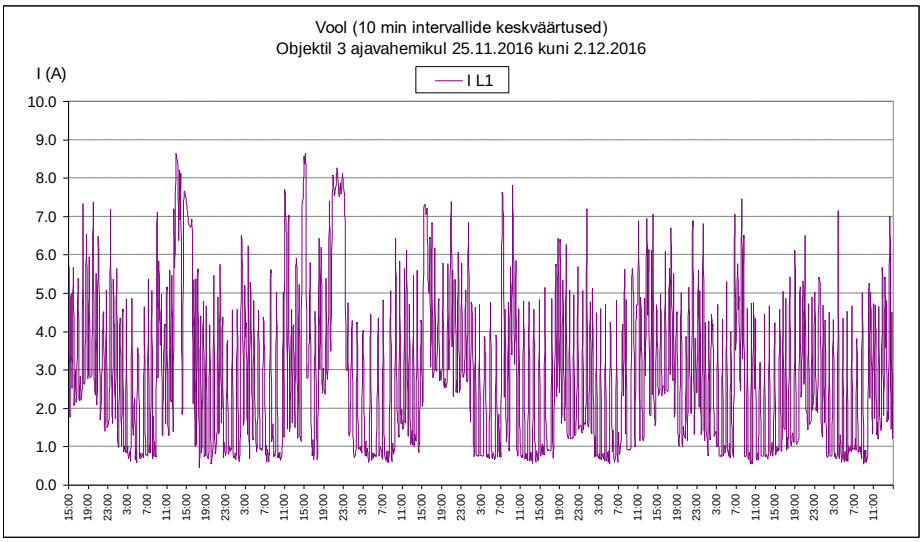
Joonis 4.22. Toitepinge Objektil 3

Kui pingenivoo on liiga kõrge või madal, siis mõnel juhul on võimalik seda reguleerida trafo astmelüliti abil, s.o. ±2,5% või ±5% võrra. Antud juhul pole see võimalik, sest pingete hajumine on väga suur. Lisaks sellele on pinge liini (fiidri) alguses kindlasti kõrgem, kui antud mõõtepunktis (liini lõpus). Tõenäoliselt on pinge fiidri alguses teatud ajavahemikel isegi liiga kõrge. Pingenivood vähendades jääks pinge liini lõpus koormuse puhul liiga madalaks.



Joonis 4.23. Toitepinge tõenäosustihedus Objektil 3

Joonis 4.24 on esitatud tarbija voolud kolmes faasis. Sellelt selgub, et tarbitavad voolud olid vahemikus 0,5 A-st kuni 8,6 A-ni. Samuti selgub, et kõik tarbija elektriseadmed on ühefaasilised, mida antud ajavahemikul kasutati.

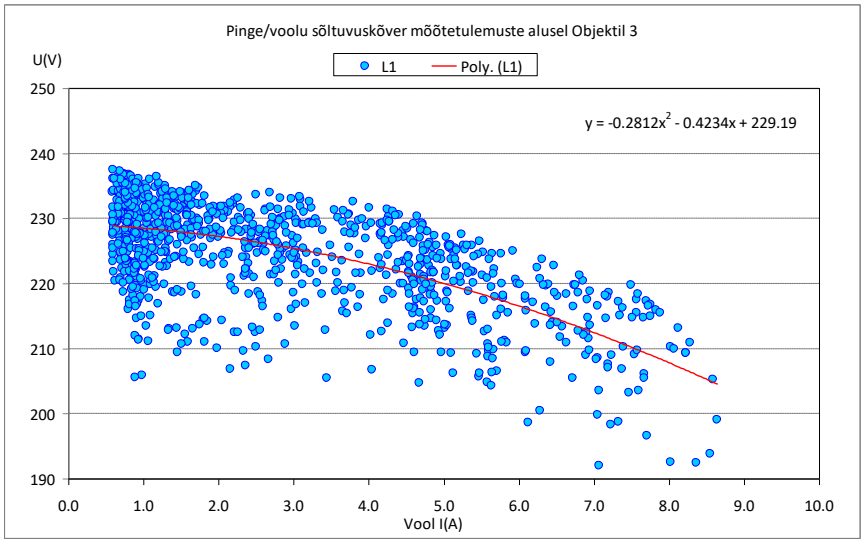


Joonis 4.24. Vool Objektil 3 ajavahemikul 25.11.2016 kuni 2.12.2016

Joonis 4.25 on esitatud Objekti 3 pinge/voolu köver ehk tunnusjooned. Selle järgi saame määrata tõenäolise pingemuutuse vastavalt voolumuutusele ning arvutada ühefaasilise toitesilmuste ligikaudse näivtakistuse järgmiselt:

$Z_{L1N} \approx \Delta U_{L1N}/\Delta I_{L1} \approx 19/9 \approx 2{,}1\ \Omega$.

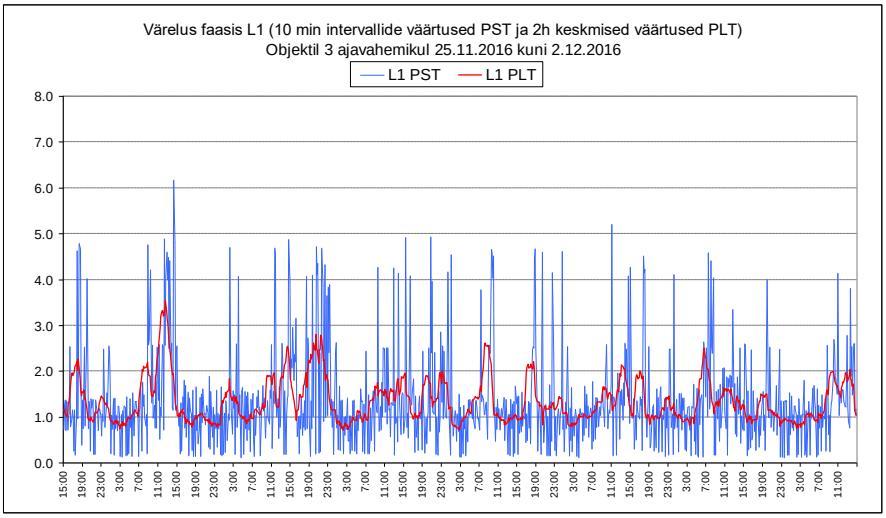
Saadud toitesilmuse näivtakistus on suur, vähemalt 2x suurem soovitatavast takistuse piirväärtusest 1 Ω. Antud tulemust saab võrrelda Elektrilevi andmetega Objekti 3 liitumispunkti kohta. Seetõttu näiteks koormusvoolu 10 A puhul tekib toiteahelas pingelang ca 21 V ja koormusvooluga 16 A on pingelang 32 V. Seega suuremat koormust kui 16 A pole antud liitumispunktis võimalik kasutada.



Joonis 4.25. Pinge/voolu tunnusjoon Objektil 3

4.2.3.3 Värelus ehk flikker

Antud juhul oli väreluse intensiivsus faasis L1 vahemikus 0,8 kuni 3,4 (Joonis 4.26), seejuures kõrgem päeval ja madalam öösel. Lühiajalise väreluse väärtus ulatub kuni 6,1-ni. Seega ülatab värelus oluliselt standardiga lubatud normi 1,0.



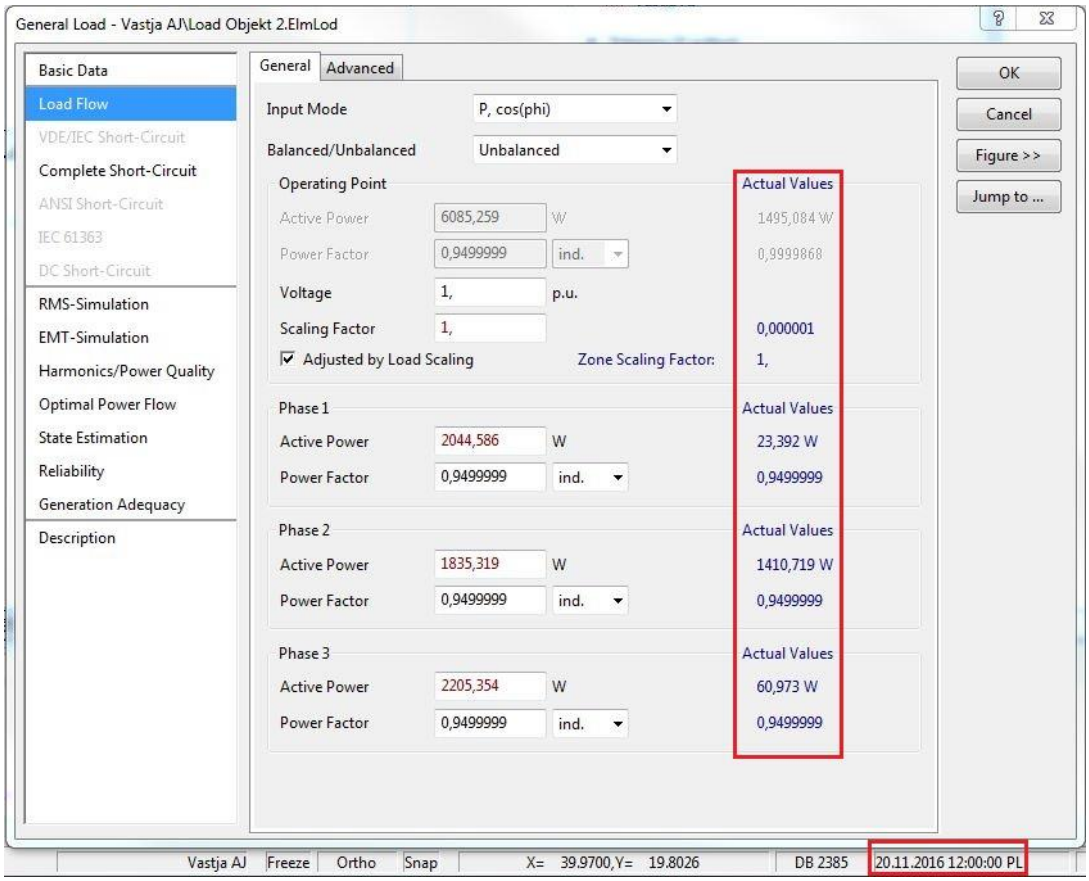
Joonis 4.26. Värelus ehk flikker Objektil 3

4.2.3.4 Järeldused Objekti 3 kohta

- ***Toitesilmuse näivtakistus on suur, ca 2,1 Ω. Toiteahelas tekkiva pingelangu tõttu suuremat voolukoormust kui 10 A faasi kohta pole antud liitumispunktis soovitav kasutada.***
- ***Suur toitesilmuse takistus põhjustab suurt pinge hajuvust, pinge kõigub vahemikus 186 V-st kuni 240 V-ni.***
- ***Väreluse intensiivsus on vahemikus 0,8 kuni 3,4, seejuures kõrgem päeval ja madalam öösel. Standardiga EVS-EN 50160 on lubatud kuni 1,0. See parameeter ületab tunduvalt standardis toodud piirväärtust.***

4.3 Lahendusalternatiivide võrdlus

Vastavalt eelnevale analüüsile on kõige suuremaks probleemiks suur pinge hajuvus ja sellega kaasnev flikker. Pinge hajuvuse vähendamise kontrollimiseks koostati simulatsioonid DigSilent Power Factory tarkvara abil. Järgneval joonisel (Joonis 4.27) on näha simulatsioonikeskkonna aken koos punases raamis esile toodud simulatsioonitulemustega.



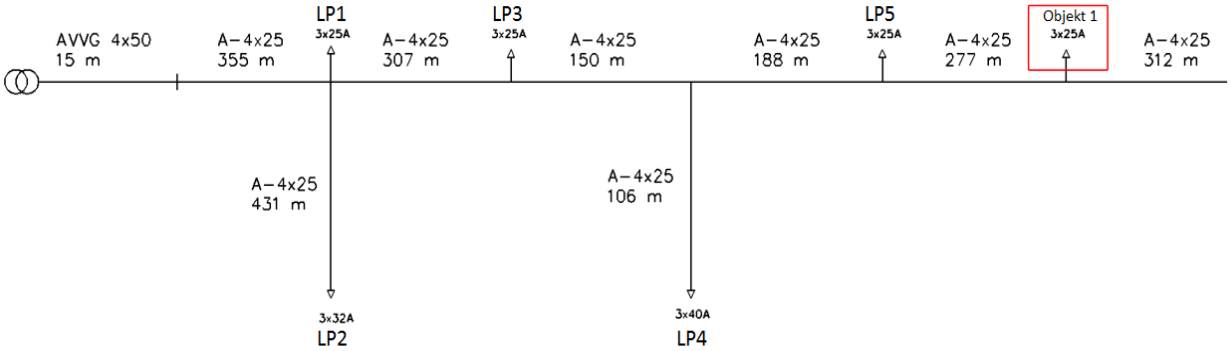
Joonis 4.27. DigSilent simulatsioonikeskkond

Vastavalt kolmefaasilisele ühesekundilisele koormusprofiilile arvutati DigSilent tarkvara abil välja pinge suhtelised väärtused liitumis- ja hargnemispunktide kohta olukorras kui ei kasutata pinget ühtlustavaid seadmeid ja olukordadele kui seamdeid kasutatakse. Kõik simulatsioonid viidi läbi UPS-seadmele, pingestabilisaatorile/dünaamilisele pingetaastajale (PS/DVR-seade) ja koormust ühtlustavale trafole (KÜT). Seadmed paigaldati simulatsiooni käigus erinevatesse liitumis- või hargnemispunktidesse, et määrata pingeprobleemi lahendamise seisukohalt sobivaim asukoht. Edaspidistes simulatsiooni tulemustes kasutatakse suhtelisi suuruseid, kus 1 p.u. = 400 V (liinipinge) ja 230 V (faasipinge).

Simulatsioonidel olid aluseks Objekti 1, 2 ja 3 faaside mõõteandmed, mille granulaarsus oli üks sekund. Objektide faaside mõõteandmete proportsiooni baasil tuletati objektiga samal fiidril olevate teiste liitumispunktide tunniandmetest sekundiandmed. Metoodika eeliseks on see, et ebasümmeetriad ja pingeprobleemid fiidris võimenduvad. Simulatsionis kasutatud koormuse ebasümmeetriat reaalselt esineb äärmiselt harva.

4.3.1 Simulatsiooni tulemused Objektil 1, Leanderi 10/0,4 kV alajaama F4

Enne simulatsioonide käivitamist tuvastati mõõteandmete alusel Objekti 1 puhul pingeprobleem, kuna suhteline pingeväärtus langes faasides L1, L2 ja L3 vastavalt väärtuseni 0,82; 0,87 ja 0,73. Keskmised pinged seejuures on nimetatud faasides 0,98; 1,03 ja 0,83. Reaalset tarbimist liitumispunktides LP1 ja LP5 ei olnud. Objekti 1 põhimõtteskeem on esitatud alloleval joonisel (Joonis 4.28), kus simulatsiooni käigus paigaldati pingetasandusseadmed punktidesse LP2, LP3, LP4 ja Objekt 1.



Joonis 4.28. Objekti 1 põhimõtteskeem

Fiidri koormused jaotuvad liitumispunktide vahel vastavalt allolevale tabelile (Tabel 4.4). Suurem osa tarbimisest ehk koormusest on fiidri alajaamapoolses kolmandikus. Koormuste ebaühtlane jagunemine liitumispunktide vahel ehk koormuskese avaldab otsest mõju ka pingetasandusseadmete simulatsioonitulemustele.

Tabel 4.4. Koormuste jaotumine fiidril Leanderi 10/0,4 kV alajaama F4

Liitumispunkt	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5	Objekt1
Osakaal tarbimisest	0%	57%	19%	7%	0%	16%

DVR-seadme (pingestabilisaatori) simulatsioonidest kokkuvõtliku ülevaate annab allolev tabel (Tabel 4.5). Simulatsiooni käigus paigutati PS/DVR-seade 5 erinevasse kohta. Vastavalt simulatsioonile on pingeväärtuste analüüsist tulenevalt parim asukoht PS/DVR-seadme paigaldamiseks on liitumispunkt LP1 ehk liini esimene kolmandik. Põhjuseks on see, et üle poole koormusest asub liini esimeses kolmandikus.

Tabel 4.5. Suhtelised pingeväärtused PS/DVR -seadme paigaldusel

Seadme asukoht	Suhteline miinimumpinge liitumispunktide eri faasides, p.u.								
	LP2			LP4			Objekt 1		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Seadmeta	0,822	0,875	0,732	0,835	0,876	0,741	0,825	0,875	0,735
LP1	0,917	0,963	0,950	0,927	0,971	0,960	0,920	0,964	0,952
LP2	0,962	0,997	0,989	0,841	0,917	0,899	0,830	0,911	0,892
LP3	0,830	0,911	0,889	0,955	0,992	0,986	0,948	0,981	0,979
LP4	0,910	0,910	0,878	0,973	0,997	0,987	0,869	0,919	0,910
Objekt 1	0,811	0,909	0,861	0,861	0,920	0,899	0,979	0,998	0,990

UPS-seadme (katkematu toiteallika) simulatsioonidest kokkuvõtliku ülevaate annab allolev tabel (Tabel 4.6). Simulatsiooni käigus paigutati UPS-seade 5 erinevasse kohta. Vastavalt simulatsioonile on pingeväärtuste analüüsist tulenevalt parim asukoht UPS-seadme paigaldamiseks liitumispunkt LP3 ehk liini keskpaik. Sellisel juhul on UPSi koormusteks liitumispunktid L3...L5 ja Objekt 1. Põhjuseks on see, et üle poole koormusest asub liini esimeses kolmandikus. Seadme jaoks peaaegu samaväärselt sobivad kohad on liitumispunktid LP1 ja LP2, mis tähendab, et seade mõjutab alajaamapoolseid liitumispunkte vähem kui seda teeb PS/DVR-seade.

Tabel 4.6. Suhtelised pingeväärtused UPS-seadme paigaldusel

Seadme asukoht	Suhteline miinimumpinge liitumispunktide eri faasides, p.u.								
	LP2			LP4			Objekt 1		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Seadmeta	0,822	0,875	0,732	0,835	0,876	0,741	0,825	0,875	0,735
LP1	0,873	0,915	0,901	0,905	0,920	0,902	0,898	0,914	0,895
LP2	0,999	0,999	0,998	0,921	0,921	0,834	0,909	0,920	0,828
LP3	0,935	0,894	0,820	0,984	0,990	0,980	0,975	0,983	0,971
LP4	0,920	0,858	0,768	0,999	0,999	0,998	0,926	0,853	0,768
Objekt 1	0,916	0,855	0,764	0,944	0,853	0,770	0,999	0,999	0,998

KÜT-seadme simulatsioonidest kokkuvõtliku ülevaate annab allolev tabel (Tabel 4.7). Vastavalt arvutustele annab kõige parema tulemuse kui seade on paigaldatud liitumispunkti Objekt 1. Vaatamata olukorrale liitumispunkti LP2 koormus ja asümmeetria on suurem, annavad simulatsioonid tulemuse, et Objekt 1 juures pingeprobleemi lahendamine mõjutab oma kauguse tõttu enim ka LP2 väärtusi.

Tabel 4.7. Suhtelised pingeväärtused KÜT-seadme paigaldusel

Seadme asukoht	Suhteline miinimumpinge liitumispunktide eri faasides, p.u.								
	LP2			LP4			Objekt 1		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Seadmeta	0,822	0,875	0,732	0,835	0,876	0,741	0,825	0,875	0,735
LP2	0,865	0,905	0,890	0,870	0,911	0,890	0,862	0,906	0,882
LP4	0,863	0,908	0,896	0,877	0,914	0,902	0,869	0,908	0,894
Objekt 1	0,864	0,908	0,896	0,977	0,914	0,899	0,871	0,909	0,895

Seadmete võrdlevast tabelist (Tabel 4.8) saab näha, et DVR seadet on kõige otstarbekam kasutada. UPS seade lahendab küll pingeprobleemi Objekti 1 puhul, kuid ei lahenda pingeprobleemi liitumispunktis LP2. Kõige halvema tulemuse annab KÜT-seade seetõttu, et kõigis fiidri liitumispunktides on väga tugev ja sarnase profiiliga asümmeetria, mida seade oma tehniliste iseärasuste (sh faaside omavaheline pinge tasandamise) tõttu pole võimeline lahendama.

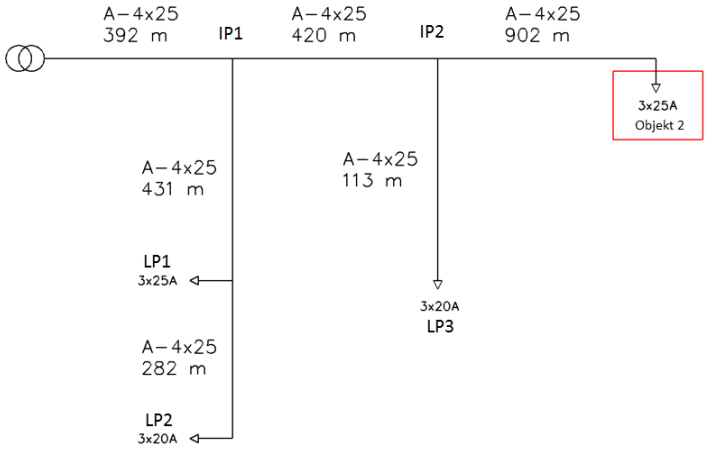
Tabel 4.8. Seadmete võrdlev tabel Objekti 1 korral

Seadme asukoht	Suhteline miinimumpinge liitumispunktide eri faasides, p.u.								
	LP2			LP4			Objekt 1		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Seadmeta	0,890	0,855	0,731	0,856	0,863	0,725	0,854	0,861	0,722
PS/DVR LP1	0,917	0,963	0,950	0,927	0,971	0,960	0,920	0,964	0,952
UPS LP3	0,935	0,894	0,820	0,984	0,990	0,980	0,975	0,983	0,971
KÜT Objekt 1	0,864	0,908	0,896	0,977	0,914	0,899	0,871	0,909	0,895

Tulemused näitavad, et pingeprobleemi pole seadmete abil võimalik täielikult lahendada. Üheks põhjuseks on siin reaalsest keskkonnast karmimad tingimused, mida reaalselt esineb väga harva.

4.3.2 Simulatsiooni tulemused Objektil 2, Vastja 10/0,4 kV alajaama F2

Objekti 2 põhimõtteskeem on esitatud alloleval joonisel (Joonis 4.29), kus simulatsiooni käigus paigaldati pingetasandusseadmed punktidesse LP1, IP1, IP2 ja Objekt 2. Enne simulatsioonide käivitamist tuvastati mõõteandmete alusel Objekti 2 puhul pingeprobleem, kuna suhteline pingeväärtus langes faasides L1, L2 ja L3 vastavalt väärtuseni 0,85; 0,85 ja 0,83. Keskmised pinged seejuures on nimetatud faasides 0,99: 0,98 ja 0,94. Reaalset tarbimist liitumispunktides LP2 ja LP3 ei olnud.



Joonis 4.29. Objekti 2 põhimõtteskeem

Fiidri koormused jaotuvad liitumispunktide vahel vastavalt allolevale tabelile (Tabel 4.9). Suurim osa koormusest ehk tarbimisest on fiidri ühe haru lõpus.

Tabel 4.9. Koormuste jagunemine fiidril Vastja 10/0,4 kV alajaama F2

Liitumispunkt	LP1	LP2	LP3	Objekt 2
Osakaal tarbimisest	21%	0%	0%	79%

PS/DVR-seadme (pingestabilisaatori) simulatsioonidest kokkuvõtliku ülevaate annab allolev tabel (Tabel 4.10). Simulatsiooni käigus paigutati PS/DVR-seade 4 erinevasse kohta. Vastavalt simulatsioonile on pingeväärtuste analüüsist tulenevalt sobib seadet paigaldada kõikidesse uuritud asukohtadesse, kuid

Objekti 2 pingeväärtuste alusel on parim asukoht PS/DVR-seadme paigaldamiseks IP2. Peaaegu sämaväärsed asukohad PS/DVR-seadme paigalduseks on ka IP1, IP2 ja Objekt 2

Tabel 4.10. Suhtelised pingeväärtused PS/DVR-seadme paigaldusel

Seadme asukoht	Suhteline miinimumpinge liitumispunktide eri faasides, p.u.					
	LP1			Objekt 2		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Seadmeta	0,910	0,909	0,895	0,854	0,853	0,827
Objekt 2	0,984	0,986	0,987	0,953	0,948	0,939
IP1	0,985	0,984	0,981	0,940	0,947	0,935
IP2	0,973	0,974	0,974	0,957	0,962	0,956
LP1	0,989	0,987	0,985	0,940	0,949	0,932

UPS-seadme (katkematu toiteallika) simulatsioonidest kokkuvõtliku ülevaate annab allolev tabel (Tabel 4.11). Simulatsiooni käigus paigutati UPS-seade 4 erinevasse kohta. Sarnaselt PS/DVR-seadmele on pingeväärtuste analüüsist tulenevalt parim asukoht seadme paigaldamiseks Objekt 2, kuid sobivad hästi ka liini hargnemispunktid IP1 ja IP2.

Tabel 4.11. Suhtelised pingeväärtused UPS-seadme paigaldusel

Seadme asukoht	Suhteline miinimumpinge liitumispunktide eri faasides, p.u.					
	LP1			Objekt 2		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Seadmeta	0,910	0,909	0,895	0,854	0,853	0,827
Objekt 2	0,992	0,992	0,992	0,999	0,999	0,999
IP1	0,947	0,946	0,947	0,977	0,980	0,977
IP2	0,992	0,992	0,992	0,984	0,985	0,982
LP1	0,949	0,949	0,949	0,969	0,954	0,944

KÜT-seadme simulatsioonidest kokkuvõtliku ülevaate annab allolev tabel (Tabel 4.12).Simulatsiooni käigus paigaldati seade kahte eri punkti ehk liitumispunkti LP1 ja Objekt 2. Seadme paigaldamine Objekti 2 juurde annab paremad tulemused, sest Objekti 2 koormused ja nende mõju asümmeetriale on märkimisväärselt suurem. Loogiline on paigaldada sedalaadi seade punktidesse kus assümmeetria on kõige suurem.

Tabel 4.12. Suhtelised pingeväärtused KÜT-seadme paigaldusel

Seadme asukoht	Suhteline miinimumpinge liitumispunktide eri faasides, p.u.					
	LP1			Objekt 2		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Seadmeta	0,910	0,909	0,895	0,854	0,853	0,827
Objekt 2	0,972	0,974	0,964	0,970	0,970	0,960
LP1	0,917	0,911	0,897	0,860	0,855	0,829

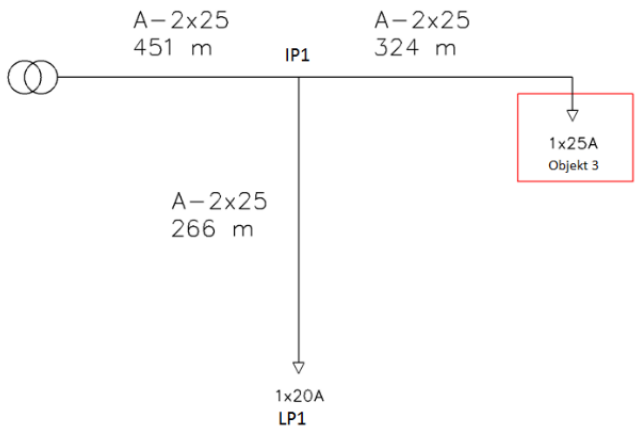
Seadmete võrdlevast tabelist (Tabel 4.13) on tuvastatav, et parima tulemuse pingeprobleemi lahendamisele Objektil 2 annab UPS-seade. Paremuselt järgmine lahendus oleks PS/DVR-seadme ja KÜT kasutamine. Antud objekti puhul annavad kõik seadmed ka väga tugeva asümmeetria korral rahuldavad tulemused.

Tabel 4.13. Seadmete võrdlev tabel Objekti 2 korral

Seade ja asukoht	Suhteline miinimumpinge liitumispunktide eri faasides, p.u.					
	LP1			Objekt 2		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Seadmeta	0,910	0,909	0,895	0,854	0,853	0,827
PS/DVR IP2	0,973	0,974	0,974	0,957	0,962	0,956
UPS Objekt 2	0,981	0,980	0,975	0,999	0,999	0,999
KÜT Objekt 2	0,972	0,974	0,964	0,970	0,970	0,960

4.3.3 Simulatsiooni tulemused Objektil 3, Tolla 10/0,4 kV alajaama F3

Objekti 3 põhimõtteskeem on esitatud alloleval joonisel (Joonis 4.30), kus simulatsiooni käigus paigaldati pingetasandusseadmed punktidesse LP1, IP1 ja Objekt 3.



Joonis 4.30. Objekti 3 põhimõtteskeem

Enne simulatsioonide käivitamist tuvastati mõõteandmete alusel Objekti 3 puhul pingeprobleem, kuna suhteline pingeväärtus langes väärtuseni 0,90. Keskmised pinged seejuures on 0.95. Ühefaasilise tarbimise tõttu vaadeldi simulatsiooni puhul vaid DVR ja UPS seadmeid, mille võrdlus on esitatud järgnevas tabelis (Tabel 4.15). Simulatsioonil arvestati tarbimisega kõigis liitumispunktides.

Fiidri koormused jaotuvad liitumispunktide vahel vastavalt allolevale tabelile (Tabel 4.14). Mõlemad fiidri harud on koormatud peaaegu võrdselt.

Tabel 4.14. Koormuste jagunemine fiidril Tolla 10/0,4 kV alajaama F3

Liitumispunkt	LP1	Objekt 3
Osakaal tarbimisest	54%	46%

Vaatamata sellele, et Objekt 3 asub alajaamast kaugemal kui liitumispunkt LP1, mõjutab LP1 suurem tarbimine võrku rohkem, mistõttu UPS-seadme paigaldus liitumispunkti LP1 annab parema tulemuse kui selle paigaldus Objekti 3 juurde. Eelnevaga peaaegu samaväärsed tulemused saab kui UPS-seade paigaldada hargnemispunkti IP1.

Tabel 4.15. Seadmete võrdlustabel Objekti 3 korral

Seade ja asukoht	Suhteline miinimumpinge liitumispunktide eri faasides, p.u.	
	LP1	Objekt 3
Seadmeta	0,872	0,899
DVR LP1	0,876	0,893
DVR Objekt 3	0,871	0,926
DVR IP1	0,829	0,855
UPS LP1	0,999	0,950
UPS Objekt 3	0,885	0,999
UPS IP1	0,962	0,983

4.3.4 Järeldus simulatsioonidest

Eelolevatest simulatsioonidest saab järeldada, et pole universaalset seadet/rakendust pingeprobleemide lahendamiseks ning tulemused sõltuvad tugevalt esinevast asümmeetriast, koormustest liitumispunktides ja liinide pikkustest. UPS lahendus omab võrreldes teiste lahendustega siiski mitmeid eeliseid sh kohtades, kus esineb katkestusi. KÜT seade sobib juhtudel kui tegemist pole tugeva ebasümmeetriaga sh pingeprobleemide samaaegsust erinevates faasides ei esine, katkestuste esinemissagedus on olematu või väga madal. DVR-seade sobib hästi paljude harudega süsteemi kus katkestuste arv on madal ning pingelohud reeglina pole sügavamad kui 40%. Vastavalt mõõtetulemustele ei esinenud sügavamaid pingelohke kui 30% nimipingest.

Senised elektri kvaliteedi parandamise meetmete uuringud tööstuses viitavad sellele, et standardsete UPS seadmete suuremad käidukulud muudavad nende seadmete kasutamise võrreldes dünaamiliste pingetasandajatega vähem atraktiivsemaks. Samas uued tööstuslikud UPS-seadmed on hinna poolest konkurentsivõimelised DVR-seadmetega.[34]. Lisaks eelnevale võimaldavad sidustalitluses UPS-seadmed lahendada ka neid pingeprobleeme, mida teised pingetasandusseadmed ei võimalda (nt pingekatkestused, sügavad pingelohud, transient- ja siirdeliigpinged).

[34] http://www.zigor.com/eu/documents/en/Power_quality_solutions_for_industry.pdf

5 Soovitused sobiva tehnilise lahenduse valikuks

5.1 Seadmete peamised eripärad millega hankel arvestada

- Soovitav on kasutada uusi salvestuselemente, sest järelturu elementide eluea arvestamisel võib sõltuvalt metoodikast eluea hindamise viga olla 6-7 kordne. Kui siiski kasutada järelturu elemente, tuleb akud üledimensioneerida, mis võib nullida hinnerinevuse. Kuna hinnanguliselt moodustab akulementide maksumus salvestussüsteemi kogumaksumusest ca 30 %, siis nt jääkressursiga elektersõidukite akud ei anna samuti hinnaeelist.
- Erilist tähelepanu pöörata seadmete töötemperatuuri (10°C…30°C) ja niiskuse hoidmisele ning jälgmisele, sest töö väljapool temperatuurivahemikke vähendab kordades seadmete (sh akude, servoajamite) eluiga.
- Eesti madalat keskmist õhutemperatuuri arvestades ei mängi akude kalendaarne vananemine võrreldes tsüklilise vananemisega olulist rolli, mistõttu tuleb hankimisel lähtuda peamiselt tsüklilisest elueast.
- Seada seadmete laadimiskiirusele ülempiir, mille täpseks määramiseks tuleb konsulteerida konkreetse seadme tootjaga.
- Määrata akude tühjendamissügavusele piirväärtused. Pliiakudel soovitavalt DoD kuni 30% ja Li-Ion akudel soovitavalt DoD kuni 80%.
- Pingetasandusseadmete/-stabilisaatorite reaktsiooniajad on äärmiselt olulised pingeprobleemi lahendamisel
- Kõikide pingeprobleemi lahendavate seadmete puhul näha ette andmeside ja –halduslahendused seisundi, häirete ja olekuparameetrite töötlemiseks, haldamiseks ja arhiveerimiseks, mis tagavad süsteemi perspektiivsete parenduste väljatöötamiseks analüüsivõimalused

5.2 Lahenduse valikuks vajalike algandmete määramine

- Võrgukonfiguratsiooni ja tüüpse struktuuri analüüs
    - tabel pingeprobleemsete fiidrite ja nende liigitusega gruppidesse 1-3;
    - fiidri kogupikkus;
    - kaugeima liitumispunkti kaugus alajaamast;
    - ühefaasilise lühise näivtakistus liitumispunktis Zk1;
    - ühefaasiliste liitumispunktide asukoht ja tarbimine;
- Katkestuste arv, kestused ja põhjused
- Majanduslik võrdlus samas trassis keskpinge (KP) isoleerjuhtmega õhuliini, MP rippkeerdkaabliga liini ja MP paljasjuhtmelise liini vahel.
- Mõõtmised ja mõõtetulemustest pingeprobleemi tüübi määramine
- Erinevate pingekvaliteeti parandavate seadmete omadused ja kasutusjuhud;

WebMapist võetavad algandmed:

- fiidri varustuskindluse piirkond;
- maksimaalne pingelang lõppsõlmes, %;
- lõppsõlme impedants Ik1min arvutustes, oomi;
- lõppsõlme kaugus toitepunktist, m.

5.3 Algoritm tehnilise lahenduse valikuks pingeprobleemi lahendamisel

5.3.1 Algandmete analüüs ja eelhinnang

1. Analüüsida kliendi tagasisidet pingeprobleemi iseärasuste tuvastamiseks
    a. Pingeprobleemide tüübid: pinge madal, pinge kõrge, flikker, katkestused?
    b. Pingeprobleemide esinemissagedus ja kestused: arv, lühiajalised, pikaajalised?
    c. Pingeprobleemi korduvus: sesoonne (äike), iganädalane vms tarbimismustrist sõltuv?
2. Määrata pingeprobleemi asukoht ja fiidri tüüpstruktuur
    a. Pingeprobleemi asukoht?
    b. Koormuskese?
    c. Tüüpstruktuur ja koormuste jagunemine liitumispunktide vahel?
3. Majanduslik kaalutlus ja üldine perspektiiv
    a. Analüüsida fiidri olukorda lähtudes senisest käidust ja hooldusest:
        i. Kas antud fiider on kinnitatud rekonstrueerimiskavades?
        ii. Alajaama ja selle komponentide (trafo jms) seisukord ja prognoositav eluiga?
        iii. Liini seisukord (liini parandused ja aeg viimastest parandustest) ja prognoositav eluiga?
        iv. Liini tarbimine ja prognoos 5 aasta perspektiivis (kasvav, kahanev, stabiilne)?
    b. Pingeprobleemi olemasolu, liini tüübi ja tarbimisandmete prognoosi alusel analüüsida pingetasandusseadme kasutamise otstarbekust võrreldes liini rekonstrueerimisega.
        i. MP paljasjuhtme amortiseerumisel või pingeprobleemi avaldumisel
            1. Taandarenevas piirkonnas (koormused vähenevad) kaaluda mistahes distantsi korral pingetasandaja kasutamist
            2. kuni 1,5 km stabiilse tarbimise ajalooga liinis võiks kaaluda üleminekut MP rippkeerdkaabliga liinile.
            3. üle 1,5 km kasvava tarbimise ajalooga liinis võiks kaaluda üleminekut KP isoleerjuhtmega liinile, sest sellest piirist alates muutuvad MP paljasjuhtmeline ja KP isoleerjuhtmega õhuliini kulud võrdseks.
        ii. MP rippkeerdkaabli amortiseerumisel või pingeprobleemi avaldumisel
            1. Mistahes tarbimise ajalooga liinis pikkusega 0,5...2 km võiks kaaluda pingetasandaja kasutamist, mille kogukulud ei ületa keskpingeliini ja MP rippkeerdkaabli kogukulude vahet vaadeldaval perioodil
            2. Üle 2 km stabiilse või kasvava tarbimise ajalooga liinis võiks kaaluda üleminekut keskpingeliinile.
        iii. Mistahes üle 3 km liini amortiseerumisel või pingeprobleemi avaldumisel kaaluda sõltuvalt hinnast
            1. kasvava või stabiilse tarbimisajalooga võrgupiirkonnas amortiseerunud võrgu asendamist MP rippkeerdkaabliga või keskpingeliiniga.
            2. Kahaneva tarbimisajalooga võrgupiirkonnas amortiseerunud võrgu asendamist saartalitluses lahendusega. Saartalitluses lahenduse hind koos käidukuludega peavad olema oluliselt madalamad vaadeldava distantsi korral konkreetse võrgu eluea kuludest

5.3.2 Mõõtmised ja pingeprobleemi detailne analüüs

4. Pingeprobleemide põhjalikuks kaardistamiseks viia sõltuvalt kliendi kaebustest (sesoonsus, katkestuste kestus, flikkeri esinemissagedus jne) objektil läbi mõõtmised. Mõõtmiste käigus määrata
    a. Pingehälvete sügavused, esinemissagedused?
    b. Katkestuste arv ja nende kestused?
    c. Pinged ja voolud, et arvutada toitesilmuse näivtakistus?
5. Selleks et saada kvaliteedinäitajate õigeid väärtusi, on soovitav neid mõõta ettenähtud ajavahemiku jooksul ja seiret korraldada vajalikul ajal. Olenevalt kvaliteedinäitajatest ulatuvad ajavahemikud standardi EVS-EN 50160 kohaselt ühest päevast ühe aastani.
6. Mõõteandmeid töödelda programmiga, mis esitab tulemused kvaliteediraporti näol. Kvaliteediraportid sisaldavad erinevate parameetrite registreeritud väärtuseid ja võrdlust kvaliteedistandardi poolt kehtestatud piirväärtustega. Sageli piisab piisava ülevaate saamiseks ühenädalasest mõõtmisest suurema kormusega perioodil

5.3.3 Pingetasandusseadme valik ja asukoht

7. Pingetasandusseadme paigaldamisel on soovitav arvestada fiidri aastase või sesoonse koormuskeskmega ning paigaldatavate seadmete eripäradega
    a. Neutraalinihke/asümmeetria[35] korral eelistada
        i. Faaside ühtlast koormamist kliendi juures
        ii. Kasutada KÜT-seadmeid pingeprobleemse objekti lähedal.
    b. Nii koormuste ebasümmeetriast kui ka sümmeetrilisest käitumisest tingitud pingelohkude ja muhkude korral, väärtusega ±20...40%U_n, eelistada PS/DVR-seadmeid ja kasutada neid koormuskeskme või pingeprobleemse objekti lähedal.
        i. Valdavalt lühiajaliste tarbimise eripäradest tingitud pingelohkude/-muhkude korral, kestusega <1 s, eelistada kiiretoimelisi elektroonilisi ja elektromagnetilisi pingestabilisaatoreid
        ii. Valdavalt pikaajaliste võrgust tingitud pingelohkude korral, kestusega >1 s, eelistada elektromehaanilisi sujuva reguleerimisega pingestabilisaatoreid
        iii. Dünaamilised pingeregulaatorid (DVR-seadmed) sobivad reageerimiskiiruselt mõlemal juhul.
    c. Sagedaste katkestuste, suurte pingekõikumiste (enam kui >40%U_n), tarbijast mitte tulenenud võrguhäiringute, jms korral eelistada UPS-seadmeid ja muid salvestavaid pingetasandusseadmeid, mida soovitavalt paigaldada koormuskeskme või pingeprobleemse objekti lähedusse. Eelistada sidustalitluses (*on-line*) UPS-seadmeid.
    d. Objektide korral, mille tarbimine moodustab üle 50% fiidri tarbimisest, paigutada seade otse objektile.

[35] **Pinge asümmeetria on** mitmefaasilise võrgu seisund, mille puhul faasipingete efektiivväärtused või faasidevahelised nihkenurgad pole võrdsed. Asümmeetriat iseloomustavaks näitajaks on pinge vastujärgnevus- ja pärijärgnevuskomponendi suhe – **asümmeetriategur.**

5.4 Lihtsustatud pingeprobleemide lahendusalgoritmid kirjanduses

Abistava materjalina leiab kirjanduses ka hulgaliselt vähem detailseid ehk lihtsustatud algoritme ja juhiseid pingeprobleemide lahendamiseks. Üks sedalaadi kirjeldustest on esitatud Saksa elektrotehnikainseneride käsiraamatus (Tabel 5.1).

Tabel 5.1. Üldine algoritm süsteemide valikuks [TAB15]

Elektri kvaliteeti iseloomustav parameeter	Põhjused	Mõjude väljendusviis	Meetmed kahjulike mõjude kõrvaldamiseks või vähendamiseks
Pinge *U* kõikumine	Suure võimsusega mitte-reguleeritavate koormuste või tootmisseadmete sisselülimine või talitluse järsud muutused nt: - Suurte induktiivsete koormuste sisselülimine - Suurte generaatorite sisselülimine - Võrguosade sisse- ja väljalülimine - Elektrijaamade juurde või väljalülitamine nt PV jaamade balanseerimiseks	- Flikker (valguse vilkumine) - Pingelohud (lühiajalised pingelangud) - Asünkroonmootorite pöörete kõikumine kuni nende väljalülitumiseni - Andmete kustumine	Tarbimise poolel - Seadmete sujuvkäivitus - Katkematute toiteallikate kasutamine Tootmise poolel - Püsitalitluses suurte pöörlevate massidega generaatorid, nt suured sünkroongeneraatorid või tühijooksul üleergutatud sünkroonmootorid (nn sünkroonkompensaatorid ehk reaktiivvõimsuse tootmise masinad)
Sageduse *f* kõikumine		- Sünkroonmootorite pöörete kõikumine kuni nende väljalülitumiseni - Sagedusest sõltuvate seadmete väljalülimine nt reaktiivvõimsuse kompenseerimisel	
Reaktiiv-võimsus	Kõik induktiivsed koormused - Asünkroonmootorid - Reaktorid, drosselid - Suure puistega trafod (nt keevitustrafod jms)	- Suurenenud voolud - Suurenenud kaovõimsus - Trafode kuumenemine	Induktiivse reaktiivvõimsuse kompenseerimine - Mahtuvusliku reaktiivvõimsuse kaudu - Üleergutatud sünkroonmasinate abil - Võimsustegurit kompenseerivate seadmete kasutamine - Võimsusteguri kompenseerimist võimaldavate katkematute toiteallikate kasutamine
Võimsustegur λ	$\lambda=P/S$, kus P on aktiivvõimsus ja S on näivvõimsus	Väike võimsustegur põhjustab suuremat reaktiivvõimsust ja võimsuskadusid	
Faasinihe φ	Vektordiagrammil voolu ja pinge vaheline nurk. Nurk kasvab reaktiivvõimsuse kasvades	Mida suurem faasinihe seda väiksem võimsustegur λ ja cos φ, sh seda suurem kaovõimsus	
cos φ	cos φ on võimsustegur põhiharmoonilise korral	Sama, mis võimsusteguril	
Harmooni-lised	3 ja 5 põhiharmoonilised tekitatakse elektroonikaseadmete poolt nt alaldid ja impulsstoiteplokid sh luminofoorlambid jms	- Mootorite pöörlemisega kaasneb müra, - mootori pöördemoment käivitamisel on tavapärasest väiksem, - neutraaljuhis on suured voolud, võivad olla suuremad kui faasijuhis - suured kaod juhtmetes ja	- võrgufiltrite kasutamine - katkematu toite allikate kasutamine - püsitalitluses faasinurga piiramine/kontroll, nt trafode abil - äärmuslikel juhtudel kasutada suurema ristlõikega neutraaljuhti

Teine samaväärne materjal, kuid mõnevõrra erinevate meetmete kirjeldusega (Tabel 5.2) on leitav elektrikvaliteediga tegeleva ettevõtte KBR Kompensationsanlagenbau GmbH kodulehel.

Tabel 5.2. Üldine algoritm meetmete rakendamiseks pingeprobleemide järgi[36]

Probleemi kirjeldus	Põhjus	Mõju	Meede
Pingekõikumised	Võrgutakistuse muutused, suurte koormuste sisse-/väljalülitus, suurte mootorite käivitamine, keevitusseadmed, sulatusahjud	Toitepinge efektiivväärtuse muutused	Võrgutakistuse vähendamine, koormuste sisselülitamise ühtlasem ajastamine või koormuse üheaegsuse vähendamine, pingestabilisaatorid, dünaamiline kompenseerimine, mootorite käivituse kompenseerimine
Pingelohud	Suurte käivitusvooludega seadmed	Elektrooniliste seadmete väljalülitumine	Käivitusvoolude piiramine
Pingekatkestused	Maaühendused, lühised	Koormuste sh seadmete või tootmise seiskumine	Katkematu toite allikad, reservtoiteallikad
Flikker	Koopiamasinad, kütteseadmed, kaarleekahjud, pressid, stantsid, keevitusseadmed	Hõõglampidel valgusviljakuse kõikumine, silmade väsimine, seadmete enneaegne vananemine	Võrgutakistuse vähendamine, koormuse vähendamine, seadmete talitlusviiside muutmine, flikkeri kompenseerimis-seadmed
Harmoonilised	jõupooljuhtmuundurid, alaldid,sagedusmuundurid, lülitusseadmed	Mootorite ja trafode termiline ülekoormus, elektroonikaseadmete rikked, häired seadmete töös, tootmise katkestused, resonantsnähtused	Harmooniliste aktiiv- ja passiivfiltrid, summutusahelad
Asümmeetria	Koormuste asümmeetria, ühe- või kahefaasilised koormused, induktsioonahjud, keevitusseadmed, sulatusahjud	Ebaühtlane trafo koormus, kaod trafos, trafo sumin, mootorite ebaühtlane töö, mootorite termiline ülekoormus, laagrite kulumine	Koormuste ühtlustamine, jõupooljuhtmuundurid, masinmuundurid, harmooniliste aktiivfiltrid, sümmeetriat parandavad seadmed
Transientliigpinged	Välk, kondensaatorite ja induktiivsuste lülimine, kaitseahelate rakendumised	Juhtseadmete häired, seadmete väljalülimine, seadmete rikked, mähiste rikked	liigpingepiirikud

[36] http://www.kbr.de/files/dienstleistungen/edepro0003-4114-1_de_energiekosten_senken_web.pdf

6 Kasutatud kirjandus

[EIR10] Eesti inimvara raport (IVAR): võtmeprobleemid ja lahendused. Eesti Koostöö Kogu, 2010. 43 lk.

[EKI14] Eesti keskkonnaindikaatorid – arendustöö ja tulemused. Keskkonnaagentuur, Tallinn 2014. 66 lk.

[EMA14] Eesti maaelu arengukava 2014–2020. Tallinn, 2014, 329 lk.

[ERS14] Eesti regionaalarengu strateegia 2014-2020. Siseministeerium, Tallinn, 2014. 19 lk.

[ERS14] Eesti regionaalarengu strateegia 2014-2020. Regionaalministri valitsemisala, Siseministeerium, Tallinn, 2014. 48 lk.

[ELE14] Elektrilevi OÜ investeeringute vajalikkuse ja efektiivsuse hindamine. Konkurentsiamet, Tallinn, 2014. 83 lk.

[ETO13] Elektrivõrgu tänane olukord. Võimalikud arengustsenaariumid. Eesti Arengufond, Tallinn 2013. 95 lk.

[HÕB16] Hõbejõgi, T. Possibilities to Optimize Low Voltage Network Investments in Rural Areas. Thesis on power engineering. Tallinn, TUT Press, 2016. 82 p.

[MER15] Mere, T. Innovatsioon elektri jaotusvõrkudes. Elektrilevi OÜ, 2015, 56 sl.

[RVA12] Rahvastiku võimalikud arengutrendid 2012-2030. Koostajad: Noorkõiv, R., Loodla, K. Konsultatsiooni- ja koolituskeskus Geomedia. Tartu 2012, 37 lk.

[SND05] Secondary Network Distribution Systems Background and Issues Related to the Interconnection of Distributed Resources. Technical Report, NREL/TP-560-38079, 2005. 35 p.

[SMG12] Smart Grids. Edited by Hadjsaïd, N., Sabonnadière, J.-C. John Wiley&Sons, Inc., 2012, 380 p http://www.provedor.nuca.ie.ufrj.br/eletrobras/estudos/hadjsaid1.pdf

[SYR03] Syrjänen M J and Korhonen P, Evaluation of Cost Efficiency in Finnish Electricity Distribution. Annals of Operations Research 121, p. 105-122, 2003.

[TII13] Tiit, E-M., Servinski, M. Rahva ja eluruumide loendus 2011. Ülevaade Eesti maakondade rahvastikust. Statistikaamet, Tallinn 2013. 102 lk.

[VAL13] Valtin, J., Raesaar P., Tammoja H. Elektrilevi OÜ kesk- ja madalpingevõrgu varustuskindluse näitajad ja muutuste mõjurid erinevates varustuskindluse piirkondades üleminekul kaablivõrgule. TTÜ Elektroenergeetika instituut. Tallinn, 2013. 136 lk.

[VAL14] Valtin, J., Raesaar P., Tammoja H. Elektrilevi OÜ hajavarustuskindluse piirkondade võrguinvesteeringute eesmärgid, realiseerimise meetodid ja nende valikukriteeriumid. TTÜ Elektroenergeetika instituut. Tallinn, 2014. 102 lk.

[VEK10] Võrgueeskirja § 32 lg 14 alusel elektritootja liitumise kohta avaldatavad andmed alates 19.07.2010 https://www.elektrilevi.ee/-/doc/6305157/kliendile/el_info_liitunud_tootjad.pdf

[ÜPE12] Üleriigiline planeering Eesti 2030+. Regionaalministri valitsemisala, Siseministeerium, Tallinn, 2012, 58 lk.

[ENS82] ENSV Energeetika ja Elektrifitseerimise Tootmispeavalitsus „Eesti Energia“ Õppekombinaat. „Jaotusvõrkude pinge kvaliteedi kontrollimise juhised ja soovitused“, Tallinn, 1982, 172 lk.

[TAB15] Tabellenbuch Elektrotechnik. Verlag Europa-Lehrmittel. 536 Seite.

[MEL07] Meldorf, M., Tammoja, H., Treufeldt, Ü., Kilter, J. (2007). Jaotusvõrgud. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus.

[IEC02] Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-8: Environment – Voltage dips and short interruptions on public electric power supply systems with statistical measurement results. Technical Report TR 61000-2-8: IEC:2002

[RES12] Resmi S, "Multifunctional Dynamic Voltage Restorer”, International Journal of Electronics and Computer Science Engineering, Vol-2, No.1, 2012. ISSN-2277-1956.

[ANK10] Ankit B. Patel; Dhaval B. Shah. DYNAMIC VOLTAGE RESTORATION, Project. California State University, Sacramento, 2010. http://csus-dspace.calstate.edu/handle/10211.9/725

[NIE02] Nielsen, John Godsk. Design and Control of Dynamic Voltage Restorer. PhD Thesis. Aalborg University, Denmark. 2002.

[CHA10] Jhan Yhee Chan. Framework for Assessment of Economic Feasibility of Voltage Sag Mitigation Solutions. PhD Thesis. University of Manchester. 2010

[TAR07] R. Targosz and J. Manson, "Pan European LPQI power quality survey," presented at CIRED 19th International Conference on Electricity Distribution, Vienna, 2007.

[ROP11] Silvo Ropoša, Gorazd ŠTUMBERGER, Darko LESTAN, Miran ROŠER. Application of voltage stabilizer in Slovenian low voltage grid. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 87 NR 3/2011

[FRI15] P. Fristot, O. Constant, C. Moncet. 3-PHASE LOW VOLTAGE NETWORK LOAD BALANCER: A COST EFFECTIVE SOLUTION TO LINE VOLTAGE VARIATIONS. CIRED 2015, Lyon. Paper 1004.