



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

Elektriraudtee mõjud elektrivõrgu dünaamilisele talitlusele

Uurimistöo 1.1-4/2016/469 / Lep16073 lõpparuanne

Tallinn 2016

Uurimistöö täitjad:



Ivo Palu	professor, tellimustöö vastutav täitja, TTÜ elektroenergeetika instituut
Tanel Sarnet	doktorant, nooremteadur, TTÜ elektroenergeetika instituut
Triin Kangro	doktorant, nooremteadur, TTÜ elektroenergeetika instituut
Uku Salumäe	insener, TTÜ elektroenergeetika instituut

The logo for Elering, featuring the word "elering" in a lowercase, teal-colored, sans-serif font.

Jako Kilter	PhD, elektrisüsteemi ekspert, Elektertranspordi R&D projekti juht, Elering AS
Andrus Reinson	releekaitse ja automaatika talitluse juhataja, Elering AS
Rain Maripuu	elektrisüsteemi spetsialist, Elering AS

SISUKORD

Sissejuhatus	5
1. Eesti 110 kV ülekandevõrgu mudeli täiendused	8
1.1 110 kV ülekandevõrgu ekvivalendid	8
1.2 110 kV ülekandevõrgu koormusmudelid	11
1.3 110 kV ülekandevõrgu mudeli täiendavad moodulid	11
1.4 Kokkuvõte	13
2. Pingeasümmeetria esmane hinnang ülekandevõrgu erinevate konfiguratsioonide korral	14
2.1 Elektriraudtee liitumispunkt Järveküla 110/20 kV alajaam	15
2.2 Elektriraudtee liitumispunkt Kehtna 110/10 kV alajaam	20
2.3 Elektriraudtee liitumispunkt Sindi 330/110 kV alajaam	24
2.4 Elektriraudtee liitumispunkt Häädemeeste/Nepste 110 kV alajaam	27
2.5 Kokkuvõte	33
3. Dünaamiliste protsesside analüüsi meetodikad eritüübiliste tarbijate puhul	36
3.1 Eritüübiliste tarbijate analüüsimine PSS/E tarkvaras	37
3.2 Eritüübiliste tarbijate analüüsimine PSCAD tarkvaras	40
3.3 Kokkuvõte	41
4. Pingeasümmeetria mõju pöörlevate elektriseadmete talitlusele dünaamilistes protsessides	42
4.1 Generaatorite mudelid	43
4.2 Iru alajaama ühendatud generaatorite ja elektriraudtee mudelite ühildamine	53
4.3 Generaatorite liigvoolukaitse mudelid	57
4.4 Võimsus hetkväärtuse mõju generaatoritele	61
4.5 Pingeasümmeetria mõju generaatori elektrisüsteemi stabilisaatoritele ning üle- ja alaergutus piirajatele	71
4.6 Kokkuvõte	90
5. Konverterite vahendusel ühendatava elektriraudtee olemus ja mõju	93
5.1 Staatilise sagedusmuunduri tööpõhimõte	94
5.2 Näiteid staatilise sagedusmuunduri rakendamisest	95
5.3 Staatilise sagedusmuunduri rakendamise eelised ja kasumlikkus	96
5.4 Kokkuvõte	101
6. Pingeasümmeetria analüüs ülekandevõrgu konfiguratsiooni muutustel	103
6.1 Ülekandevõrgu normaalkonfiguratsioon	104
6.1.1 Elektriraudtee liitumispunkt Järveküla alajaamas	105
6.1.2 Elektriraudtee liitumispunkt Kehtna alajaamas	106
6.1.3 Elektriraudtee liitumispunkt Sindi alajaamas	108
6.1.4 Elektriraudtee liitumispunkt Kilingi-Nõmme alajaamas	110
6.1.5 Kokkuvõte	112
6.2 Ülekandevõrgu konfiguratsiooni muutused	113
6.2.1 Liini 006A Iru-Järveküla välja lülitamine	113

6.2.2	Liini 006B Järve-Järveküla välja lülitamine	114
6.2.3	Liini 006B Järve-Järveküla ja liini 007 Iru-Ida välja lülitamine	116
6.2.4	Liini 025 Rapla-Kehtna välja lülitamine	117
6.2.5	Liini 026 Järvakandi-Kehtna välja lülitamine	119
6.2.6	Liini 025 Rapla-Kehtna ja liini 187 Rapla-Paide välja lülitamine	121
6.2.7	Liini 106D Kabli-Sindi välja lülitamine	123
6.2.8	Liini 106A Viljandi-Kilingi-Nõmme välja lülitamine	124
6.2.9	Liini 134B Viljandi-Suure-Jaani välja lülitamine	126
6.2.10	Kokkuvõte	127
7.	Ülekandevõrgus toimuvate lühiste mõju generaatoritele	129
7.1	Lühis Iru alajaama lattidel	130
7.2	Lühis Metsakombinaadi alajaama lattidel elektriraudtee liitumisel Kehtna alajaamas.	147
7.3	Lühis Metsakombinaadi alajaama lattidel elektriraudtee liitumisel Sindi alajaamas....	155
7.4	Lühis Metsakombinaadi alajaama lattidel elektriraudtee liitumisel Kilingi-Nõmme alajaamas	163
7.5	Kokkuvõte	172
8.	Elektriraudtee kontaktvõrgus toimuvate lühiste mõju liitumispunktile ja generaatoritele	174
8.1	Järveküla liitumispunkt	175
8.2	Kehtna liitumispunkt	182
8.3	Sindi liitumispunkt	186
8.4	Kilingi-Nõmme liitumispunkt	190
8.5	Kokkuvõte	194
9.	Täiendavad ülekandevõrgu ja elektriraudtee kontaktvõrgu rikketalitluse juhtumid.....	197
9.1	Järveküla liitumispunkt.....	197
9.2	Kehtna liitumispunkt	200
10.	Pingeasümmeetriat parendavad meetmed ja nende mõjude analüüs	206
10.1	STATCOM-i PSCAD mudel	208
10.2	Scott-trafo ja RPC hübriidlahenduse PSCAD mudel.....	211
10.3	Pingeasümmeetriat parendatavate meetmete rakendatavus	213
10.4	Kokkuvõte.....	220
11.	Soovitused.....	222
11.1	Elektriraudtee liitumispunktid	222
11.2	Pingeasümmeetria piirmäärad.....	223
11.3	Uurimistöö edasised mahud	224
11.4	Mudelid ning nende koostamise mahud	224
	Kokkuvõte	226
	Kirjandus	229

Sissejuhatus

Elering AS koostöös TTÜ elektroenergeetika instituudiga on uurinud elektriraudtee mõjusid alates 2012. aastast. Käesolev aruanne koondab enda alla teadustöö viimase etapi tegevusi ja läbi viidud analüüse. Uurimistöö eesmärgiks on teaduslikult läheneda elektriraudtee liitumistele ja hinnata selle mõju elektrisüsteemi dünaamilise talitluse raamistikus. Sellest tulenevalt leiab sügavamat käsitlemist elektriraudtee ja sünkroonmasinate omavahelised mõjud ning nende mõjude piiritlemine ja võimalikud lahendused mõjude kompenseerimiseks. Olemuselt on tegemist elektri kvaliteedi temaatikaga, eriti selle kahe suuruse: asümmeetria ja harmoonikud, mõjude uurimisega. Peamiselt on elektriraudtee liitumise raamistikus huvipakkuvamaks ja suuremat mõju omavaks elektri kvaliteedinäitajaks asümmeetria. Harmoonikute osakaal tõuseb ja muutub olulisemaks teemaks, kui elektrivõrguga liitumiseks kasutatakse konverteritel põhinevaid lahendusi.

Kokkuvõtvalt käsitletakse käesolevas aruandes uurimistöö lähteülesandes tõstatatud temaatikaid:

- Pingeasümmeetria muutuste hindamine piiritletud ülekandevõrgus erinevate N-1 juhtumite korral;
- Dünaamiliste protsesside analüüsi meetodikate täpsustamine eritüübiliste tarbijate puhul;
- Pingeasümmeetria mõju pöörlevate elektriseadmete talitlusele dünaamiliste protsesside kulgemisel;
- Elektriraudtee liitumispunktide võimalikkus lähtudes dünaamikast tulenevatest kitsendustest;
- Konverterite vahendusel ühendatava elektriraudtee olemus ja mõjud;
- Soovitused elektriraudtee liitumise seotud uurimistööde mahu, mudelite ja liitumistingimuste raamistikus.

Nimetatud teemasid on selles aruandes käsitletud üheteistkümnes peatükis.

Aruande esimene peatükk keskendub projekti käesolevas etapis ülekandevõrgu *PSCAD* mudelites tehtud täiendusi ja muudatusi tulenevalt lisandunud projekti eesmärkidest. Töö käigus on täpsustunud ülekandevõrgu ekvivalendid ning nende konfiguratsioon. Lisaks ekvivalentidele on mudelites uuendatud ka koormusmudelite väärtusi vastavalt perspektiividele. Ülekandevõrgu mudeleid on täiendatud lisamoodulitega võimaldamaks ülekandevõrgu konfiguratsiooni muutuste ja lühisetalitluse analüüsimist.

Teine peatükk koondab enda alla Rail Baltic trassi täpsustumisest tulenevate uute liitumispunkti alajaamade esmaseid hinnanguid tuginedes teoreetilistel avaldistel. Elektriraudtee lii-

tumispunktidena on käsitletud Järveküla, Kehtna, Sindi ja Häädemeeste/Nepste alajaamasid. Peatükis vaadeldakse liitumispunktiks valitud alajaamade sobivust tulenevalt nende elektrilisest tugevusest, toiteliinide koormumisest ja tekkivast pingesümmeetria tasemest erinevate ülekandevõrgu konfiguratsioonide korral.

Kolmas peatükk käsitleb eritüübiliste tarbijate modelleerimise võimalusi elektrisüsteemi talitluse analüüsimiseks, vastavalt Elering AS-is kasutusel olevatele *PSS/E* ja *PSCAD* tarkvarapakettidele. Eritüübiliste tarbijate all on mõeldud ülekandevõrku asümmeetriliselt koormavaid tarbijaid.

Aruande neljas peatükk keskendub pöörlevatele seadmetele mahutades enda alla pingesümmeetria mõjude hindamise ülekandevõrku ühendatud generaatoritel erinevate dünaamiliste protsesside korral. Antud peatükis on kirjeldatud projekti käesolevas etapis generaatorite mudelites tehtud täpsustusi ning täiendusi ning generaatori liigvoolukaitse mudeli koostamist. Iru alajaama ühendatud generaatorite näitel on kirjeldatud generaatorite ja elektriraudtee mudelite ühildamist. Lisaks käsitletakse generaatorite modelleerimisel ilmnunud kitsendusi tulenevalt võimsuste hetkväärtuse võnkumisest. Peatüki viimane osa analüüsib pingesümmeetria mõju generaatori elektrisüsteemi stabilisaatorile ning üle- ja alaergutus piirajatele.

Viies peatükk koondab enda alla tänapäevasel staatilise sagedusmuunduriga konverterjaamadel põhineva elektriraudteesüsteemi rakendamist. Kirjeldatakse nii staatiliste sagedusmuundurite tööpõhimõtet kui tuuakse seni elektriraudteedel rakendust leidnud konverterjaamade näiteid, millest enamus on rajatud Euroopasse (eelkõige Põhjamaades). Antakse põhjalik ülevaade ka konverterjaamade eelistele ja puudustele.

Aruande kuues peatükk analüüsib elektriraudteest tingitud pingesümmeetriat ülekandevõrgu normaalkonfiguratsiooni ja konfiguratsiooni muutuste korral (N-1 juhtumid). Vaadeldakse tekkivat pingesümmeetria taset elektriraudtee liitumispunktis aga ka selle edasi kandumist üle kogu ülekandevõrgu. Tähelepanu on pööratud pingesümmeetriast tingitud mõjudele ülekandevõrgu teistele tarbijatele, eelkõige generaatoritele. N-1 juhtumite juures on vaadeldud strateegiliselt olulisemate ülekandeliinide välja lülitumist. Täiendavalt on mõnel juhul analüüsitud ka N-2 kriteeriumit ehk kahe toiteliini samaaegset välja lülitamist.

Seitsmendas peatükis analüüsitakse aga ülekandevõrgu lühisetalitlusega kaasnevaid mõjusid pingesümmeetria tingimustes talitlevatele generaatoritele. Ülekandevõrgu lühiste asukohana vaadeldakse ülekandevõrku ühendatud generaatorite seisukohast kriitilisemaid juhtumeid ehk lühist Iru ja Metsakombinaadi alajaama lattidel. Pingesümmeetria allika, elektriraudtee

koormuse liitumise asukohana on käsitletud kõiki projekti raames valitud liitumispunkti alajaamasid.

Lisaks ülekandevõrgus toimuvatele lühistele analüüsitakse aruande üheksandas peatükis ka elektriraudtee kontaktvõrgus toimuvate lühiste mõju liitumispunktidele ja ülekandevõrku ühendatud generaatoritele. Analüüsi käigus vaadeldakse kontaktvõrgu lühisest tingitud pingelohku alajaamade ja generaatorite lattidel. Elektriraudtee liitumispunktidenä on käsitletud kõiki projekti raamistikus välja valitud alajaamasid.

Aruande kümnendas peatükis on käsitletud rikketalitluse täiendavaid juhtumeid, kus ülekandevõrk talitleb N-1 juhtumi juures ning millele lisaks toimub elektriraudtee kontaktvõrgus lühis. Täiendava rikketalitluse mõjude hindamiseks ja analüüsi läbi viimiseks on valitud nii ülekandevõrgu põhja- kui lõunaosas valitud halvim juhtum. Ülekandevõrgu põhjaosas käsitletakse elektriraudtee liitumist Järveküla alajaamas ja lõunaosas Kehtna alajaama.

Elektriraudtee koormusest tingitud pingesümmeetria kompenseerimiseks võimalike parendavate meetmete rakendatavust kajastab aruande kümnes peatükk. Kirjeldatakse nii STATCOM-i kui *Scott*-trafost ja RPC seadmest koosneva hübriidlahenduse *PSCAD* tarkvaras koostatud mudeleid. Peatüki viimases osas on toodud mõlema kompenseerimiseadme rakendatavus pingesümmeetria kompenseerimiseks. Analüüsi läbi viimisel on lähtutud elektriraudtee koormuse liitumisest Kehtna alajaama.

Aruande viimases üheteistkümnendas peatükis on uurimistöö ja tehtud analüüside tulemusena antud soovitused elektriraudtee liitumise projekti raamistikus. Eraldi on soovitused välja toodud vastavalt liitumispunktidele ja pingesümmeetria piirmääradele. Lisaks on kirjeldatud elektriraudtee liitumisel vajalikeks osutuvaid edasisi mahte, nii uurimistöö kui ka vajalike mudelite raames.

1. Eesti 110 kV ülekandevõrgu mudeli täiendused

Käesolev peatükk käsitleb uurimistöö kolmandas [1] etapis koostatud 110 kV ülekandevõrgu *PSCAD* mudelites tehtud täiendusi. Mudelites tehtud uuenduste vajadus on tingitud projekti käesoleva etapi eesmärkidest ning lähteandmete täpsustumisest. Järgnevalt antakse ülevaade ülekandevõrgu ekvivalentide arvutamisel lähtunud konfiguratsioonidest ning mudeli seadistamisel kasutatud takistustest. Lisaks antakse ülevaade alajaamade koormusmudelites tehtud muudatustest ning N-1 juhtumite ja ülekandevõrgus aset leidvate lühiste analüüsimiseks mudelisse lisatud moodulitest.

1.1 110 kV ülekandevõrgu ekvivalendid

Alljärgnevalt on loetletud ülekandevõrgu mudelite (põhja- ja lõunaosa) ekvivalentpunktide asukohad ning Elering AS poolt esitatud konfiguratsioonid, millest ekvivalentsete takistuste arvutamisel on lähtunud.

Ülekandevõrgu *PSCAD* mudeli koostamisel on analüüsiv elektrivõrguosa eraldatud ülejäänud ülekandevõrgust kasutades selleks võrguekvivalentide meetodit. Arvutuste tegemiseks koostatud konfiguratsioonid kirjeldavad ülekandevõrgu seda osa, mis koostatud mudelist on välja arvatud ning on arvestatud ekvivalenteeritud takistuses. Mudelis kirjeldatud võrk on arvutuste tegemisel välistatud saavutamaks korrektne koormusvoogude jagunemine ning elektriline tugevus alajaamades.

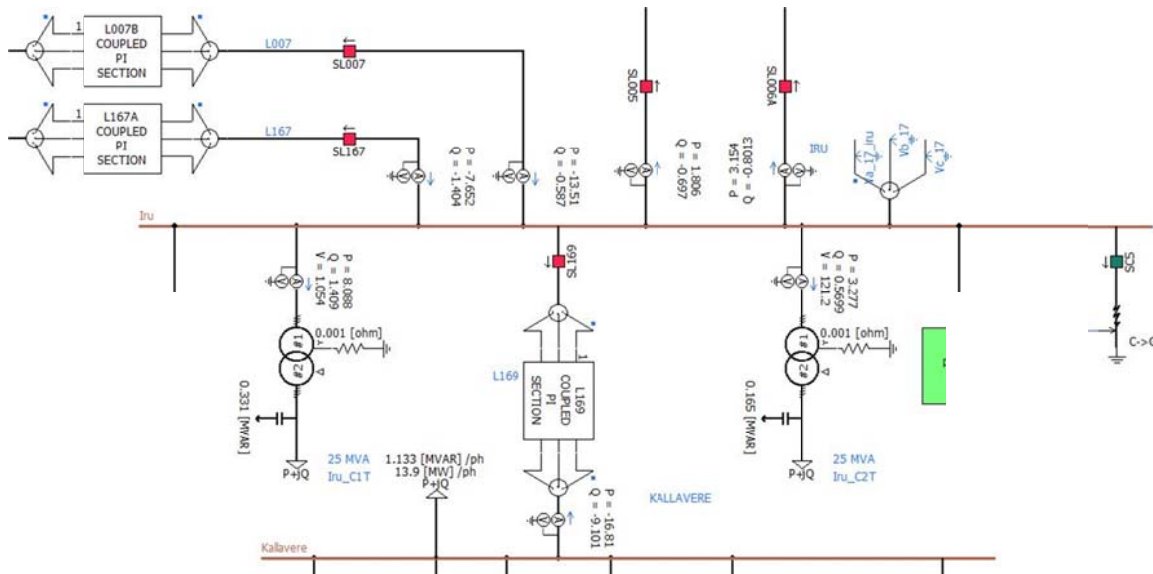
1.2 110 kV ülekandevõrgu koormusmudelid

Uurimistöös käesolevas etapis on lisaks uuendatud ka täpsustatud jaotusvõrgu koormusmudelite parameetreid vastavalt Elering AS poolt lähtematerjalina esitatud ülekandevõrgu 2021 aasta perspektiivset seadistust kirjeldavale *PSS/E* mudelile. Võrreldes projekti eelnevates etappides [1]-[2] lähtunud 2020 aasta perspektiivse ülekandevõrgu *PSS/E* mudeliga on uues mudelis ülekandevõrk detailsemalt modelleeritud ning koormused on sõlmalaajamades modelleeritud trafo sekundaarahelatesse. *PSS/E* mudeli suurenenud detailsus võimaldab vähendada koormusvoogude jagunemise erinevust tulenevalt erinevate tarkvarade rakendamisest. Uue esitatud mudeli põhjal on ülekandevõrgu koormuste perspektiivset kasvu hinnatud konservatiivsemalt, mistõttu väheneb kogu ülekandevõrgu koormus ka *PSCAD*i mudelis. Ülekandevõrgu *PSCAD* mudeli seadistamisel on lähtunud *PSS/E* mudeli 2021. aasta talvisest maksimaalkoormustest ning iga individuaalse koormuse seadistamisel on arvestatud jaotusvõrgu täpsustatud koormusmudeli mahtuvusliku koormusega. Jaotusvõrgu täpsustatud koormusmudeli seadistamise iseärasusi on täpsemalt kirjeldatud [1] ning käesoleva etapi raames on uuendatud mudelitesse kantud väärtuseid.

Seoses ülekandevõrgu ekvivalentide, koormusmudelite ja generaatorite mudelite uuendamisega on seadistatud ka *PSCAD* mudeli koormusvoogude jagunemist. Koormusvoogude jagunemise seadistamisel on aluseks võetud 2021. aasta perspektiivne *PSS/E* talvise maksimaalse koormusprofiiliga mudelis arvutatud koormusvoogude jagunemine ning mille põhjal on arvutatud ülekandevõrgu ekvivalentide võimsusvood. Nii *PSCAD* kui *PSS/E* tarkvaras on generaatorite mudelid seadistatud talitlema maksimaalse aktiivvõimsusega ja reaktiivvõimsuse regulaatorid on seadistatud 110 kV ülekandevõrgu liitumispunktis hoidma 0 Mvar sätet täpsusega ± 1 Mvar. Ülekandevõrgu ekvivalentide koormusvoogude seadistamisel on kasutatud PI kontrollritega ülekandevõrgu ekvivalentide ping- ja faasinihkenurga reguleerimise meetodit, mida on täpsemalt kirjeldatud [1].

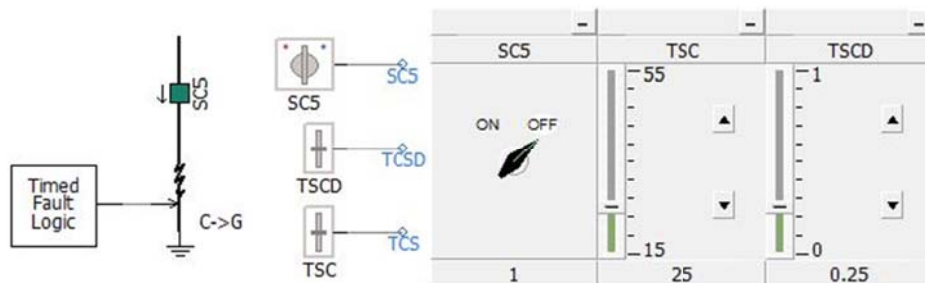
1.3 110 kV ülekandevõrgu mudeli täiendavad moodulid

Projekti käesoleva etapi N-1 kriteeriumite analüüsimiseks on ülekandevõrgu mudeleid täiendatud liinide standardse *PSCAD* „3 Phase Breaker“ võimsuslüliti mudeliga, võimaldamaks simulatsioonide käigus erinevaid ülekandeliine sisse- ja välja lülitamisi vastavalt N-1 stsenaariumitele. Joonisel 1.1 on näiteks toodud Iru alajaama mudel, mis sisaldab tehtud mudeli täiendusi.



Joonis 1.1. Täiendused Iru alajaama mudelis

Lühisetalitluste analüüsimiseks on ülekandevõrgu alajaamade mudeleid täiendatud lühise mooduliga, mis koosneb standardest PSCAD „Timed Fault Logic“ lühise aegloogikast, „Three Phase Fault“ seadistavast lühise mudelist ning „3 Phase Breaker“ võimsuslüliti mudelist. Lühise moodul on paigaldatud alajaama lattidele (joonis 1.1) ning mooduli täpsem ülesehitus koos koostatud juhtimisloogikaga on esitatud joonisel 1.2.



Joonis 1.2. Koostatud lühise PSCAD moodul koos juhtimisloogikaga

Lühise mooduli sisse- ja välja lülitamiseks kasutatakse võimsuslüliti, mis võimaldab määrata lühise toimumise simulatsiooni ajal. Võimsuslüliti juhtimiseks kasutatakse standardset PSCAD „Binary Switch“ mudelit, mis joonisel 1.2 on tähistatud sümboliga SC5 olles uni-kaalne igale ülekandevõrgu lühise moodulile. Lühise toimumise aja ning selle kestvuse seadistamiseks on kasutatud „Slider Control“ meetodit, kus lühise toimumise aja juhtimiseks mõeldud „Slider“ on joonisel 1.2 tähistatud sümboliga TSC ning lühise kestvuse määramiseks sümboliga TSCD.

1.4 Kokkuvõte

Peatükis 1 on kirjeldatud projekti käesolevas etapis ülekandevõrgu *PSCAD* mudelites tehtud täiendusi ning projekti eesmärkide täitmiseks lisatud mooduleid. Mudelite uuendamise esimeseks etapiks oli ülekandevõrgu ekvivalentide ja nende parameetrite täpsustamine. Vastavalt arvutuslikele konfiguratsioonidele on Elering AS koostanud ülekandevõrgu ekvivalentsed takistused. Täpsustatud lähteinformatsiooni põhjal on uuendatud ülekandevõrgu mudeli ekvivalentsete allikate takistuste väärtuseid.

Lisaks ülekandevõrgu ekvivalentidele on mudelites uuendatud ka koormusmudelite väärtusi vastavalt 2021. aasta perspektiivsetele *PSS/E* mudeli talvistele maksimaalkoormustele. Koormusmudelite väärtuste uuendamisel on tehtud täiendavaid arvutusi, et võtta arvesse jaotusvõrgu koormusmudeli mahtvuslikku koormust.

Ülekandevõrgu ekvivalentide, koormusmudelite ning generaatorite mudelite seadistamise järgselt on ülekandevõrgu koormusvoogude jagunemist reguleeritud vastamaks 2021. aasta ülekandevõrgu perspektiivse *PSS/E* talvise maksimaalkoormuse mudeliga.

N-1 juhtumite analüüsimise võimaldamiseks on ülekandevõrgu mudeleid täiendatud ülekandeliinide ahelasse paigutatud võimsuslülitite mudelitega, võimaldamaks ülekandevõrgu mudeli seadistamist vastavalt N-1 juhtumitele. Ülekandevõrgu lühisetalitluse analüüsimiseks on ülekandevõrgu sõlmajamadele lisatud lühise moodulid, mis võimaldavad simulatsiooni vältel valida soovitud lühise asukoha ülekandevõrgus ja määrata lühise toimumise aja ning selle kestvuse.

2. Pingeasümmeetria esmane hinnang ülekandevõrgu erinevate konfiguratsioonide korral

Projekti käesolevas etapis jätkatakse varasemas teises [2] ja kolmandas [1] etapis käsitletud elektriraudteest põhjustatud mõjude analüüsi ülekandevõrgu talitluse seisukohast ning mõjude jaotumist ülekandevõrgus. Projekti teises etapis analüüsiti Rail Balticu elektriraudtee esmasid määratud trassikoridore, mille alusel valiti trasside vahetusse lähedusse jäävad võimalikud elektriraudtee liitumispunkti sobivad alajaamad. Analüüsimiseks valiti Harjumaal Aruküla, Iru, Järve, Jüri ja Kiisa alajaamad. Raplemaal vaadeldi Järvakandi, Kehtna ja Rapla alajaamasid ning Pärnumaal Kilingi-Nõmme, Metsakombinaadi, Papiniidu ja Sindi alajaamasid. *PSCAD* tarkvaras tehtud simulatsioonide ja nende analüüsitulemuste põhjal selgus, et Harjumaal osutub sobivateks liitumispunkti alajaamadeks Iru, Järve ja Aruküla. Raplemaal vaadeldud alajaamade analüüs näitas, et elektriraudtee liitumine osutub piiratuks kõikide eelnevalt nimetatud alajaamade korral, kus liitumisega kaasneksid talitlusprobleemid ülekandevõrgus ning elektri kvaliteedinäitajate halvenemine. Samaväärsed järeldused tehti ka Pärnumaa liitumispunkte analüüsid. Pärnumaal näitasid analüüsid kõige paremaid tulemusi Sindi alajaama liitumispunkti valikul, kus elektriraudtee liitumisest tingitud mõjud osutusid kõige väiksemateks kuid liitumine Sindi alajaama eeldab kindlasti täiendavate meetmete rakendamist. Projekti kolmandas etapis jätkati eelnevalt valitud liitumispunktide analüüsimist vaadeldes elektriraudtee liitumisega kaasnevaid mõjusid teistele tarbijate, kaasates analüüsi ka kontaktvõrgu aset leidvate siirdeprotsessidega kaasnevad mõjud [2].

Eelnevates etappides on elektriraudtee liitumist analüüsitud ülekandevõrgu normaalkonfiguratsiooni juures, kus võrgu elektriline tugevus on maksimaalne. Käesolevas etapis vaadeldakse elektriraudtee liitumisega kaasnevaid mõjusid ülekandevõrgu muutuvate konfiguratsioonide korral, kus võrgu elektriline tugevus väheneb ja muutub koormusvoogude jaotus. Lisaks lähtutakse nüüdseks Rail Balticu projektis täpsustatud trassi liitumispunktide, milleks Harjumaal on Järveküla alajaam, Raplemaal Kehtna alajaam ning Pärnumaal Sindi (täpsemalt uus alajaam Sindi läheduses) ja Häädemeeste/Nepste alajaamad. Lähteülesandega kindlalt määratud liitumispunktid vähendavad simulatsioonide arvu ja võimaldavad põhjalikumalt analüüsida elektriraudteest tingitud mõjusid ülekandevõrgu ja teiste tarbijate seisukohast.

Projekti käesolevas etapis vaadeldakse ka elektriraudtee liitumisest tingitud negatiivsete mõjude parendusmeetodeid ja nende rakendatavust. Käsitletakse elektriraudtee liitumist läbi

3. Dünaamiliste protsesside analüüsi meetodikad eritüübiliste tarbijate puhul

Käesolevas peatükis kirjeldatakse eritüübiliste tarbijate modelleerimise võimalusi elektrisüsteemi talitluse analüüsimiseks, vastavalt Elering AS-is kasutusel olevatele *PSS/E* ja *PSCAD* tarkvarapakettidele. Eritüübiliste tarbijate all mõeldakse selliseid koormusi, mis oma talitluse iseärasustest ja ülekandevõrgu ühenduse tehnoloogiast tulenevalt koormavad ülekandevõrgu kolme faasi asümmeetriliselt. Ülekandevõrku (Eestis pingega 110 kV ja enam) loetakse normaalolukorras sümmeetriliselt talitlevaks süsteemiks, mille elemendid on projekteeritud ja ehitatud vastavalt sümmeetrilisele talitlusele.

Asümmeetrilist talitlust loetakse valdavalt madalpinge jaotusvõrkude probleemiks, kus ühefaasilise ühenduse ja asümmeetrilise talitluskarakteristikuga koormused on igapäevane nähtus. Sellest hoolimata püüeldakse ka jaotusvõrkudes sümmeetrilise talitluse poole. Tulenevalt tarbijate rohkusele on jaotusvõrgu koormuste jaotamisega erinevate elektrisüsteemi faaside vahel võimalik saavutada sümmeetriline talitus kõrgemal pingestmel ning seega on asümmeetriline talitus vaid lokaalne probleem. Tänu jaotusvõrgusisesele koormuste jaotamisele näib koormus ülekandevõrgu liitumispunktis sümmeetrilisena. Ülekandevõrkudes tuleneb asümmeetriline talitus enamasti rikestest (asümmeetrilised lühised ja lülitusseadmete valetalitus) ja on oma olemuselt lühiaegsed ning mööduvad.

Normaaltalitluses ülekandevõrgu sümmeetrilisus on määrav ülekandevõrgu talitluse analüüsimiseks kasutatavates tarkvarapakettides, kus sümmeetriast lähtumine võimaldab teha lihtsustusi nii arvutuslikus lahendajas (*solver*) kui ka mudelite koostamisel. Eeldades, et asümmeetrilist talitlust esineb vaid rikete korral, kuulub asümmeetriline talitusrežiim tarkvarapakettides eraldi moodulina lühiste analüüsimise alla.

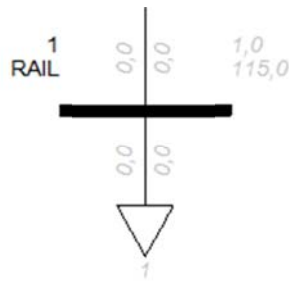
Elektromagnetiliste siirdeprotsesside analüüsimisvõimekusega tarkvarapakettides (*EMTP*) ei ole ülekandevõrgu sümmeetrilisust võimalik lihtsustada, kuna viimane põhjustaks liialt suuri ebatäpsusi, mistõttu ei ole antud protsesse võimalik vaadelda. Antud tarkvarapakettide arvutuslik lahendaja ja mudelid on seega detailsemad nõudes rohkem lähteparameetreid. Ühtlasi on nende kasutamine ka keerulisem.

Järgnevalt antakse ülevaade *PSS/E* tarkvara kasutusel lähtunud lihtsustustest ja eritüübiliste tarbijate modelleerimisvõimalustest. Misjärel käsitletakse eritüübiliste tarbijate modelleerimist *PSCAD* tarkvaras.

3.1 Eritüübiliste tarbijate analüüsimine PSS/E tarkvaras

PSS/E (Power System Simulator for Engineering) on esimene kommertselt kasutatav koormusvoogude jagunemise arvutustarkvara. *PSS/E* võeti kasutusele 1976. aastal ning käesoleval hetkel on selle uusimaks versiooniks 33.9/34 (2016) [8]. Tulenevalt ajaloolisest arengust lähtutakse arvutuste tegemisel sümmeetriliste komponentide meetodist. Sümmeetriliste komponentide teooria võimaldab elektrisüsteemi kolmefaasilised parameetrid jaotada kolmeks sümmeetriliseks pari-, vastu-, ja nulljärgnevuskomponentideks. Pärijärgnevussüsteemis on kõik vektorid võrdse pikkusega ning nende vahelised nihkenurgad on teineteise suhtes nihkes 120° päripäeva. Vastujärgnevussüsteemi vektori nihkenurgad on seejuures nihkes 120° vastupäeva ning nulljärgnevussüsteemi vektorid on omavahel võrdsed [9]. Arvutused pärijärgnevuskomponentidega iseloomustavad elektrisüsteemi sümmeetrilist talitlust ja vastujärgnevuskomponentidega asümmeetrilist talitlust. Samas kui nulljärgnevuskomponendid iseloomustavad neutraalpunkti nihkest tingitud mõjusid [9]. Lähtudes, et ülekandevõrk talitleb normaalolukorras sümmeetriliselt on *PSS/E* tarkvara ülesehitust lihtsustatud ning mudelites lähtutakse vaid pärijärgnevussüsteemi arvutustest. Teistest järgnevuskomponentidest loobumine võimaldab arvutusmahtu vähendada, mistõttu saab võimalikus suuremate mudelitega analüüside tegemine [8]. Sellest tulenevalt ei ole *PSS/E* tarkvara võimalik kasutada asümmeetriliste koormuste modelleerimiseks. Viimane tarkvara versioon sisaldab küll vastu- ja nulljärgnevuskomponentidel põhinevaid arvutusmooduleid, kuid neid on võimalik kasutada vaid asümmeetriliste lühiste arvutamisel [8].

Järgnevalt kirjeldatakse elektriraudtee mudeli näitel lihtsustusi, mis võimaldavad eritüübilist koormust *PSS/E* mudelisse lisada. Elektriraudtee koormust on *PSS/E* tarkvara mudelis võimalik kajastada kolmefaasilise konstantse PQ koormusmudelina koormusvoogude jagunemise (*load-flow*) arvutamisel. Seda aga juhul, kui koormuse asümmeetria mitte arvestamine ja sellest tulenevad ebatäpsused on mudeli koostajale aktsepteeritavad ning tekkiv ebatäpsus on väiksem kui elektriraudtee koormuse arvestamata jätmine. Tulenevalt tarkvara piirangutest ei ole elektriraudtee kontaktvõrgu ja ühendustrafo mudelit võimalik modelleerida ning mudel lihtsustub ekvivalentseks koormusmudeliks 110 kV lattidele. Joonisel 3.1 on toodud elektriraudtee koormuse modelleerimise vastavalt kirjeldatud lahendusele.



Joonis 3.1. Koormusmudel PSS/E tarkvaras

Konstantne PQ koormusmudel on lihtsustusena aktsepteeritav, kuna nüüdisaegsetes elektrivedurites kasutatakse efektiivsema juhtimise saavutamiseks konverteritel põhinevaid ajameid [2]. Jõuelektronikal põhinevad konverterid eraldavad pingetundlikud tarbijad elektrivõrgu vastastikmõjust, kus pinge muutused elektrivõrgus põhjustaks koormuse muutust ning koormuse muutus omakorda põhjustaks pinge muutust. Lisaks võimaldavad konverterid juhtida elektrivõrgust tarbitavat aktiivvõimsust ja reaktiivvõimsuse kompenseerimisega reguleerida lokaalset pinget. Seega käitub konverteril põhinev koormus ülekandevõrgu seisukohast kui konstantse aktiiv- ja reaktiivkoormusega mudel. Joonisel 3.2 on toodud konstantse aktiiv- ja reaktiivkoormusega mudeli seadistus.

Joonis 3.2. Koormusmudeli seadistus PSS/E tarkvaras

Eelnevalt kirjeldatud lihtsustuste põhjal ei võimalda PSS/E tarkvara dünaamikamoodul elektriraudtee koormuse täpse talitluse analüüsi teostada. Modelleerides elektriraudteed konstantse PQ koormusmudelina, on dünaamikast lähtuvate analüüside teostamisel elektriraudtee mõju teistele seadmetele sarnane tavalisele sõlmekoormusele.

Järgnevalt käsitletakse elektriraudtee ühendusviisidest tekkivaid ebatäpsuseid, kui elektriraudtee koormust modelleerida *PSS/E* tarkvaras kolmefaasilise sümmeetrilise koormusena. Elektriraudtee ühendusviiside iseärasusi on täpsemalt kajastatud [2]. Käesolevasse aruandesse on lisatud vaid liitumiseks kasutatavate trafode lülitusskeemid (joonis 3.3).

*Joonis 3.3. Tüüpilised elektriraudtee ühendu-
trafode lülitusskeemid: a) ühefaasiline jõutrafo;
b) Scott-trafo; c) V-ühendusega trafo [2]*

Ühefaasiline jõutrafo

Elektriraudtee ühendamisel ülekandevõrku kasutatakse selleks enamasti ühefaasilist jõutrafot (joonis 3.3). Tulenevalt liiniühendusest on ühefaasilise jõutrafo rakendamisel ülekandevõrgu kolmest faasist koormatud vaid kaks. Kirjeldatud iseärasusega koormuse modelleerimisel *PSS/E* tarkvaras tekib ebatäpsusi arvutustulemustes, kuna tarkvara teeb arvutused sümmeetrilise kolmefaasilise koormusmudeliga, mis ei vasta aga reaalsele koormusolukorrale. Asümmeetrilise koormuse modelleerimine sümmeetrilise koormusena põhjustab ebatäpsusi liigpingete arvutuslikus keskmises efektiivväärtuses. Sümmeetrilise koormuse korral on liinipingete väärtused võrdsed ja seega on nende keskvärtus madalam võrreldes tegelike liinipingete efektiivväärtusega. Maksimaalsete pingete piirväärtuste analüüsimisel tuleb antud ebatäpsusega arvestada. Olukorras, kus arvutuslik pingete vastab piirmääradele tekib tegeliku süsteemis koormamata faasis ülepinge. Kirjeldatud iseärasuse tõttu on liiniühendusega asümmeetrilise koormuse modelleerimise võimalused *PSS/E* tarkvaras piiratud.

Eritüübilised trafoühendused

Elektriraudtee ühendamisel kasutatakse ka eri tüüpi trafoühendusi, millest kõige enam leiavad kasutust *Scott*- (joonis 3.3) ja V-ühendusega trafo (joonis 3.3). Mõlema trafotüübi detailne kirjeldus ja nende sekundaarahela faaside koormuste kombinatsioonid on toodud [2]. Elektri-

raudtee koormuse ühendamisel läbi eri tüüpi trafoühenduste näib koormus ülekandevõrgule kui kolmefaasiline sümmeetriline koormus. Sellise koormusjaotuse juures ei teki *PSS/E* tarkvara rakendamisel eelnevalt kirjeldatud viga koormusvoogude arvutamisel. Vaadeldes aga äärmuslikke juhtumeid, kus ülekandevõrgu üks faasidest on maksimaalselt koormatud ja teine tühijooksutalitluses, käituvad eri tüüpi trafoühendused sarnaselt ühefaasilisele jõutrafole [2]. Seega kaasnevad ka eri tüüpi trafoühenduste korral *PSS/E* mudeli rakendamisel sarnased ebatäpsused ühefaasilise jõutrafoga. Eri tüüpi trafoühenduste korral tuleks modelleerimisel lähtuda eeldusest, et elektriraudtee kontaktvõrk talitleb konfiguratsioonis, mis tagab ülekandevõrgu seisukohast sümmeetrilise koormuse.

3.2 Eritüübiliste tarbijate analüüsimine PSCAD tarkvaras

EMTDC/PSCAD (Electromagnetic Transients Including DC-Power System Computer Aided Design) tarkvarapaketti on arendatud alates 1975. aastast, mille hetke viimseim versiooni 4.6. *EMTDC* tarkvara elektrivõrgu lahendus ning arvutuslik lahendaja on sarnaste põhimõtetega nagu teised *EMTP* tarkvarapaketid, kuid sisaldab täiendavaid lahendusi, mistõttu on tarkvara kasutus laiem kui vaid elektromagnetiliste siirdeprotsesside uurimine [10]. *PSCAD* tarkvara on *EMTDC* arvutusliku lahendaja graafiline kasutajaliides. Edaspidiselt viidatakse *PSCAD* tarkvarale kui kahe tarkvara kombinatsioonile.

PSCAD tarkvara kirjeldab ja lahendab elektromehaanilisi ja elektromagnetilisi diferentsiaalvõrrandeid aegfunktsioonidena, see võimaldab elektrisüsteemide talitlust kirjeldada matemaatilisel kõrgeimal tasemel. Tarkvara rakendatavus on piiratud vaid kasutaja võimekusega süsteemile ja protsessidele vastavate täpsete matemaatiliste mudelite koostamisel [10].

PSCAD tarkvaras kirjeldatakse süsteemi faase eraldiseisvate aegfunktsioonidena, mistõttu puuduvad arvutusmetoodikast tulenevad piirangud asümmeetrilistele tarbijatele. *PSCAD* tarkvara sobivust eritüübiliste tarbijate analüüsimiseks kinnitab projekti eelnevates etappides [1]-[2] koostatud elektriraudtee toitesüsteem, selle üksikkomponentide matemaatiliste mudelite kirjeldused ning analüüsi käigus saadud tulemused.

PSCAD tarkvara puuduseks on suurte ülekandevõrgu mudelite analüüsimisel nende koormusvoogude jagunemist arvutava mooduli puudumine. Ühtlasi ka protsesside vähene automatiseeritus, mistõttu on mudelite seadistamine ajamahukas ja keeruline protsess. Mudeli lähte-koormusvoogude jagunemise arvutamisel on tarvis kasutada täiendavat tarkvara, see on olulise tähtsusega mitme elektrivõrgu ekvivalendiga süsteemis.

3.3 Kokkuvõte

PSS/E tarkvara lähtub arvutuste tegemisel sümmeetriliste komponentide meetodist. Ülekandevõrgu normaaltalitusel on eelduseks selle sümmeetrilisus ning seega lähtutakse *PSS/E* tarkvara ülesehituses lihtsustusest, kus mudelite koostamisel ja modelleerimisarvutustes tuginetakse vaid pärijärgnevussüsteemile. Sellest tulenevalt ei ole *PSS/E* tarkvara võimalik kasutada asümmeetriliste koormuste modelleerimiseks. Elektriraudtee koormust on koormusvoogude jagunemise arvutamisel *PSS/E* mudelis võimalik aga kajastada kolmefaasilise konstantse PQ koormusmudelina. Viimasest tingitud ebatäpsus peab aga mudeli koostajale olema aktsepteeritav ning ebatäpsuse suurus peab olema väiksem kui elektriraudtee koormuse mitteametamine modelleerimisel.

Elektriraudtee ühendamisel ülekandevõrku läbi ühefaasilise jõutrafo saab *PSS/E* mudelit kasutada vaid koormusvoogude jagunemise ja ülekandevõrgu seadmete ülekoormatuse hindamiseks. Elektriraudtee liitumispunktides eri tüüpi trafoühenduste rakendamisel ning kontaktliini sümmeetrilisel talitusel annab *PSS/E* tarkvara soovitud täpsusega tulemusi. Kontaktvõrgu faasikoormuste asümmeetria korral on eri tüüpi trafoühenduste (*Scott*- ja V-ühendusega trafo) talitus ülekandevõrgu seisukohast samaväärne ühefaasilisele jõutrafole, mistõttu *PSS/E* tarkvaras modelleerimine toob kaas ebatäpsusi tulemustes.

Erinevalt *PSS/E* tarkvarast on *PSCAD* igati sobiv eritüübiliste tarbijate analüüsimisel, seda kinnitab ka projekti eelnevates etappides [1]-[2] tehtu ja saadud tulemused. Seega on Elering AS poolt kasutatavatest tarkvarapakettidest eritüübiliste tarbijate modelleerimisel sobivaim *PSCAD* tarkvara, mis võimaldab suuremat täpsust ja puuduvad tarkvara ülesehituse lihtsustustest tulenevad piirangud.

4. Pingeasümmeetria mõju pöörlevate elektriseadmete talitlusele dünaamilistes protsessides

Käesolevas elektritranspordi projekti etapis jätkatakse, eelnevas etapis alustatud, elektriraudteest tingitud pingeasümmeetria ning kontaktvõrgus toimuvate dünaamiliste protsesside mõjude analüüsimist pöörlevatele seadmetele. Elektritranspordi kolmandas etapis koostati 25 MW koostootmisjaama agregeeritud mudel *PSCAD* tarkvaras, et analüüsida elektriraudteest põhjustatud mõjude jagunemist ülekandevõrgus ning nende ülekandumist pöörlevatele seadmetele. Saadud tulemused näitasid, et elektriraudtee liitumine ülekandevõrgu normaalkonfiguratsiooni juures mõjutab oluliselt pöörlevate seadmete talitlust. Ülekandevõrgu elektriliselt nõrgemas Lõuna-Eesti piirkonnas selgusid elektrisüsteemi tugevuse ja elektriraudtee koormuse kombinatsioonid, kus voolu vastujärgnevuskomponent ületas generaatorile lubatud piirmäära tuues kaasa seadme välja lülitumise [1]. Projekti käesolevas etapis on ette nähtud probleemi täpsem vaatlemine erinevate elektrisüsteemi konfiguratsioonide, elektritugevuse ning pöörlevate seadmete erinevate talitlusrežiimide juures, et määrata põhjalikumalt tekkivate mõjude ulatus [1]. Projekti raames vaadeldakse pöörlevate masinatena sünkroongeneraatoreid, kuna nad on ülekandevõrguga otseühendatud ning ühtlasi omab võrguettevõtja sünkroongeneraatorite kohta enam informatsiooni kui mootorite kohta. Sünkroongeneraatorite põhjal tehtud pingeasümmeetria mõjude üldistusi võib kohandada ka mootoritele.

Rail Balticu projekti trassi täpsustumisega on üheks võimalikuks liitumispunktiks määratud Järveküla alajaam, mis praeguse elektrivõrgu konfiguratsiooni korral saab toite Järve ja Iru alajaamadest. Kõne all olev liitumispunkt koos elektrivõrgu konfiguratsiooni ja Iru alajaama ühendatud kolme elektrijaamaga annab unikaalse koosluse projekti käesolevaks etapiks seatud eesmärkide täitmisel. Vaadeldavad kolm elektrijaama on võimsusklassilt samaväärsed, kuid omavad erinevaid tehnilisi lahendusi laiendades seega tulemuste üldistatavust.

Täiendavalt analüüsitakse ülekandevõrgu Lõuna-Eesti piirkonnas Metsakombinaadi alajaama liitunud Pärnu Elektriijaamas, elektriraudtee liitumispunktist kaugemale ulatuvaid mõjusid. Tulenevalt Rail Balticu trassiprojekti täpsustustest on Lõuna-Eestisse planeeritud kaks liitumispunkti, Sindi alajaama lähedusse ning Häädemeeste ja Kilingi-Nõmme alajaama vahele. Antud liitumispunktid asuvad elektriliselt nõrgas ülekandevõrgu osas ning jäävad Metsakombinaadi alajaamas liitunud elektrijaamast kaugemale. Andes seega võimaluse elektriraudtee talitlusest tingitud mõjude analüüsimiseks lähtuvalt kauguleulatavuse spetsiifikast.

Järgnevalt antakse ülevaade Iru alajaamas liitunu mudelitest ning nende olulisematest komponentidest. Lisaks kirjeldatakse generaatori mudelites tehtud täiendusi ning nende kohandamist ülekandevõrgu mudelis lähtuvalt projekti käesoleva etapi spetsiifikast. Täiendavalt kirjeldatakse ka vastujärgnevuskomponendi liigvoolukaitse relee modelleerimist ning talitluspõhimõtet. Antud peatüki viimases osas kajastatakse generaatori mudelitega tehtavaid simulatsioonistsenaariume ning püstitatud eesmäärke.

4.1 Generaatorite mudelid

ette nähtud alternatiivne lahendus. Tavapäraselt rakendatakse staatilisi erguteid generaatori ergutuse otse juhtimiseks, võimaldades seega suuremat reguleerimise kiirust. Harjasteta ergutussüsteemi puhul on reguleerimiskiirus aeglasem tulenevalt süsteemi astmelisusest ning generaatori pöörlemiskiiruse sõltuvusest. Ergutussüsteemis rakendatakse üle- ja alaergutus piirajatena otsest ergutusvoolu juhtimisel põhinevaid piirajaid, mille täpsem kirjeldus on toodud [11]. Pingeasümmeetriast põhjustatud voolu vastujärgnevuskomponent mõjutab otseselt ergutusvoolu. Ergutusvoolu juhtimisel põhinevaid piirajaid loovad täiendavaid analüüsi võimalusi nii ala- kui ka üleergutusrežiimis. Kirjeldatud G1 erguti mudel on toodud joonisel 4.4.

Joonis 4.4. Generaatori G1 ergutussüsteemi mudel

G1 ergutussüsteemis kasutatakse *IEEE* PSS2B standardiseeritud elektrisüsteemi stabilisaatorit. Stabilisaatori mudeli parameetrid on esitatud aruandes [11] ning stabilisaatori talitlust ja mõju on kirjeldatud [3]. PSS2B mudeli põhimõtteline plokk-skeem on esitatud joonisel 4.5.

Joonis 4.5. Elektrisüsteemi stabilisaatori PSS2B plokk-skeem

Generaatori G1 kiirusregulaator on modelleeritud kombinatsioonina *PSCAD* standard kiirusregulaatorist GOV4 (digitaalne elektrohüdrauliline kiirusregulaator) ja *IEEE* G1 auruturbiini mudelist. Kiirusregulaatori mudelit kajastab joonis 4.6.

Joonis 4.6. Generaatori G1 kiirusregulaatori mudel

Analoogselt generaatorile G1 kasutatakse ka G2 ergutusüsteemis *IEEE* standardiseeritud PSS2B elektrisüsteemi stabilisaatorit (joonis 4.5). Stabilisaatori mudeli parameetrid on esitatud [11] ning stabilisaatori talitlust ning mõjusid kirjeldab [12].

Generaatori mudelis kasutatakse *Basler* DECS-200 harjasteta vahelduvvoolu ergutit, mis põhineb *IEEE* standardiseeritud ergutil AC8B. Koostatud mudel vastab tööpõhi-mõttelt standardis *IEEE* 421.5-2005 esitatud AC8B tüüpmodeli lahendusele, kuid sisaldab täiendusena tootjapoolseid erisusi. Võrreldes joonistel 4.8 ja 4.11 esitatud AC8B erguti plokk-skeeme järeldeb, et DECS-200 puhul rakendatakse juhtimissüsteemi põhiahelas signaali dimensioonivaid võimendustegureid. Selliselt jadamisi asetsevad võimendustegurid mõjutavad üksnes mudeli seadistamist ning PID kontrolleri parameetrite suurus. Mudelite omavahelisest võrdlusest järeldeb ka, et V/Hz piiraja võtab rakendumise korral üle erguti juhtimisahela sät-teväärtuse MIN funktsiooniga. G2 erguti puhul on lähtunud AC8B klassikalisest lahendusest, kus piiraja funktsioonide väljundid liidetakse juhtimisahela põhi liitmispunkti. Mudelite erinevad lahendused ei mõjuta korrektse seadistuse korral mudeli talitlust. Analoogselt G2 generaatorile kasutatakse generaatoris samade tööpõhimõtetega üle- ja alaergutuspiirajaid, mille talitlusi kirjeldab [13].

Joonis 4.11. Elektriijaama AC8B ergutusüsteemi mudel

Elektriijaama ergutusüsteemis kasutatakse IEEE standardiseeritud PSS2A elektrisüsteemi stabilisaatorit. PSS2B on oma olemuselt PSS2A stabilisaatori edasiarendus, milles on täienduseks võimalik kasutada „Lead-Lag“ funktsiooni ajakonstantidega T10 ja T11, et saavutada laiem reguleerimisulatus [14]. Stabilisaatori mudeli parameetrid on esitatud [13] ja stabilisaatori talitlust ning mõju on kirjeldab [15]. PSS2A mudeli põhimõtteline plokk-skeem on toodud joonisel 4.12.

Joonis 4.12. Elektriijaama PSS2A elektrisüsteemi stabilisaator

Elektriijaama turbiini kiirusregulaatorina kasutatakse MAN auruturbiinide kiirusregulaatori mudelit. Oma olemuselt on joonisel 4.13 esitatud kiirusregulaator sarnane joonisel 4.9 esitatud G2 kiirusregulaatorile, kuid kahe mudeli vahe tuleneb „Fast-Valving“ funktsioonist, mida elektriijaamas ei rakendata. Mudeli koostamise põhimõtted ning lähte parameetrid on esitatud [13].

Joonis 4.13. Elektriijaama turbiini kiirusregulaatori mudel

Elektriijaama generaatori modelleerimismudelite täiendused

Elering AS poolt esitatud mudel on eelkõige lühiskatse läbiviimiseks, sellest tulenevalt on mudeli parameetrid konstantsete väärtustega määratud ühele kindlale talitlusrežiimile. Käesolevalt on mudelit täiendatud selliselt, et võimaldada vastavate parameetrite reguleerimist ning mudeli moodulite sisse- ja väljalülitamist ilma, et mudeli põhiparameetreid oleks sealjuures muudetud. Mudelis tehtud muudatusi kajastab alljärgnev loetelu.

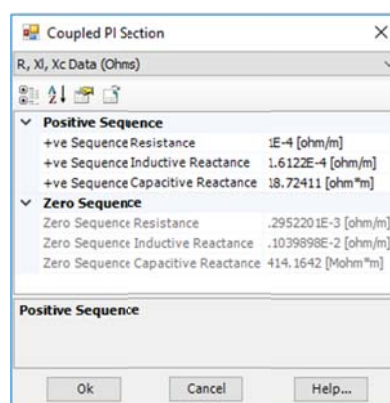
- lisatud on erguti pinge sätteväärtuse reguleerimise võimalus vahemikus 0,9-1,1 sü;
- lisatud on reaktiivvõimsusregulaatori sätteväärtuse muutmise võimalus vahemikus 11,09-14,04 Mvar;
- lisatud võimalus valida konstantse Q ja U funktsiooni vahel Iru alajaama lattidel;
- lisatud võimalus simulatsiooni käigus sisse ja välja lülitada elektrisüsteemi stabilisaatorit, üle- ja alaergutus piirajaid, V/Hz piirajat ning reaktiivvõimsusregulaatorit;
- lisatud võimalus reguleerida kiirusregulaatori tundetust vahemikus 0-250 mHz;
- lisatud võimalus reguleerida kiirusregulaatori statismi vahemikus 2-8%;
- lisatud võimalus muuta generaatori aktiivvõimsuse sätteväärtust, kiirusregulaatori mudelit täiendati sobiva sätteväärtust teisendava funktsiooniga;
- elektrisüsteemi stabilisaatori mudelisse on lisatud viide mudeli käivitumise ajaks, et välistada mudeli käivitumisest tingitud valereaktsioone;
- lisatud võimalus muuta liitumistrafo astmelüliti astet;
- lisatud mõõtmispunktid ning graafikud.

Lisaks loetelus toodud muudatustele on mudelisse lisatud täiendavad liigvoolukaitses, mida kajastatakse täpsemalt jaotises 4.3.

Agregeeritud generaatori modelleerimismudeli täiendused

Agregeeritud mudeli koostamist ning selle komponente on kirjeldatud projekti eelnevas etapid [1]. Projekti käesolevas etapis on mudelis tehtud mõned muudatused. Täiendatud agregeeritud generaatori mudelit kajastab joonis 4.14.

Joonis 4.4. Agregeeritud generaatori täiendatud mudel



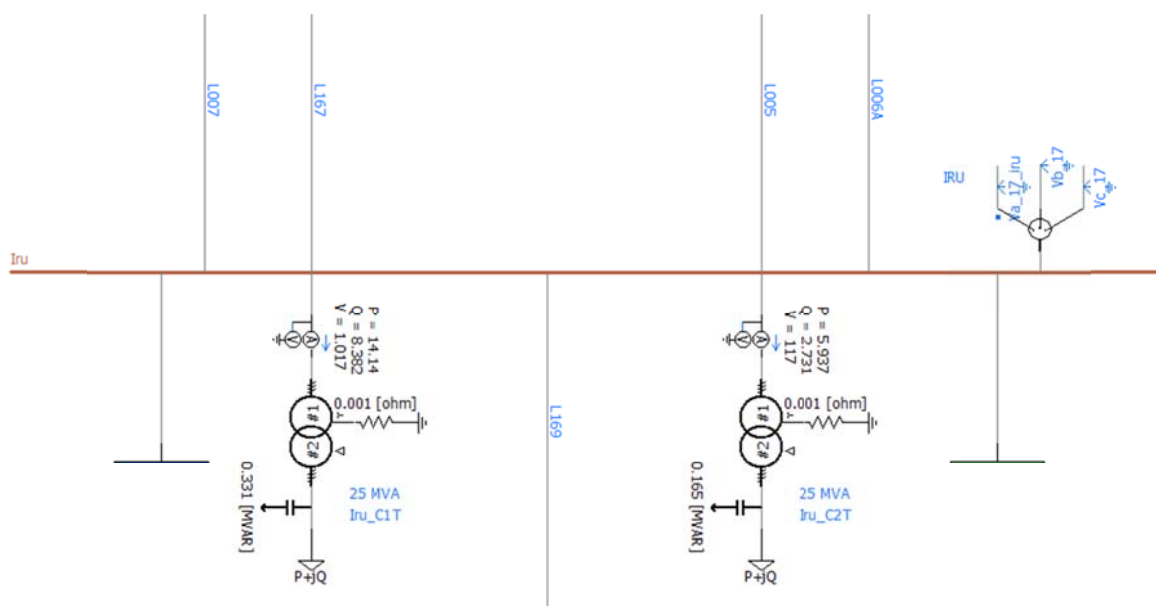
Joonis 4.15. Mudelisse lisatud kaabelliini parameetrid

Lisaks täiendavale kaablimudelile on agregeeritud generaatori mudelisse kaitsefunktsioonide-na modelleeritud nii üle- ja alapingekaitse kui ka alapeatükis 3.3 käsitletavat kaitset. Kaitse-süsteemide parameetrid on valitud järgmiselt: $U_{min} = 0,9xU_n$, 1 sekund ja $U_{max} = 1,2xU_n$, 1 sekund. Kaitsefunktsioonide toime on teostatud generaatori lülitile. Üle- ja alapingekaitsete mudelid on esitatud joonisel 4.16.

Joonis 4.16. Agregeeritud generaatori mudeli üle- ja alapingekaitse

4.2 Iru alajaama ühendatud generaatorite ja elektriraudtee mudelite ühildamine

PSCAD tarkvara eripärade tõttu on erinevates failides paiknevate mudelite ühildamine ühises-se mudelisse tähelepanu- ning aeganõudev ettevõtmine. Ühest failist teise kopeerimise raken-damine ei ole korrektne ning võib kaasa tuua mudeli ebakorrektset talitlust. Õige lähenemine on kasutada *PSCAD* tarkvara funktsioone „*Export With Dependents*“ ja „*Import Definitions*“. „*Export With Dependents*“ funktsiooniga luuakse mudelit kirjeldav fail, mille kohaselt on võimalik uues failis „*Import Definitions*“ ning „*Create Instance*“ funktsioonidega taastada mudel, kus mudelite lähtekoodid on korrektselt indekseeritud ja ühendatud. Protsessi lihtsus-tamiseks on soovituslik enne mudeli ülekandmist luua uus moodul, millesse tuleks kanda kõik ühest mudelist teise ülekandmisele kuuluvad mudeli osad. Iru alajaama liitunud elektrijaama-de ülekantud ning ühildatud mudeleid kajastab joonis 4.17.



Joonis 4.17. Iru alajaama mudel

Koormusvoogude jagunemise optimeerimine

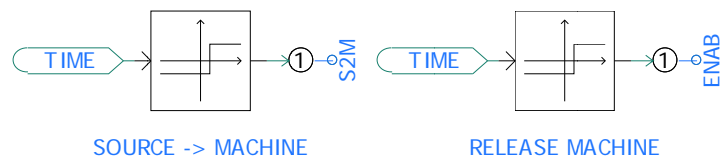
Võrreldes projekti eelnevas etapis koostatud mudeliga on suurenenud Iru alajaamas genereeritav võimsus, sellest tulenevalt on mudelite ühildamise järgselt tarvis optimeerida ülekandevõrgu võimsusvoogude jagunemist. Koormusvoogude seadistamisel lähtutakse Eesti ülekandevõrgu *PSS/E* tarkvara mudelist, mille konfiguratsioon seatakse *PSCAD* mudeliga vastavusse.

PSS/E tarkvara koormusvoogude jagunemise põhjal arvutatakse võimsusvood *PSCAD* mudeli ekvivalentidele, mis on säteväärtuseks [1] kirjeldatud PI-kontrolleritel põhinevatele juhtimisüsteemidele. Vastavalt ülekandevõrgu iga ekvivalendi mõõteinformatsioonile ja säteväärtusele arvutab PI-kontroller igale ekvivalendile sobiva faasinihkenurga ja sõlmalajaama latipinge väärtuse, mis vastab *PSS/E* mudeli koormusvoogudele. Tulenevalt asjaolust, et *PSCAD* tarkvarasse ei ole integreeritud koormusvoogude jagunemist arvutavat moodulit tuleb eelnevalt kirjeldatud koormusvoogude optimeerimist teostada iga *PSCAD* mudeli konfiguratsiooni muutuse järel. Käesoleva vahearuande etapis on koormusvoogude jagunemist optimeeritud ühildatud generaatori mudelite numbrilise stabiilsuse ning talitluse testimiseks.

Generaatori mudelite lähteparameetrite optimeerimine

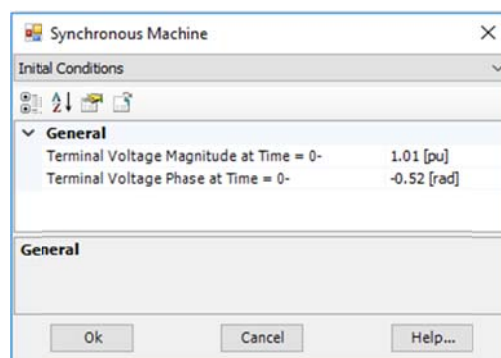
Lisaks koormusvoogude optimeerimisele on tarvis seadistada ka generaatori simulatsiooni käivitumise lähteparameetreid. *PSCAD* tarkvara talitluspõhimõtetest ning võimalike lähtevigade vältimiseks suurendatakse kõigi allikate pinget sujuvalt nullist nimiväärtuseni. Antud ajaperioodil talitlevad generaatorid ideaalsete toiteallikatena, misjärel lähtestatakse generaato-

ri mudel kahe astmeliselt. Esmalt minnakse toiteallika talitlusvõrranditelt üle masinat kirjeldavatele funktsioonidele ning seejärel ennistatakse generaatori rootori funktsioonid. Antud talitlusrežiimidel üleminekud põhjustavad siirdeprotsesse, mistõttu on tarvilik oodata ülekandevõrgu ja generaatorite naasmist püsitalitlusse enne kui saab simulatsioonidega läbi viia vastavaid toiminguid. Lähtuvalt mudeli suurusest ning generaatorite arvust võib mudeli käivitumisest tingitud siirdeprotsessi sumbumine aega võtta kuni mitukümmend sekundit, mis reaalajas muudab simulatsioonide läbiviimise ajamahukaks. Mudeli kasutatavuse parandamiseks ning liigse ajakulu vältimiseks on tarvis optimeerida generaatorite toiteallikast ülemineku ja rootori lahti lukustamise ajamomente, mis vähendavad oluliselt tekkiva siirdeprotsessi kestvust. Antud ajamomendid sõltuvad mudeli konfiguratsioonist ning nende valimisel on lähtutud katsetamise meetodist, mille käigus vaadeldakse mudeli esimest sekundit ning muudetakse režiimi muutuste ajahetki vahemikus 0,1-0,5 sekundit leidmaks kombinatsiooni, kus tekkiv ülevõnge on minimaalne. Antud protsessi on võimalik automatiseerida *PSCAD* funktsiooniga „*Multirun*“. Generaatori režiimi ülemineku aegfunktsioonid on toodud joonisel 4.18.



Joonis 4.18. Generaatori mudeli režiimi ülemineku aegfunktsioonid

Ülemineku aegade seadistamisele lisaks on siirdeprotsessi lühendamiseks vaja täpselt määrata generaatori lähtepinge ning -nurk. Generaatori lähteparameetrite seadistuse näide on toodud joonisel 4.19.



Joonis 4.19. Generaatori mudeli lähteparameetrite seadistus

Lähtepinge täpne määramine vähendab erguti mudelist tingitud pinge reguleerimise viidet. Lähtepinge väärtus valitakse võimalikult lähedane lõplikule püsitalitluspingele, tagamaks mudeli käivitumisel tekkiva võimalikult väikese erinevuse ning erguti mudeli kiire püsitalitluse saavutamise. Lähtenurga täpne valimine võimaldab vähendada generaatori aktiivvõimsuse

siirdeprotsessi üle võnke väärtust ning seeläbi kiirendada mudeli püsitalitluse saavutamist. Oluline on, et valitud lähtenurk oleks võimalikult lähedane tegelikule pingenburgale rootori funktsioonile ülemineku ajahetkel.

Generaatori mudelites on soovituslik lukustada elektrisüsteemi stabilisaatori mudel, et vältida mudeli käivitumisega kaasnevat siirdeprotsessi, mis pikendab mudeli püsitalitluse saavutamist. Elektrisüsteemi stabilisaatori lukustamiseks tuleb mudeli sisenditesse modelleerida ümberlüüti, mis annab valiku konstantse ning mõõdetava väärtuse vahel. Konstantse väärtuse lisamine lukustab elektrisüsteemi stabilisaatori, kuna antud väärtuse korral on mudeli väljundiks „0“. Konstantseteks väärtusteks on soovituslikult püsitalitluse lõplikud väärtused, sellisel juhul ei teki mudeli ennistamisel mõõteinformatsioonile üleminekut. Joonis 4.20 illustreerib elektrisüsteemi stabilisaatori lukustusmeetodit ning Elektriijaama mudelis tehtud täiendust. Teistele generaatori mudelitele on vastav võimalus lisatud mudeli koostamisel. Elektrisüsteemi stabilisaatori konstante on tarvis muuta olukordades, kus muudetakse generaatori mudeli käivitumiseks selle aktiivvõimsuse sätteväärtusi.

Joonis 4.20. Elektriijaama elektrisüsteemi stabilisaatori mudelile lisatud lukustusmeetod

Kirjeldatud käivitumise optimeerimist on antud etapis tehtud ühildatud mudelite testimisel. Antud seadistust on tarvis muuta siis, kui ülekandevõrgu mudeli konfiguratsiooni muutus põhjustab siirdeprotsessi ebamõistlikku pikenemist. Enamikel juhtudel on esmaselt optimeeritud lähteparametrid piisavad ning protsessi ei ole tarvis korrata.

Generaatori mudelite pinge koordineerimine

Generaatori mudeli ühildamisel ülekandevõrguga on oluline koordineerida Iru alajaama ühendatud generaatorite pingeid, et välistada generaatorite vahelist reaktiivvõimsuse vahetamist, kus üksteisele vastutöötamine põhjustab talituspiiridesse jõudmist. Tulenevalt elektriijaamade liitumise eripärast, kus Elektriijaama kaks generaatorit on liitunud läbi ühise 110 kV kaabli ning Elektriijaam on ühendunud vaid läbi pingetõstetrafo, on kõigi kolme vaadelda-va generaatori lattidel erinev pingeväärtus. Pinge esmaseks ühtlustamiseks on tarvis seadista-

da trafode ülekandesuhteid maksimeerimaks generaatorite talitluspiire. Tulenevalt asjaolust, et G2 trafod on erineva ülekandesuhtega ning neile avalduv pinge on erinev, mistõttu ei ole trafo astmetega võimalik pingeid täielikult ühtlustada. Ebatäp-sus korrigeeritakse generaatori ergutite pingesätteväärtuste seadistamisega. Vastavalt sätteväärtust tõstes või langetades, et saavutada soovitud pingaste trafo sekundaarpoolel.

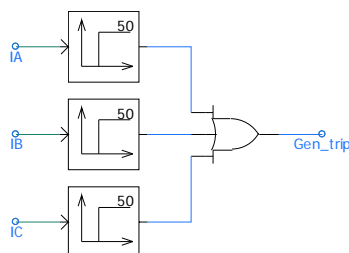
Pinge väärtuse edasisel reguleerimisel uurimustöö simulatsioonide läbiviimisel, tuleb kõigi kolme generaatori ergutite pingesätteväärtuseid reguleerida võrdselt nii, et säiliks eelnevast seadistusest tulenevad sätteväärtuste kompenseerivad proportsioonid. Alternatiivsel on ühi-seks pingetuhtimiseks võimalus Elektrijaamas rakendada U_{const} funktsiooni ja reguleerides Elektrijaama ühisjuhtimissüsteemi anda vastavatele funktsioonidele sama Iru alajaa-ma pingesätteväärtus.

Esmased analüüsid ühildatud ülekandevõrguga näitavad, et kirjeldatud mudeli täienduste ja seadistustega on projekti käesoleva etapi raames planeeritud simulatsioone ning analüüse võimalik läbi viia.

4.3 Generaatorite liigvoolukaitse mudelid

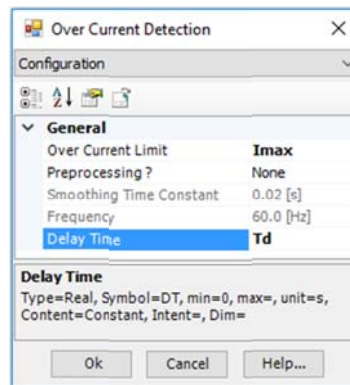
Liigvoolukaitse mudel

Pingeasümmeetriast põhjustatud mõjute tõttu võib alaergutusrežiimis generaator üle koormuda. Sellest tulenevalt on nii Elektrijaama (G1 ja G2) kui ka agregeeritud generaatori mudelid täiendatud liigvoolukaitsega. Liigvoolukaitse lisamine lihtsustab generaatoritele avalduvate mõjude analüüsimist ja võimaldab simulatsiooni käigus täpselt määrata sätteväärtuse ületamise ajahetke. Liigvoolukaitse mudel põhineb *PSCAD* standard liigvoolukaitse mudelil, mis võrdleb generaatori lattidelt mõõdetud voole $I_a...I_c$ (joonis 4.21) sätteväärtusega I_{max} (joonis 4.11).



Joonis 4.21. Generaatorite liigvoolukaitse mudel

Sätteväärtuse ületamisel lülitab generaator viiteaja T_d (joonis 4.11) möödudes välja. Liigvoolukaitse mudel on rakendatud generaatori lülitile. Tallinna Elektriijaama mudelites on liigvoolukaitse sätteväärtused (joonis 4.22) valitud vastavalt [12] ning agregeeritud mudelile vastavalt mudeli koostamisel lähtunud parameetritest.



Joonis 4.22. Liigvoolukaitse mudeli seadistus

Generaatori voolu vastujärgnevuskomponendi liigvoolukaitse mudel

Projekti eelnevas etapis on kirjeldatud pingesümmeetria teoreetilisi mõjusid pöörlevatele seadmetele ning analüüsitud konstantse pingesümmeetria allika mõju agregeeritud generaatori mudelile [1]. Projekti käesoleva etapi eesmärgiks on antud mõjude täpsem analüüsimine, seda erinevate elektrivõrgu konfiguratsioonide juures ning arvestades täiendustest tulenevaid muudatusi. Alljärgnevalt kirjeldatakse käesoleva projekti raames loodud generaatori voolu vastujärgnevuskomponendi liigvoolukaitse mudelit, mis võimaldab analüüsida pingesümmeetria kumulatiivset mõju generaatori mudelile.

Elektriraudtee liitumisest tingitud pingesümmeetria tekitab generaatori staatori mähistes voolu vastujärgnevuskomponenti, millega kaasneb täiendav põhimagnetvoo suhtes vastupidises suunas pöörlev magnetvoog. Viimane toob kaasa täiendavad voolud ning rootorit pidurdava momendi, mistõttu võib rootor liigselt kuumeneda [1], [16]. Generaatori kuumenemine on otseselt seotud seadmele mõjuva voolu vastujärgnevuskomponendi suurusest ning selle kestvusest. Generaatori kuumenemise piirväärtust avaldub vastavalt avaldisele 4.1 [16], kus K tähistab sätteväärtus, mis iseloomustab aega mille jooksul generaator kuumeneb lubatud väärtuseni kui voolu vastujärgnevusekomponent on võrdne nimivooluga.

$$K = \left(\frac{I_{neg}}{I_n} \right)^2 \cdot t \quad (4.1)$$

kus K – sätteväärtus;

I_{neg} – voolu vastujärgnevuskomponendi efektiivväärtus;

I_n – generaatori nimivool.

Avaldise 4.1 põhjal arvutatav generaatori voolu vastujärgnevuskomponendi ja selle kestvuse piirväärtuse kõver on toodud joonisel 4.23.

Joonis 4.23. Generaatori voolu vastujärgnevuskomponendi piirmäära kõver [16]

Tuginedes ABB XIIK 4 voolu vastujärgnevuskomponendi liigvoolu kaitserelee lahendusele, (avaldis 4.1 ja joonis 4.23) on projekti käesoleva etapi raames *PSCAD* tarkvaras välja töötatud liigvoolukaitse mudel, mille plokk-skeem on toodud joonisel 4.24 [17]. Aluseks võetud ABB XIIK 4 kaitserelee lahendust on täiendatud, lisades mudelisse voolu vastujärgnevuskomponendi kumulatiivset mõju ja püsiva pingesümmeetria piirväärtus arvestav funktsioon. Kumulatiivsuse lisamiseks avaldisele 4.1 on vajalik mõõdetud voolu vastujärgnevuskomponenti

suhtarv üle talitlusperioodi, millega arvutatakse kogu kuumenemine ja avaldis 4.1 võtab alljärgneva kuju

$$K = \int_0^K \left(\frac{I_{neg}(t)}{I_n} \right)^2 \cdot dt \quad (4.2)$$

kus $I_{neg}(t)$ – mõõdetud voolu vastujärgnevuskomponendi efektiivväärtuse aegfunktsioon;
 t – simulatsiooni aeg.

Joonis 4.24. Voolu vastujärgnevuskomponendi liigvoolu kaitserellee PSCAD mudel

Koostatud voolu vastujärgnevuskomponendi liigvoolu kaitserellee mõõdab voolu väärtust generaatori klemmidel ja kasutades „Fast Fourier Transform“ (FFT) PSCAD standardmoodulit arvutab mõõdetud voolu nimisagedusele vastava vastujärgnevuskomponendi hetkelise efektiivväärtuse. Mõõteväärtuse alusel arvutatakse vastujärgnevuskomponendi sisaldus generaatori nimivoolus, misjärel jaguneb koostatud juhtimissüsteem kaheks eraldiseisvaks funktsiooniks. Joonisel 4.24 toodud juhtimissüsteemi ülemine osa arvestab generaatorile konstantselt lubatud vastujärgnevuskomponendi piirväärtust, mille ületamisel alustab taimer viiteaja arvestust. Viide on oluline, kuna vastavalt joonisel 4.23 toodud graafikule on generaatorile lubatud kuni 120 sekundit kestvad mööduva iseloomuga piirväärtuse ületamised. Viitega välistatakse kaitse rakendumine antud perioodi vältel. Kui piirväärtuse ületus kestab enam kui 120 sekundit eeldatakse, et tegemist on püsiva piirväärtuse ületusega ning generaatori lülile edastatakse väljalülituskäsk.

Joonisel 4.24 FFT-ploki järgne juhtimissüsteemi osa põhineb avaldisel 4.2, arvutades generaatori kumulatiivse kuumenemise, mis on tingitud voolu vastujärgnevuskomponendist. Integraatori kumulatiivse väärtuse ületamisel sätteväärtusest K (tabel 4.1) saadetakse generaatori lülile käsk välja lülitada, mis täiendavalt ennistab integraatori algväärtusele. Tabelis 4.1 on

esitatud vastujärgnevuskomponendi liigvoolu kaitserelee sätteväärtused erinevatele generaatori tüüpidele.

Tabel 4.1. Vastujärgnevusvoolu komponendid liigvoolu relee sätteväärtused [16]

Generaatori tüüp	K	$I_{neg\ püsiv}, \%$
Peitpoolustega otsejahutusega	30	10
Peitpoolustega kaudse jahutusega	5-10	5-8
Väljepoolustega (summutusmähistega)	40	10
Väljepoolustega (summutusmähiseta)	40	5

Koostatud vastujärgnevuskomponendi liigvoolu kaitserelee mudel on käesoleva projekti eesmärkide täitmise juures piisav. Mudelit edasi arendamise soovi koraal on võimalik lisada ka generaatori jahutussüsteemi arvestav funktsioon, mis välistaks ülipikkades simulatsioonides (500 sekundit ja enam) integraatori küllastumise piirväärtusest väiksema voolu vastujärgnevuskomponendi juures.

4.4 Võimsus hetkväärtuse mõju generaatoritele

Uurimistöö raames täheldatud kitsaskohti generaatorite modelleerimisel ja nende talitluse analüüsimisel ülekandevõrgu pingesümmeetria tingimustes. Elektriraudteest tuleneva pingesümmeetria analüüsimisel täheldati vönkeprotsesside tekkimist *PSCAD* simulatsioonides võimsuste hetkväärtuse mõõtmisel. Järgnevalt kirjeldatakse nii võnkumise tekkimise põhjuseid kui ka nende mõju pöörlevatele seadmetele ning käsitletakse meetodeid, mille abil asümmeetrilise talitluse tingimustes võimsusvoogusid vaadelda.

Mõõdetud väljundvõimsuste hetkväärtuste võnkumine

Väljundvõimsuste hetkväärtuse võnkumise probleemi kirjeldamiseks analüüsitakse näitena saadud simulatsioonitulemusi elektriraudtee koormuse liitumise Järveküla alajaamas (alajaotis 6.1.1), kus liitumispunkti alajaamas on võrgu normaalkonfiguratsioonil tekkiv pingesümmeetria 1,01% (tabel 6.2) ning Iru alajaama ühendatud Vão generaatori G1 lattidel tekib pingesümmeetria väärtusega 0,27% (tabel 6.2).

Joonisel 4.25 on toodud Vão generaatori G1 väljundi aktiiv- ja reaktiivvõimsuse hetkväärtuste graafikud. Jooniselt on näha, kuidas generaatori talitus peale simulatsiooni 20. sekundit muutub, mil Järveküla alajaama ühendatakse elektriraudtee koormus. Kui enne elektriraudtee koormuse liitumist on generaatori G1 aktiivvõimsus 24,83 MW ja reaktiivvõimsus 2,19 Mvar, siis peale koormuse ühendamist hakkavad generaatori väljundi aktiiv- ja reaktiivvõimsuste

hetkväärtused võnkuma. Aktiivvõimsuse hetkväärtuse võnkumine toimub vahemikus 24,37-25,29 MW ja reaktiivvõimsuse võnkumine vahemikus 1,91-3,04 Mvar.

Joonis 4.25. Väo generaatori G1 väljundvõimsuste hetkväärtused elektriraudtee koormuse liitumisel Järveküla alajaama

Joonisel 4.25 kajastuv generaatori võimsuste hetkväärtuste võnkumine on tingitud ülekandevõrgu asümmeetrilisest talitlusest. Mõõtepunktis avalduv pinge ja voolu vastujärgnevuskomponent põhjustab arvutatud aktiiv- ja reaktiivvõimsuse hetkväärtuse võnkumist 100 Hz sagedusega. Võnkumise amplituudi suurus on otseselt seotud mõõtepunkti pinge ja voolu asümmeetria suurusega.

Sarnast generaatori võimsuste hetkväärtusevõnkumist on näha ka Metsakombinaadi alajaama ühendatud generaatoril. Vastavalt saadud simulatsioonitulemustele elektriraudtee liitumisel Sindi alajaama (alajaotis 6.1.3) tekib Pärnu Elektriijaama generaatori lattidel pingesümmeetria väärtusega 0,85% (tabel 6.4). Joonisel 4.26 on kujutatud Pärnu Elektriijaama generaatori väljundvõimsuseid, kus peale simulatsiooni 20. sekundit ühendatakse Sindi alajaama lattidele elektriraudtee koormus. Lisanduvast koormusest tingituna hakkab generaatori aktiivvõimsuse hetkväärtus võnkuma koormuse eelselt väärtuselt 24,46 MW, vahemikus 23,18-25,75 MW ja reaktiivvõimsus koormuse eelselt väärtuselt 3,26 Mvar, vahemikus 1,70-4,82 Mvar.

Joonis 4.26. Pärnu Elektriijaama generaatori väljundvõimsuste hetkväärtused elektriraudtee koormuse liitumisel Sindi alajaama

Võttes arvesse joonisel 4.26 esitatud aktiivvõimsuse võnkumist ning arvutades võnkevahemiku keskmise väärtuse 24,46 MW järel, et mõõdetud aktiivvõimsus võngub oma esialgse väärtuse ümber ning positiivne ja negatiivne võnkeamplituud on keskväärtuse suhtes võrdsed ($25,75-23,18=1,28$ MW; $23,18-25,75= -1,28$ MW). Selgub, et asümmeetria poolt põhjustatud võnkumise neto energiavahetus ülekandevõrguga on null ning generaatori tegelik väljundvõimsus on võnkumise keskväärtus. Viimast kinnitab joonisel 4.27 esitatud generaatori aktiivvõimsuse pärijärgnevuskomponendi kõver, mis elektriraudtee koormuse lisandumisel tekkinud siirdeprotsessi möödumisel taastub oma esialgsele väärtusele omades konstantset väärtust. Väljundvõimsuse võnkumise komponendi tekkepõhjust ning voolu vastujärgnevuskomponendi neto energiavahetuse protsessi matemaatilist kirjeldust käsitletakse [18]-[19]. Tehtud järeldusi saab üle kanda ka generaatori reaktiivvõimsuste hetkväärtuste analüüsimisel.

Vaadeldes Metsakombinaadi alajaama ühendatud Pärnu Elektriijaama generaatori väljundvõimsuste pärijärgnevuskomponente (joonisel 4.27) ning liinipingete efektiivväärtust (joonisel 4.28) selgub, et generaator reageerib ülekandevõrgus toimunud koormuse muutusele siirdudes uude stabiilsesse talitlusrežiimi. Koormuse lisandumisest tingituna väheneb generaatori latipinge, kuna generaatori reaktiivvõimsuse kontrolleri hoiab ülekandevõrgu liitumispunktis reaktiivvõimsust sätteväärtuse nulli juures ja erguti ei reguleeri latipinget.

Joonis 4.27. Pärnu Elektriijaama generaatori väljundvõimsuste pärijärgnevus komponendid elektriraudtee koormuse liitumisel Sindi alajaama

Joonis 4.28. Pärnu Elektriijaama generaatori latipinge elektriraudtee koormuse liitumisel Sindi alajaama

Joonistel 4.27 ja 4.28 toodust ei avaldu aga asümmeetrilise talitluse ja väljundvõimsuste hetkväärtuste võnkumise tegelik mõju generaatorile. Pärnu Elektriijaama generaatori näitel on täpsel vaatlusel näha võnkeprotsesside tekkimist ka elektrilise jõumomendi ja kiiruse graafikutes. Joonisel 4.29 on generaatori elektrilise jõumomendi kõverast näha, et voolu- ja pingesümmeetriast tingituna hakkab elektriline jõumoment sarnaselt väljundvõimsuse hetkväärtuste keskvaartuse suhtes võnkuma. Elektriraudtee koormuse lisandumisel võngub generaatori jõumoment 100 Hz sagedusega keskvaartuse 0,8 sü ümber vahemikus 0,758-0,842 sü.

Joonis 4.29. Pärnu Elektriijaama generaatori elektriline jõumoment elektriraudtee koormuse liitumisel Sindi alajaama

Vaadeldes joonisel 4.30 toodud auruturbiini poolt generaatorile avaldatavat mehaanilise momendi väärtust selgub, et elektriraudtee koormuse lisandumisega ei kaasne generaatori mehaanilise momendi graafikus muutusi ning mehaaniline moment on konstantne.

Joonis 4.30. Pärnu Elektriijaama generaatori mehaanilise jõumoment elektriraudtee koormuse liitumisel Sindi alajaama

Joonis 4.31 kirjeldab generaatori mehaanilise ja elektrilise momendi vahet, mis kajastab generaatorile avalduvat kiirendavat ja pidurdavat jõumomenti. Vastujärgnevuskomponendist tingitud võimsuse võnkumise tõttu avaldub generaatorile kiirendav/pidurdav jõumoment vahemikus $\pm 0,042$ sü. Tulenevalt generaatorile avalduvast konstantsest mehaanilisest momendist, mis generaatori koguinerti ning auruturbiini mehaaniliste protsesside aegluse tõttu ei ole võimeline võnkuma 100 Hz sagedusega, avaldub kiirendav/pidurdav jõumoment generaatori talitluses vibratsioonina [20]. Kiirendav/pidurdavat jõumomenti ja tekkivat vibratsiooni on võimalik tuvastada generaatori kiiruse kõveralt joonisel 4.32, kus elektriraudtee koormuse lisandumise järgselt tekib 100 Hz sagedusega võnkumine.

Joonis4.31. u Elektriijaama generaatori kiirendav jõumoment elektriraudtee koormuse liitumisel Sindi alajaama

Joonis4.32. u Elektriijaama generaatori kiirus elektriraudtee koormuse liitumisel Sindi alajaama

Vastavalt [20] avaldab asümmeetrilisest talitlusest tingitud elektrilise jõumomendi võnkumine mõju auruturbiinile. Viimane võib ergastada erinevaid mehaanilisi võnkerežiime, mis teiste tegurite koosmõjul vähendab turbiini komponentide ja turbiini enda eluiga. Halvimal juhul võib generaatorile pidevalt avalduv 6%-ne voolu vastujärgnevuskomponent ning auru kvaliteedi varieerumine vähendada turbiini eluiga 20 aastalt 7 aastale [20].

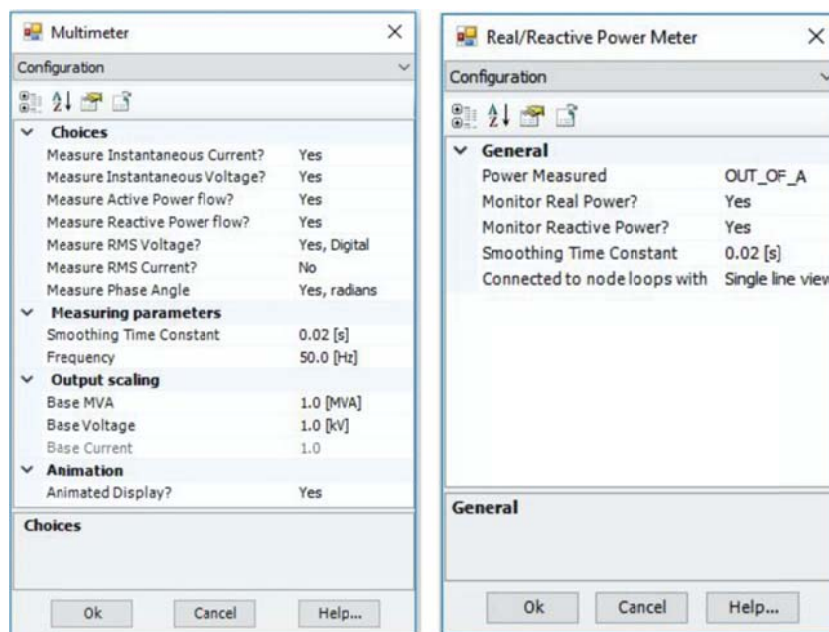
Uurimustöö käesoleva etapi raames ei ole elektriraudtee koormusest tingitud pingesümmeetriast generaatori auruturbiinide mehaanilistele mõjudele täpsemat hinnangut anda. Selle tarvis on vajalik täiendavate auruturbiinide mehaaniliste mudelite koostamine koos auruturbiinide spetsiifiliste andmete kogumisega ja täiendava uurimustööga.

Võimsuste arvutamine asümmeetrilise talitlusega PSCAD mudelis

Eelnevalt kirjeldatud võnkeprotsesside tekkimine väljundvõimsuste hetkväärtustes muudab ülekandevõrgus aset leidvate siirdeprotsesside analüüsimise keeruliseks, varjates analüüsitava

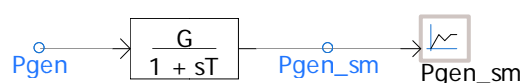
siirdeprotsessi võimalikke mõjusid. Asümmeetrilisest talitlusest tingitud võnkeprotsesse on võimalik vähendada või isegi täielikult välistada rakendades selleks vastavaid arvutuslike mooduleid.

PSCAD tarkvaras on väljundvõimsuste hetkväärtuseid võimalik mõõta kasutades selleks standardseid mooduleid „*Multimeter*“ ja „*Real/Reactive Power Meter*“ või kasutada generaatori/mootori ning võimsuslülitite standardsetesse mudelitesse sisse ehitatud võimsuse mõõtmise funktsioone. Antud võimalused kasutavad ühtset arvutusmetoodikat, kus simulatsiooni vältel rakendatakse alamprogrammi mida on täpsemalt kirjeldatud [10]. Moodulites „*Multimeter*“ ja „*Real/Reactive Power Meter*“ on signaali silumiseks kasutatav filter moodulisse sisse ehitatud ning selle konstanti („*Smoothing Time Constant*“) on võimalik seadistada mooduli dialoogiaknas (joonis 4.33).



Joonis 4.33. *PSCAD* standardsete moodulite „*Multimeter*“ ja „*Real/Reactive Power Meter*“ dialoogiaknad

Üheks võnkeprotsesside silumise võimaluseks on kasutada *PSCAD* standardset moodulit „*First Order Lag*“ (joonis 4.34). Selleks on võimsuste mõõtmise juures tarvis „*First Order Lag*“ moodul lisada mõõteseadmesse sisestatud signaali ja kasutuskoha signaali vahele vastavalt joonisele 4.33.



Joonis 4.34. *PSCAD* mooduli „*First Order Lag*“ rakendamine signaali silumiseks

Joonisel 4.34 on kajastatud võimsuse silumise tüüplahendus, kus signaal P_{gen} on generaatori mudelis arvatud võimsuse hetkväärtus ja P_{gen_sm} on silutud võimsuse väärtus, mida kasutatakse kirjeldavatel graafikutel või sisendväärtusena teistes mudeli komponentides. Tüüpilised silumiskonstandi väärtused on vahemikus 0,005-0,05 s tekitades siirdeprotsessides viite $\frac{1}{4}$ - $2\frac{1}{2}$ perioodi. Vajadusel on võimalik rakendada ka suuremaid väärtusi. Simulatsioonide läbiviimisel tuleb silumiskonstandi väärtus valida vastavalt uuritavatele siirdeprotsessi olemusele. Silumiskonstandi kasutamisel tuleb arvestada, et kiireloomulised siirdeprotsessid võivad silumisel aga märkamatuks jääda ja suurema amplituudiga võnkeprotsesside juures võivad amplituudväärtustes moonutused tekkida. Kirjeldatud meetodi eeliseks on arvutuste kiirus, mis on oluline suurte mudelite analüüsimisel, kus korraga vaadeldakse paljude sõlmede võimsusvoogusid ja oluline on võimsusvoogude täpsus püsitalitluses.

Joonis 4.35. FFT moodulitel põhinev väljundvõimsuse päri- ja vastujärgnevuskomponentide arvutusmoodul

Rakendades täiendavaid arvutusmooduleid on asümmeetrilisest talitlusest tingitud võnkeprotsesse võimalik mõõtetulemustes välistada. Üheks lahenduseks on koostada PSCAD „Fast Fourier Transform - FFT“ moodulitel põhinev arvutuskomponent, millega arvutatakse mõõ-

tepunkti pinge- ja voolu hetkväärtuste põhjal väljundvõimsuste pärijärgnevuskomponendid. Joonisel 4.35 on toodud *FFT* moodulitel põhinev väljundvõimsuse pärijärgnevuskomponentide arvutusmooduli mudel. Sama moodulit on võimalik rakendada ka väljundvõimsuse vastujärgnevuskomponentide arvutamisel.

Võimsuse pärijärgnevuskomponentide arvutamisel lähtutakse avaldisest 4.3

$$\begin{aligned} P^+ &= 3 \cdot V^+ \cdot I^+ \cdot \cos(\varphi_V - \varphi_I) \\ Q^+ &= 3 \cdot V^+ \cdot I^+ \cdot \sin(\varphi_V - \varphi_I) \end{aligned} \quad (4.3)$$

kus P^+ , Q^+ – aktiiv- ja reaktiivvõimsuse pärijärgnevuskomponent;
 V^+ – mõõtepunkti faasipinge pärijärgnevuskomponent;
 I^+ – mõõtepunkti voolu pärijärgnevuskomponent;
 φ_V – mõõtepunkti pinge pärijärgnevuskomponendi faasinihkenurk;
 φ_I – mõõtepunkti voolu pärijärgnevuskomponendi faasinihkenurk.

Päri-, vastu- ja nulljärgnevuskomponentidel põhineva arvutusmeetodi kasutamise eeliseks võrreldes teiste *FFT* arvutusmeetoditega, on arvutuslik kompaktsus. Päri-, vastu- ja nulljärgnevuskomponentide mõõteinformatsiooni on võimalik kasutada täiendavate analüüside teostamiseks ja ühe mõõtepunkti kohta on vaja kahte *FFT* moodulit. Meetodi rakendatavus on aga piiratud juhul, kui on tarvis analüüsida konkreetse faasi koormust. Pärijärgnevuskomponendi põhjal arvutatud võimsus ei pruugi piisavalt täpselt käsitleda kõiki siirdeprotsesse.

Järgnevalt on kirjeldatud *FFT* mooduli põhjal koostatud arvutusmoodulit, mis võimaldab arvutada iga individuaalse faasi põhiharmooniku aktiiv- ja reaktiivvõimsuse keskväärtust. Ühefaasilise *FFT* mooduliga arvutatakse vastava faasi põhiharmooniku pinge- ja voolu efektiivväärtus ning nende faasinihkenurgad, mille alusel on avaldise 4.4 põhjal võimalik arvutada aktiiv- ja reaktiivvõimsused. Joonisel 4.36 on esitatud *FFT* moodulitel põhinev faasi väljundvõimsuse arvutusmoodul.

Joonis 4.36. FFT moodulitel põhinev faasi põhiharmooniku väljundvõimsuse arvutusmoodul

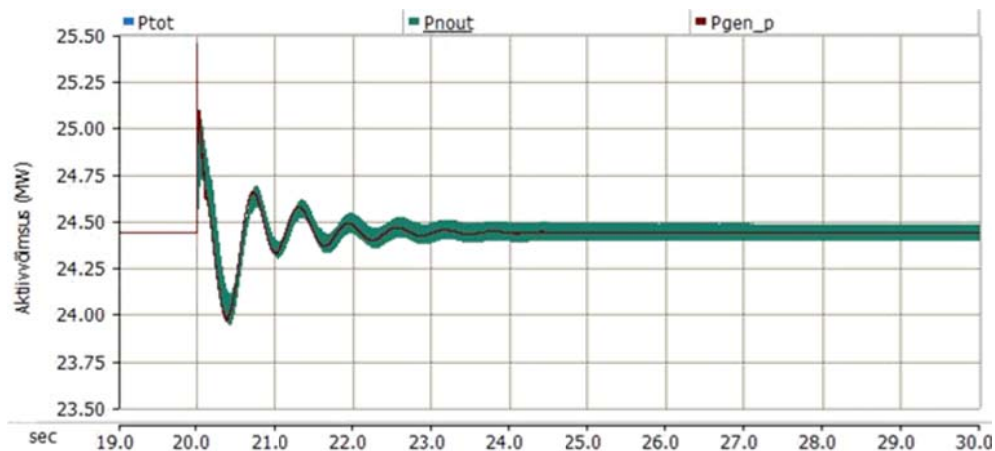
$$\begin{aligned}P_m &= V_m \cdot I_m \cdot \cos(\varphi_{Vm} - \varphi_m) \\Q_m &= V_m \cdot I_m \cdot \sin(\varphi_m - \varphi_m)\end{aligned}\tag{4.4}$$

kus P_m, Q_m – faasi aktiiv- ja reaktiivvõimsuse keskvaartus;
 V_m – mõõtepunkti faasipinge efektiivväärtus;
 I_m – mõõtepunkti voolu efektiivväärtus;
 φ_m – mõõtepunkti pinge faasinihkenurk;
 φ_m – mõõtepunkti voolu faasinihkenurk.

Kolme faasi summaarset aktiiv- ja reaktiivvõimsust on võimalik arvutada liites kokku individuaalsetes faasides arvatud aktiiv- ja reaktiivvõimsused. Arvutusmeetodi peamiseks puuduseks on arvutusliku ressursi nõudlikus, kuna igas vaadeldavas mõõtepunktis on mooduli koostamiseks tarvis kasutada kuut FFT moodulit. Suurtes mudelites on antud arvutusmoodulit mõistlik kasutada juhul kui on tarvis analüüsida iga faasi aktiiv- ja reaktiivkoormust individuaalselt. Kui individuaalsete faaside vaatlemine ei ole oluline tuleks kasutada pärijärgnevuskomponentidel põhinevat arvutusmoodulit, mis on arvutuslikult kompaktsem.

Joonisel 4.37 on toodud kolme eelnevalt kirjeldatud meetodiga mõõdetud Pärnu Elektriijaama generaatori aktiivvõimsuse väärtused olukorras, kus peale simulatsiooni 20. sekundit ühendatakse Sindi alajaama lattidele elektriraudtee koormus. FFT moodulitel põhinev faasi põhiharmooniku väljundvõimsuse arvutusmooduliga arvatud aktiivvõimsust tähistab joonisel graafik P_{tot} , „Multimeter“ mooduliga mõõdetud aktiivvõimsuse hetkväärtus P_{nout} , kus si-

lumiskonstandina on kasutaud väärtust 0,05 sekundit ja pärijärgnevuskomponentidel põhineva arvutusmooduliga arvatud pärijärgnevus aktiivvõimsus tähisega P_{gen_p} .



Joonis 4.37. Kõik ma generaatori väljundaktiivvõimsus kolme arvutusmeetodiga

vaa adeldavad arvutusmoodulid talitlevad vastavalt ootustele ning püsitalitluste juures mõõdetud väärtused on võrdsed (P_{nout} korral võnkumise keskväertus). Simulatsiooni 20 sekundil toimuva asümmeetrilise koormuse lisandumisel tekib P_{tot} ning P_{gen_p} signaalis hetkeline piik, mis on tingitud FFT moodulisse sisse ehitatud filtritest [10]. Mõlemad arvutusmeetodid arvutavad ülejäänud osas aga tekkivat siirdeprotsessi täpselt ning saadud tulemused on sama-väärsed. P_{nout} kõverast järeldub, et silumiskonstant 0,05 sekundit vähendab küll mõnevõrra asümmeetrilisest talitlusest tingitud aktiivvõimsuse võnkumist kuid ei eemalda seda täielikult. Siirdeprotsessi kulgemisest on näha silumiskonstandist põhjustatud viide P_{tot} ja P_{gen_p} graafikute suhtes.

4.5 Pingeasümmeetria mõju generaatori elektrisüsteemi stabilisaatoritele ning üle- ja alaergutus piirajatele

Käesolevas jaotises analüüsitakse pingesümmeetria mõju generaatorite elektrisüsteemi stabilisaatoritele ning üle- ja alaergutus piirajatele. Eespool analüüsi põhjal selgus, et pingesümmeetria põhjustab võimsuste hetkväärtustes ja generaatoris 100 Hz sagedusega võnkeprotsesse, mis omakorda võivad mõjutada juhtimissüsteemide talitlust ning seeläbi kogu generaatori talitlust. Pingesümmeetria mõjude analüüsimisel vaadeldakse järgnevalt Iru alajaama ühendatud generaatoreid, kuna nende kohta on saada reaalsele seadmetele vastavad üle- ja alaergutus piirajate ning elektrisüsteemi stabilisaatorite mudelid.

Alljärgnevalt analüüsitakse pingesümmeetria mõju generaatorite elektrisüsteemi stabilisaatoritele, kus läbi simulatsioonide antakse ülevaade nii püsitalitluse kui ka dünaamiliste protses-

side korral. Seejärel analüüsitakse pingesümmeetria mõju üle- ja alaergutite talitlusele, kus kirjeldatakse piirajate talitlust ning hinnatakse piirajate võimekust kaitsta generaatorit ülekoormuste eest.

Pingesümmeetria mõju elektrisüsteemi stabilisaatoritele

Vastavalt jaotises 4.1 esitatud mudelite kirjeldustele on generaatorites kasutusel PSS2A/B tüüpi elektrisüsteemi stabilisaator, mille mudelid on kajastatud joonistel 4.5 ja 4.12. Kõigi generaatorite elektrisüsteemi stabilisaatori sisendid on seadistatud sarnaselt, kus signaalidena kasutatakse generaatorite kiirust ning aktiivvõimsuse hetkväärtuseid. Eespool tehtud analüüsidest ja aruandes [1] esitatust järeldus, et ülekandevõrgu pingesümmeetria põhjustab generaatorite kiiruses ja aktiivvõimsuse hetkväärtuses võnkeprotsess, mis võivad mõjutada stabilisaatori talitlust.

Pingesümmeetria mõjude analüüsimisel elektrisüsteemi stabilisaatoritele vaadeldakse N-1 juhtumit, kus elektriraudtee koormus 37,5 MVA liitub alajaama ning ülekandeliin on välja lülitatud. Antud juhtum tuleb detailsemalt kirjeldamiseks jaotises 6.1, kus pingesümmeetria jagunemist antud juhtumi juures ülekandevõrgu alajaamade ja generaatorite lattidel kirjeldab tabel 6.8 (alajaotis 6.2.2). Iru alajaama lattidel on maksimaalsiks pingesümmeetria väärtuseks 0,8%. Püsitalitluses juures vaadeldakse pingesümmeetriast tingitud võnkeprotsesside mõju ning juhtimissüsteemi poolt põhjustatud võimalikku generaatori võnkumist. Lisaks püsitalitluse juhtumile analüüsitakse elektrisüsteemi stabilisaatorite talitlust ka pingesümmeetria ja generaatori liitumispunkti lattidel avalduva kolme faasilise lühise koosmõjul. Kuna pingesümmeetria alajaama ühendatud generaatorite lattidel ei ületa kirjeldatud N-1 juhtumi juures 1% piirmäära, siis stabilisaatoritele avalduva pingesümmeetria mõjude põhjalikumaks analüüsimiseks vaadeldakse lühisetalitlusel täiendavaid juhtumeid, kus Iru alajaama lattidel tekib pingesümmeetria väärtustega 1,5% ja 2%.

Joonistel 4.38 ja 4.39 on toodud generaatorite elektrisüsteemi stabilisaatori väljundid püsitalitlus juhtumi juures, kus simulatsiooni 15. sekundil lisandub ülekandevõrgu Järveküla alajaama elektriraudtee koormus. Jooniste põhjal on näha, kuidas pingesümmeetriast tingitud elektrisüsteemi stabilisaatori sisendis avalduv võnkumine põhjustab stabilisaatori väljundi võnkumist. Võrreldes omavahel generaatorite elektrisüsteemi stabilisaatorite PSS2B väljundeid selgub, et väljundi võnkumine sõltub otseselt stabilisaatori seadistusest ja võimendusteguritest. Elektrisüsteemi stabilisaator on seadistatud tundlikumaks kui generaatori G1 stabilisaator, mistõttu on generaatori väljundi võnkumine suu-rem.

Tulenevalt sisendväärtustele võnguvad stabilisaatorite väljundid sagedusega 100 Hz. Vastavalt stabilisaatori parameetritele on väikese amplituudiga nulli ümber võnkumine sümmeetriline, mistõttu ei põhjusta see muutusi generaatori erguti väljundis. Seda kinnitavad omakorda ka joonistel 4.40 ja 4.41 toodud generaatorite G1 ja G2 pingete graafikud, kus elektrisüsteemi stabilisaatori väljundi võnkumine ei too püsitalitlusel kaasa generaatorite latipingete väärtuste püsivat võnkumist. Seda kinnitavad täiendavalt ka joonistel 4.42 ja 4.44 toodud generaatorite aktiivvõimsuste pärijärgnevuskomponentide kõverad, kus simulatsiooniperioodil 15-20 sekundit ei teki väljundvõimsustes võnkumist. Lisaks vaadeldud avv alduvad samaväärsed tulensed ma generaatori elektrisüsteemi stabilisaatorile.

Järgnevalt analüüsitakse generaatorite elektrisüsteemi stabilisaatori talitlust lühisetalitlusest tingitud võnkumise summutamisel, kus elektriraudtee liitumispunkti alajaa ma lattel leiab simulatsiooniperioodi 20. sekundil aset kolmefaasiline lühis kestvusega 0,25 sekundit. Selleks käsitletakse alljärgnevatel generaatorite aktiivvõimsuste joonistel 4.42-4.47 järgmisi stsenaariume:

- P_{base} – baasstsenaarium, kus pingeasümmeetria puudub (elektriraudtee koormuseta);
- P_{ku1} – pingeasümmeetria väärtus Iru alajaamas on 0,8% (alajaotis 6.2.2);
- P_{ku2} – pingeasümmeetria väärtus Iru alajaamas on 1,5%;
- P_{ku3} – pingeasümmeetria väärtus Iru alajaamas on 2,0%.

Joonistel 4.42 ja 4.43 on to o
pärijärgnevuskomponendi graafikud ülekandevõrgu lühisetalitluse korral, millelt selgub, et
pingeasümmeetria ei avalda märkimisväärset mõju generaatori elektrisüsteemi stabilisaatorile
lühisest tingitud võnkumise summutamisel.

Sarnaseelt geneeraatorile G1, on joonistel 4.44 ja 4.45 toodud generaatori G2 aktiivvõimsuse pärijärgnevuskomponent, kus samuti ei avalda pingeasümmeetria märkimisväärset mõju generaatori elektrisüsteemi stabilisaatorile lühisest tingitud võnkumise summutamisel.

Lisaks generaatoritele vaadeldi antud juhtumi juures ka ge neraatori elektrisüsteemi stabilisaatori talitlust. Joonistel 4.46 ja 4.47 todud generaatori aktiivvõimsuse pärijärgnevuskomponendi graafikutelet on näha sarnaseid tulemusi eelnevalt va tulemu stega, kus pingeasümmeetria ei avalda märkimisväärset mõju generaatori elektrisüsteemi stabilisaatorile lühisest tingitud võnkumise summutamisel.

Püsitalitluse analüüsi tulemusena selgub, et pingesümmeetriast põhjustatud võnkeprotsessid ei avalda märkimisväärset mõju generaatorite elektrisüsteemi stabilisaatoritele ja ei tekita juhtimissüsteemist tingitud võnkeprotsesse. Lühisest tingitud siirdeprotsessi analüüs kinnitab, et pingesümmeetria ei mõjuta elektrisüsteemi stabilisaatorite võimekust generaatorite võnkumiste summutamisel.

Pingesümmeetria mõju generaatorite üle- ja alaergutus piirajatele

Järgnevalt analüüsitakse pingesümmeetria mõju Iru alajaama ühendatud generaatorite üle- ja alaergutus piirajatele. Vastavalt jaotises 4.1 esitatud mudelite kirjeldustele kasutatakse ergutusüsteemi ABB Unitrol, kus rakendatakse erilahendusel põhinevaid piirajaid. Nende mudelid ja talitluspõhimõtted on lähemalt kajastatud allikas [11]. generaatoril ja generaatoril on kasutusel samaväärsed *Basler* DECS-250 ergutusüsteemid, mistõttu on ka üle- ja alaergutus piirajad samaväärse talitlusega. Antud piirajaid on täpsemalt käsitletud allikates [11], [13]-[14].

Projekti eelneva etapi [1] ja seni tehtud analüüside tulemustest on selgunud, et ülekandevõrgu pingesümmeetria olukorras ei täheldata märkimisväärsete võnkeprotsesside tekkimist generaatorite väljundvõimsuste hetkväärtustes ja ergutusvoolus. Viimast rakendatakse üle- ja alaergutite sisendina.

Üle- ja alaergutus piirajate analüüsimisel kasutatakse ühisjuhtimissüsteemi ja reaktiivvõimsuse regulaatori liitumispunkti pingereguleerimise funktsiooni, kuna Tallinna Elektri jaama ühisjuhtimissüsteemi reaktiivvõimsuse regulaatoril rakendatakse piirajate funktsioone, mis rakenduvad enne generaatorite üle- ja alaergutus piirajaid. Piiravate funktsioonide analüüsimisel vaadeldakse järgmisi stsenaariume:

- Q_{base} – baasstsenaarium, kus pingesümmeetria puudub (elektriraudtee koormuseta) ja simulatsiooni 20. sekundil sisestatakse pingeregulaatori sätteväärtused põhjustades piirajate rakendamise;
- Q_{ku1} – pingesümmeetria väärtus Iru alajaamas on 0,8% (alajaotis 6.2.2);
- Q_{ku2} – pingesümmeetria väärtus Iru alajaamas on 1,5%;
- Q_{ku3} – pingesümmeetria väärtus Iru alajaamas on 2%.

Kõigi stsenaariumite juures lähtutakse generaatorite raskeimast seadistusest, kus kõik kolm generaatorit talitlevad maksimaalse väljundvõimsusega.

Esmalt analüüsitakse pingesümmeetria mõju generaatori üleergutus piirajale. Joonisel 4.48 on toodud reaktiivvõimsuse pärijärgnevuskomponent kõigi mainitud stse-

naariumite juures. Jooniselt on näha, et võrreldes baasstsenaariumiga ei põhjusta erinevad pingesümmeetria stsenaariumid muutusi generaatori reaktiivvõimuse graafikus. Seega ei avalda ülekandevõrgu pingesümmeetria mõju generaatori üleergutus piirajale. Kõigi vaadeldud stsenaariumite juures reageerib piiraja tekkivale ülekoormusele ning piiraja rakendumisega ei kaasne võnkeprotsesse generaatori G1 talitluses. Asümmeetriline talitluse (Q_{ku1} , Q_{ku2} , Q_{ku3}) ergutusvoolu võnkumine ei mõjuta üleergutus piiraja talitlusvõimet ning generaatori G1 väljundi reaktiivvõimsust piiratakse vastavalt seadistusele.

Vaadeldes generaatoris faasivoolude väärtuseid, mis on toodud joonisel 4.49 selgub, et pingesümmeetria põhjustab faasivoolude asümmeetriat. Kõige enam on koormatud faas b, kus voolu efektiivväärtus on suurim. Stsenaariumi Q_{ku1} korral (joonis 4.49 a) ei põhjusta 0,8%-ne pingesümmeetria tase generaatori ohtlikku koormumist ja üleergutus piiraja kaitseb generaatorit ülekoormuse eest. Stsenaariumite Q_{ku2} ja Q_{ku3} (joonis 4.49 b ja c) korral, kus pingesümmeetria läheneb generaatori enim koormatud faasi b voolu väärtus generaatori nimivoolule (I_n). Antud kõrgema pingesümmeetria tasemega stsenaariumite juures koormub faasi b mähis üle ning üleergutus piiraja ei suuda kaitsta generaatorit ülekoormumise eest. Faasis b ülekoormus pole piisavalt suur releekaitse rakendumiseks, mistõttu 1,5% ja 2% pingesümmeetria tekkimisel tuleks vähendada generaatori reguleerimise ulatust.

musele ja selle rakendumine ei too kaasa võnkeprotsesse generaatori püsitalitluses. V
raatori üleergutus piiraja seadistus on piisava tundlikkusega reageerides koheselt üle-
koormusele.

Vaadeldes joonisel 4.51 toodud generaatori G2 faasivoolude efektiivväärtuseid selgub sarnane
olukorree generaatoriga, kus lähtuvalt pingesümmeetriast koormub kõige enam faas b.
Kõigi vaadeldavate pingesümmeetria stsenaariumite (Q_{ku1} , Q_{ku2} ja Q_{ku3}) korral ületab faasis b
koormusvool generaatori nimivoolu ning asümmeetrilise talitluse tõttu ei kaitse üleergutus
piiraja generaatorit üle koormumise eest. Liigvoolu väärtus pole aga piisavalt suur tagamaks
releekaitse rakendumist ja sellisel pikaajalisel talitlusel võib generaator ülekuumenemise kait-
se rakendumisestvälja lülituda. Seega põhjustab Iru alajaama lattidel avalduv 0,8%-ne pinge-
asümme etria gg maksimaaalse talitluskoormuse juures generaatori üle koor-
mumist. Mistõttu elektriraudtee koormuse liitumisel Järveküla alajaama on tarvis rakendada
täiendavaid meetmeid vähendamaks ülekandevõrgu Iru alajaamas tekkivat pingesümmeetria
taset.

Antud pingesümmeetria tasemete juures tuleks generaatori maksimaalset võimsust vähenda-
da, et vältida generaatori üle koormumist.

Joonisel 4.52 reaktiivvõimsuse pärijärgnevuskomponent, kus It eelnevalt vaadeldud Vão generaatoritega ei avalda pingeasümmeetria olulist mõju generaatori üleergutus piirajale. Kõigi vaadeldavate stsenaar-

riimite juures reageerib piiraja tekkivale üle koormusele ja selle raken i kaasne
võnkeprotsesse generaatori püsitalitluses. Võrreldes omavahel (joonise
4.50) ja onis 4.52) üleergutus piiraja talitlust on näha sama
piiraja erinevaid seadistusi, kus Iru Elektriijaama generaatori üleergutus piiraja lubab lühiaja-
list üle koormust. Samas kui leergutus piiraja generaatori üle koormu-
mist ei luba.

tori faasivoolude efektiivväärtused kõigi
pingeasümmeetria stsenaariumite korral (Q_{ku1} , Q_{ku2} ja Q_{ku3}). Jooniselt on näha kuidas kõigil
juhtudel ületavad faaside koormusvoolud (I_a , I_b ja I_c) lühiajaliselt generaatori nimivoolu (I_n),
mis on tingitud generaatori üleergutus piiraja seadistusest. Üleergutus piiraja teise kaitseastme
rakendumisel piiratakse faaside koormusvoole lubatud talitluspiirkonda ja üleergutus piiraja
kaitseb generaatorit asümmeetrilisest talitlusest tingitud ülekoormuse eest. Saadud tulemused
ei koormu pingeasümmeetriast tingitud mõjude tõttu
üle, mis näitab, et antud generaator ja selle parameetrid on piisava varuga.

Järgnevalt võetakse vaatluse alla Iru alajaama ühendatud generaatorite alaergutus piirajate talitus sarnaste pingeasümmeetria stsenaariumite juures. Joonisel 4.54 on

võimsuse pärijärgnevuskomponent kõigi kirjeldatud stsenaariumite juures.

Joonisel toodud graafikud näitavad, et ülekandevõrgus tekkiv pingesümmeetria ei avalda olulist mõju generaatori alaergutus piirajale. Ülekoormuse korral kaitseb alaergutus piiraja generaatorit ja selle rakendamisega ei kaasne võnkeprotsesse generaatori püsitalitluses. Võrreldes baasstsenaariumi graafikut (Q_{base}) pingesümmeetria stsenaariumitega (Q_{ku1} , Q_{ku2} ja Q_{ku3}) on näha, et ergutusvoolu võnkumine pingesümmeetria olukordades ei mõjuta alaergutus piiraja täpsust ja generaatori reaktiivvõimsust piiratakse vastavalt selle seadistusele.

Joonisel 4.55 on t olude graafikud, kust on selgelt näha kui-
das tekkiv pingesümmeetria põhjustab generaatori faasivoolude asümmeetriat, mis kõigi vaadeldavate pingesümmeetria stsenaariumite juures põhjustab generaatori üle koormumist. Kusjuures kolmest faasist on enim koormatud faas a. Stsenaariumi Q_{ku1} (joonis 4.55 a) korral põhjustab Iru alajaama lattidel tekkiv 0,8% pingesümmeetria generaatori üle koormumist ning alaergutus piiraja ei suuda vastavat kaitset tagada. Saadud tulemused näitavad, et elektriraudtee koormuse liitumisel Järveküla alajaama on vaja rakendada täiendavaid meetmeid vähendamaks pingesümmeetria taset Iru alajaama lattidel. Iru alajaamas N-1 kriteeriumi korral tekkiv 0,8%-ne pingesümmeetria tase võib kaasa tuua häiringuid generaatori G1 talitluses, mistõttu on vajalik vähendada elektriraudtee koormusest tingitud lubatud maksimaalset pingesümmeetria taset.

4.56 kajas
vaadeldud pingea
avalda tekkiv pin

võimuse pärijärgnevuskomponenti kõigi
stsenaariumite juures, kus sarnaaselt gg
ria märkimisväärseid mõjusid generaatori alaergutus piirajale.

Piiraja reageerib tekkivale ülekoormusele ning selle rakendamisega ei kaasne võnkeprotsesse generaatori püsitalitluses. Ülekandevõrgu pingesümmeetria ei mõjuta alaergutus piiraja reguleerimise täpsust ning väljundvõimsust piiratakse vastavalt seadistusele. Võrreldes aga Vão generaatori G2 alaergutus piiraja seadistust (jooni (joonis 4.54) ja ka järgmisena analüüsimisele tulev piiraja seadistusega (joonis 4.58), on näha kuidas seadistatud aeglaseks ja püsitalitluse saavutamine alajaama ühendatud generaatoritel.

Joonisel oolude efektiivväärtused, mis kirjeldavad
pingesümmeetriast tingitud ülekoormuse teket. Pingesümmeetria stsenaariumite Q_{ku1} ja Q_{ku2}
korral reageerib generaatori alaergutus piiraja nimivoolust suurema koormusvoolu tekkimisel,
kaitstes generaatorit üle koormumise eest ja piirates faaside koormusvoolude väärtust generaatori
püsitalitlusel nimivoolu lähedale. 2% pingesümmeetria korral (Q_{ku3}) selgub, et generaatori
G2 alaergutus piiraja ei suuda kaitsta generaatorit üle koormumise eest. Iru alajaamas
tekkiv pingesümmeetria korral ületab generaatori faasi a koormusvool püsitalitlusel generaatori
nimivoolu. Tekkiva liigvoolu väärtus pole piisavalt suur põhjustamaks releekaitse rakendamist
ja pikaajalise talitlusega võib kaasneda generaatori välja lülitumine ülekuumenemise
kaitse rakendamisest. Simulatsioonitulem ub, et Iru alajaama lattidel tekkiv 0,8%-ne
pingesümmeetria maksimaalsel koormusel alaergutusrežiimis
püsivad üle koormumist.

a

alaergutus piiraja talitlust kirjeldab joonisel 4.58 toodud reaktiiv- võimsuse pärijärgnevuskomponent. Sar _____ generaatoritele ei avalda ülekandevõrgu pingeasümmeetria märkimisväärset mõju Iru Elektriijaama generaatori alaergutus piiraja talit-

lusele ning kõigi vaadeldud stsenaariumite juures kaitseb piiraja generaatorit ülekoormuse tekkimise eest. Ühtlasi ei kaasne alaergutus piiraja rakendumisega võnkeprotsesse generaatori püsitalitluses. Joonisel 4.58 nähtav generaatori reaktiivvõimuse pärijärgnevuskomponendi võnkumine on tingitud alaergutus piiraja seadistusest.

ühegi pingesümmeetria stsenaariumi (Q_{ku1} , Q_{ku2} , Q_{ku3}) korral ei ületa koormusvoolude väärtused generaatori nimivoolu. Generaatori alaergutus piiraja hoiab generaatorit lubatud talitluspiirkonnas vastavalt piiraja sätteväärt _____ ama generaator on maksimaalse võimsuse juures alakoormatud.

4.6 Kokkuvõte

Projekti käesolevas etapis on kogu elektritranspordi projekti raames koostatud ülekandevõrgu mudelisse lisatud uued, elektriyaamadele reaalselt vastavad generaatorite mudelid. Lähtuvalt projekti eesmärkidest on mudeleid täiendatud kaitseseadmete lisa mudelitega ning nende seadistusvõimalustega. Modelleerimismudelite ühildamise raames on nii ülekandevõrgu kui generaatorite mudelite talitlust seadistatud nii, et saavutataks nende ühilduvus edaspidiseid simulatsioone ja analüüse silmas pidades.

Uurimistöö raames on täheldatud kitsaskohti generaatorite modelleerimisel ja nende talitluse analüüsimisel ülekandevõrgu pingesümmeetria tingimustes. Asümmeetrilise talitluse korral on ülekandevõrgu pinge ja voolu siinuskõverate amplituud ning faasinihkenurgad erineva väärtustega, mis faasivõimsuste summeerimisel kajastub koguvõimsuse võnkumisena. Pingesümmeetriast tuleneva vastujärgnevuskomponendi poolt põhjustatud võnkumise neto ener-

giavahetus pöörleva seadme ning ülekandevõrgu vahel on null ning tegelikuks väljundvõimsuseks on selle võnkumise keskvärtus.

Simulatsioonitulemustest järeldub, et vastujärgnevuskomponendist tingitud võimsuse võnkumine põhjustab generaatoris kiirendav/pidurdavat jõumomenti. Tulenevalt generaatori konstantsest mehaanilisest momendist avaldub kiirendav/pidurdav jõumoment pöörlevas seadmes vibratsioonina. Generaatorite puhul toob asümmeetrilisest talitlusest tingitud elektrilise jõumomendi võnkumine kaasa auruturbiini erinevaid mehaanilisi võnkerežiime, põhjustades seeläbi turbiini komponentide ja turbiini enda eluea lühenemist.

Asümmeetrilise talitluse korral, kus tegemist on mahukate mudelitega ja väljundvõimsuste juures pakub huvi vaid püsitalitluse väärtus, on võimsuste hetkväärtuste arvutamisel soovituslik kasutada *PSCAD* standardseid võimsuse mõõtmise mooduleid koos suure silumisteguriga. Olukordades, kus vaadeldakse siirdeprotsesside simulatsioonitulemuste täpseid väärtusi, on aga soovituslik kasutada pärijärgnevuskomponentidel põhinevat arvutusmoodulit. *FFT* moodulitel põhineva faasi põhiharmoniku arvutusmooduli rakendamine õigustab end juhul kui tarvis on analüüsida iga faasi võimsust eraldi.

Käesolevas peatükis analüüsiti eraldi ka elektriraudtee koormusest tingitud pingesümmeetria mõju Iru alajaama ühendatud generaatorite elektrisüsteemi stabilisaatoritele ning üle- ja alaergutus piirajatele.

Elektrisüsteemi stabilisaatorite analüüsimisel vaadeldi elektriraudtee koormuse liitumisel Järveküla alajaama ning sellest tingitud pingesümmeetria väärtusi 0,8%, 1,5% ja 2% Iru alajaama lattidel. Lisaks vaadeldi siirdeprotsessi mõju Iru alajaama lattidel toimuva 0,25 sekundilise kolmefaasilise lühise korral, et hinnata stabilisaatori võimekust lühisest tingitud võnkeprotsesside summutamisel. Saadud tulemustest selgus, et pingesümmeetriast tingitud võnkeprotsessid ei avalda märkimisväärset mõju Iru alajaama ühendatud generaatorite elektrisüsteemi stabilisaatoritele. Tekkiva pingesümmeetriaga ei kaasne juhtimissüsteemist põhjustatud võnkeprotsesse generaatorite püsitalitlusel. Täiendavate lühisetalitlusega juhtumite juures selgus, et dünaamiliste protsesside juures ei mõjuta ülekandevõrgu pingesümmeetria elektrisüsteemi stabilisaatorite võimekust generaatorite võnkumise summutamisel.

Üle- ja alaergutus piirajate analüüsimisel lähtuti elektrisüsteemi stabilisaatorite analüüsiga sarnastest stsenaariumitest, kus vaadeldi elektriraudtee koormuse liitumist Järveküla alajaamas ning sellega kaasneva pingesümmeetria tasemete tekkimist Iru alajaamas. Pingesümmeetria mõjude analüüsimisel kasutati Tallinna Elektriijaama ühisjuhtimissüsteemi ja Iru

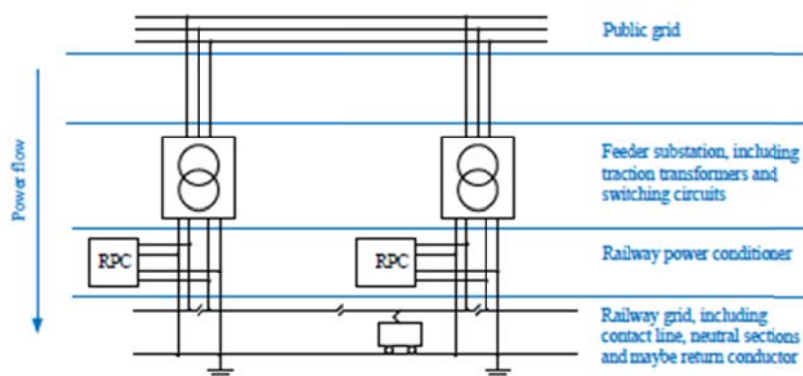
Elektrijaama reaktiivvõimsuse regulaatori liitumispunkti pinge reguleerimise funktsiooni. Generaatorite maksimaalsesse üle- ja alaergutusrežiimidesse viimiseks sisestati vastavad sätteväärtused pingeregulaatori mudelisse, mis põhjustavad piirajate rakendumise.

Analüüside tulemustest järeldeb, et pingeasümmeetriast tingitud võnkeprotsessid ei avalda märkimisväärset mõju generaatorite üle- ja alaergutus piirajatele. Ühtlasi ei kaasne generaatorite juhtimissüsteemist põhjustatud võnkeprotsesse generaatorite püsitalitlusele. Analüüsides generaatorite koormusvoole selgub, et ülekandevõrgu pingeasümmeetria põhjustab ka generaatorite koormusvooludes asümmeetriat, üleergutusrežiimis koormub kõigi Iru alajaama ühendatud generaatoritel kõige enim faas b, alaergutusrežiimis aga faas a. Koormusvoolude asümmeetria korral kui faasi koormusvool ületab generaatori mähise nimivoolu, ei suuda üle- ja alaergutuspiirajad tuvastada generaatori üle koormumist. Vaadeldud pingeasümmeetria stsenaariumite korral koormub generaator üle alaergutusrežiimi maksimaalse võimsuse juures ning generaator üleergutusrežiimi maksimaalse võimsuse juures. Saadud tulemustest selgub, et Iru alajaama ühendatud generaatorite seisukohast võib alajaama lattidel tekkiv 0,8%-ne pingeasümmeetria (N-1 kriteerium alajaotis 6.2.2) generaatorite maksimaalse võimsusrežiimi korral kaasa tuua generaatorite välja lülitumise.

5. Konverterite vahendusel ühendatava elektriraudtee ole- mus ja mõju

Vahelduvvoolul (AC) 25 kV nimipingega ja 50 Hz sagedusel talitlevad elektriraudtee toitesüsteemid on enamasti lahendatud läbi traditsioonilise ühefaasilise trafoühenduse veoalajaa-
mades, kus kolmefaasiline ülekandesüsteemi toitepinge edastatakse elektriraudtee kontaktliini
ühefaasilisse süsteemi. Elektriraudtee koormus on seega ühendatud ülekandevõrgu kahe faasi
vahele, jättes puutumata kolmanda faasi. Elektriraudtee kontaktvõrkude erinevaid kasutusel
olevaid toitesüsteeme kirjeldavad ja analüüsivad ülevaatlikumalt allikad [2], [21].

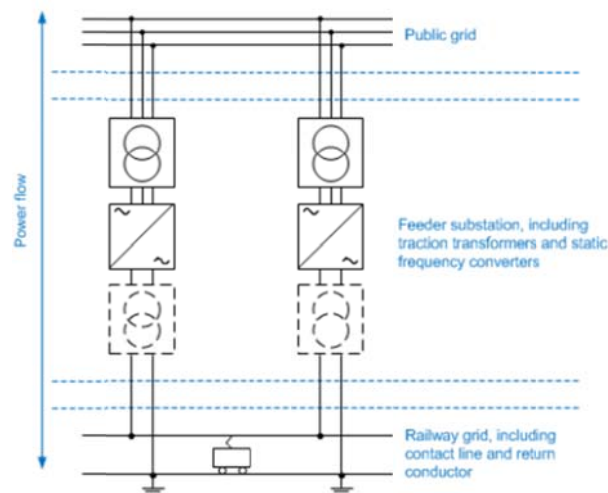
Nüüdisajal võimaldab jõuelektroonika areng seni tavapäraseid süsteeme täiendada ja asendada
uute efektiivsemate ja enam stabiilsust tagavamatega. Tulenevalt elektriraudtee eripärast ja
koormuse iseärasustest on teada sellega kaasnevad kvaliteedi probleemid, millest peamiseks
on pingesümmeetria ja harmoonikute levimine ülekandevõrgus aga ka pinge reguleerimise ja
võimsusteguri parendamise vajadus. Üheks alternatiiviks kvaliteedi probleemide mõju vähen-
damisel on jõuelektroonikal põhinevate seadmete rakendamine elektriraudtee toitesüsteemi-
des. Ülekandevõrgus tekkiva pingesümmeetria vähendamiseks kasutatakse STATCOM sea-
det ehk täielikult juhitavat pingeallikat. Tänu väljundpinge amplituudi ja faasinurga juhtimise-
le on STATCOM võimeline kompenseerima vastujärgnevusvoolu komponenti. Viimaste aas-
tate jooksul on raudtee toitesüsteemides koos eritüüpi trafoühendustega [2] rakendust leidnud
ka RPC – *Railway Static Power Conditioner*, mis sarnaselt STATCOM'ile võimaldab vastu-
järgnevusvoolu kompenseerimist. Tegemist on peamiselt alalisvooluühendusega (*DC-link*)
vastulülitus (*back-to-back*) konverteriga [22]. Lisaks vastujärgnevusvoolu kompenseerimisele
võimaldab RPC ka reaktiivenergia kompenseerimist ja harmoonikute taseme vähendamist.
RPC tehnoloogiat on võimalik kohandada ka teistele veoalajaama trafotüüpidele [22]. RPC
rakendamine elektriraudtee toitesüsteemis on lihtsustatult kujutatud joonisel 5.1.



Joonis 5.1. RPC rakendamine elektriraudtee toitesüsteemis [22]

Tulenevalt ajaloolisest taustast ja arengust on riigiti kasutust leidnud mitmeid eri sagedustel talitlevaid elektriraudtee toitesüsteeme. Nii on näiteks 50 Hz sagedus kasutusel valdavas osas Kesk- ja Ida-Euroopas, Põhjamaades on rakendatud aga 16,7 Hz põhinevat süsteemi ning Põhja-Ameerikas ja Jaapanis vähem tuntud 25 Hz sagedusega elektriraudtee toitesüsteemi [23]. Täpsemalt saab elektriraudtee toitesüsteemide levimisest ja nende ajaloolise kujunemise kohta lugeda [2], [21].

Algupäraselt kasutati sageduse muundamiseks mootor-generaatoril põhinevat pöörlev-muundursüsteeme, kus kolmefaasiline sünkroonmootor on mehaaniliselt ühendatud ühefaasilise asünkroongeneraatoriga, et toita 16,7 Hz sagedusega toitesüsteemi. Väidetavalt leiab selliselt talitlevaid süsteeme kasutusel olevat veel tänaseni [22]. Tänapäeval on elektriraudtee toitesüsteemides sagedusmuundurid aga asendunud efektiivsemate jõuelektroonikal põhinevate staatiliste sagedusmuunduritega (*SFC – Static Frequency Converter*). Kontaktliini toitesüsteemi plokk-skeemi staatilise sagedusmuunduri rakendamisel kajastab joonis 5.2.

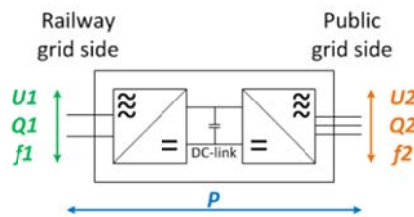


Joonis 5.2. Kontaktliini toitesüsteemi plokk-skeem staatilise sagedusmuunduriga [22]

5.1 Staatilise sagedusmuunduri tööpõhimõte

Staatiline sagedusmuundur ühendatakse ülekandesüsteemi kõigi kolme faasiga ning see võimaldab pinget muundamist ühefaasiliseks, vastavalt vajadusele määratud sagedusega elektriraudtee toitepingeks. Esmalt madaldatakse kolmefaasilise süsteemi pinget konverteri sisendpingele sobivaks, kust see edasi muundatakse alalisvooluühendusele vastavaks alalispingeks. Alalisvooluühendusest muundatakse pinget jällegi vahelduvpingele, kuid nüüd juba ühefaasilisena ning elektriraudtee toiteliinile vastavale sagedusele. Staatiline sagedusmuundur koosneb *back-to-back* AC/DC muunduritest, mis on alalisvoolu poolel omavahel ühendatud. Staatiline

sagedusmuunduri põhimõtteskeemi kajastab joonis 5.3. Enamasti on muunduri vahelduvvoolu pool võrku ühendatud läbi jõuelektronikal põhinevate trafoühenduste, kuid sõltuvalt tootja poolt teostatud lahendusele võidakse selleks kasutada ka reaktoreid [23]. Sisuliselt on staatilise sagedusmuunduri näol tegemist kahe eraldiseisva pingeallikaga, millest üks on ülekandesüsteemi ja teine raudteesüsteemi poolne. Mõlemad muundurid on omavahel ühendatud läbi alalisvooluühenduse (joonis 5.3), mistõttu on süsteemipooled omavahel elektriliselt eraldatud.



Joonis 5.3. Ülekandesüsteemi ja elektriraudtee toitesüsteemi vahelise staatilise sagedusmuunduri põhimõtteskeem [22]

5.2 Näiteid staatilise sagedusmuunduri rakendamisest

Kirjandusallikatest leiab viiteid mitmetele konverterjaamadel põhinevatele elektriraudteeliinidele. Kõige enam leiab kajastus Austraalia, kus on töös mitu vastavat projekti [24]-[25]. Nendest New Generation Rollingstock (NGR) projekt [24] sisaldab Queensland Rail süsteemis uue 20 MW võimsusega konverterjaama ehitamist. Paigaldatav staatiline sagedusmuundur muundab kolmefaasilise 50 Hz sagedusega ülekandesüsteemi elektrienergia 25 kV nimipingega elektriraudtee toitesüsteemile vastavaks ühefaasiliseks toitepingeks, sealjuures sagedust muutmata [22]. Pinge muundamisel vahelduvvoolu võrgust alalisvooluühendusele rakendatakse kahte kolmefaasilist ja kolmeastmelist pingemuundurit, mis ühendatakse trafo sekundaarmähisele. Pinge muundamisel alalisvooluühenduselt tagasi vahelduvpingele kasutatakse nelja ühefaasilist ja viieastmelist pingemuundurit, millest igatüki on eraldiseisvalt raudteesüsteemi trafo sekundaarmähisele ühendatud [22]. Projekti prognoositav valmimine ja tööesse viimine leiab aset 2016. aasta lõpus [26].

Saksamaal Dattenln'is on valmimas elektriraudteesüsteemi seni suurim 413 MW võimsusega elektrienergia edastusvõimekusega staatilise sagedusmuunduri tehnoloogial põhinev konverterjaam [27]. Antud projekt on ellu kutsutud tulenevalt suurenenud energiavajadusest ning Deutsche Bahn'i seni toitava kivisöejaama amortiseerumisest [27]. Uus jõuelektronikal põhinev konverterjaam võimaldab kolmefaasilisest 400 kV nimipingega ja 50 Hz sagedusega ülekandesüsteemist pinge muundamist ühefaasilisele 110 kV nimipingel ja 16,7 Hz sagedusel talitleva elektriraudtee toitesüsteemi tarbeks. Konverterjaam koosneb neljast identsest muun-

durplokist tagamaks süsteemi kõrge töökindluse ja varustatuse ka olukordades, kus üks muundurplokkidest on rikketalitluses või hoolduses [27].

Staatilise sagedusmuunduri tehnoloogial põhinev konverterjaam on edukalt töösse võetud ka Norra raudteesüsteemis, kus sarnaselt eelnevalt mainitud Saksamaa projektiga võimaldab konverterjaam elektrienergia ülekandmist kolmefaasilisest 50 Hz sagedusel talitlevast ülekandesüsteemist ühefaasilisele 16,7 Hz sagedusel talitlevale elektriraudtee toitesüsteemile. Konverterjaam sisaldab endas kahte 15 MW võimsusega üksust, mis võimaldavad elektrienergia ülekandmist mõlemas suunas [28].

Jõuelektroonika rakendamine raudteesüsteemides tõstab oluliselt süsteemi efektiivsust ja stabiilsust. Suuremad elektriseadmete tootjad, näiteks ABB ja Siemens, pakuvad elektriraudtee toitesüsteemidele uutel tehnoloogiatel põhinevaid staatilise sagedusmuunduriga konverterjaamade lahendusi, kus tegemist on nn võtmed kätte lahendustega [29]-[30]. Vastavalt ABB andmetele [31] on nende poolt raudteeliinide toiteks töösse viidud enam kui 20 staatilise sagedusmuunduri tehnoloogial põhinevat konverterjaama, mille võimsused jäävad enamasti vahemikku 15-20 MW. Lisaks eelpool mainitud projektidele Austraalias, Saksamaal ja Norras on näiteid tuua ka Austriast (Timelkam konverterjaam) ja Šveitsist (Wimmis'e konverterjaam). Siemens AG andmetel [30] on ka nende poolt paigaldatud mitmeid sarnaseid konverterjaamu raudteeliinide toiteks, millest suurim 180 MW nimivõimsusega jaam asub Philadelphias, USAs. Lisaks on näiteid ka Rootsist (Häggvik ja Eskilstuna konverterjaamad) ja Saksamaalt (Nuremberg, Rostock, Adamsdorf jne).

5.3 Staatilise sagedusmuunduri rakendamise eelised ja kasumlikkus

Staatilisel sagedusmuunduril põhinev tehnoloogia omab tavapäraste elektriraudtee toitesüsteemide ees mitmeid eeliseid. Suurimaks loetakse asjaolu, et konverterite rakendamisel ei põhjusta ühefaasiline elektriraudtee koormus kolmefaasilise ülekandesüsteemi pingesümmeetriat, mistõttu puudub ka vajadus täiendavate, koormust ühtlustavate seadmete järgi. Lisaks võimaldab staatiline sagedusmuundur vabalt reguleerida pingeid, faasinurki ja sagedust, nii ülekande- kui ka elektriraudtee toitesüsteemi poolel ning ka juhtida aktiiv- ja reaktiivvõimsust ning võimsustegurit [22].

Staatilise sagedusmuunduri rakendamisel on ülekandesüsteem ja elektriraudtee toitesüsteem teineteisest läbi alalisvooluühenduse elektriliselt eraldatud, seega on süsteemid ka lühisvõimsuse seiskohast teineteisest eraldatud. Kuna lühisvoolude väärtused ülekandesüsteemides on

enamasti kõrged, siis staatilise sagedusmuunduri rakendamisel on kontaktliini lühisvoolu väärtus määratud vastavalt konverteri maksimaalsele talitusvoolule [22]. Seega elektriraudtee kontaktliinides esinevad lühisvoolu väärtused vähenevad ja seeläbi vähenevad ka seadmete taluvusnõuded ja maanduspaigaldise dimensioonid. Lisaks suudab staatiline sagedusmuundur säilitada oma talitlust ka ülekandesüsteemis aset leidvate lühiste ajal [22]. See teeb staatilise sagedusmuunduri toitel oleva elektriraudteeliinide talitluse töökindlamaks, vastupidiselt traditsioonilisele ühefaasilise trafo toitele, kus igasugused pinge väärtuse kõikumised kanduvad kolmefaasilisest ülekandesüsteemist üle ühefaasilisele kontaktvõrgule.

Märkimisväärseks eeliseks staatilise sagedusmuunduri rakendamisel on raudteeliini toitesektsioonide omavaheline ühendamine ilma, et oleks tarvis eraldavaid isoleervahemikke, mis on tarvilikud tavapäraste toitesüsteemide juures [22]. Seeläbi on võimalik rajada suuremaid silmusvõrke, mis tagavad suurema töökindluse ja süsteemi efektiivsema talitluse [22]. Ühtlasi võimaldavad pikenevad kontaktliinide toitesektsioonid ja konverterite aktiivvõimsuse juhtimine parandada regenereeritava võimsuse efektiivsemat rakendamist [22].

Oluliseks aspektiks staatilise sagedusmuunduri rakendamisel elektriraudtee toitesüsteemides on nende fikseeritud harmoonikute spekter. Ülekandesüsteemis avalduvad seega vaid muunduri enda poolt tekitatud fikseeritud harmoonikud ning elektriraudtee süsteemi poolt kontaktliinis levivate harmoonikute häiringute ülekandumine ülekandesüsteemi on välistatud [22].

Staatilise sagedusmuunduri juures on positiivseks asjaoluks, et vastavate ehituslike võimaluste tagamisel saab neid ühendada otse kontaktliinile, mis teeb konverterjaama ja selle lülitusruumide ehituse paindlikumaks [23]. See võib osutada määravaks asjaoluks teatud kitsendustega piirkondades, näiteks rasketes või piiratud maa-ala kasutusega asukohtades.

Võrreldes tavapärase ühefaasilise trafoga on staatiline sagedusmuundur mitme funktsiooniga seade sisaldades endas ka juhtimise ja näiteks liini talitluse kontrolli funktsioone [22]. Vastavalt eelnevalt mainitule annab konverter kontaktliini pinge väärtuse kohandamise võimaluse ning vastavalt vajadusele, saab pinget kas tõsta või näiteks regeneratiivse võimsuse olemasolul, pinget kontaktliinis vähendada. Tänu pinge reguleerimisele paraneb kontaktliini võimsuse edastus. Staatiline sagedusmuundur võimaldab ka kontaktsüsteemi faasinurga juhtimist mõjutades seeläbi aktiivvõimsuse edastust konverterjaamade vahel.

Majanduslikust seisukohast lähtudes on staatilise sagedusmuunduri rakendamine esmapilgul kulukam kui traditsiooniline ühefaasiline trafoalajaam. Teisest küljest, kui vaadelda kogu raudteeliini projekti tervikuna, võib staatiline sagedusmuundur osutada kasumlikumaks. Staa-

tilise sagedusmuunduri elektriraudtee süsteemides rakendamise SWOT analüüs on toodud tabelis 5.1.

Tabel 5.1. Staatilise sagedusmuunduri (SFC) rakendamise SWOT analüüs [23]

Tugevused (<i>Strengths</i>)	Nõrkused (<i>Weaknesses</i>)
<ul style="list-style-type: none"> • 3-faasilise süsteemi sümmeetrilisus • Võimsustegur $\cos\varphi = 1$ • Kahe süsteemi elektriline eraldatus (paindlikum liitumistingimustele) • Parem töökindlus kõrgepingealajaa- ma rikke korral (toite tagamine naaber SFC poolt) • Tänu madalamatele rikkevooludele (< 2 kA) on pingegradiendid vähem ohtlikud ning lühise korral nendega toimetulek lihtsam • Erinevatele pingeastmetele ühendamise võimalus • Paindlikum toitejaama asukoht, sõltub vähem isolatsioonvahemikest (eelis piiratud liini rajamisega asukohtades) • Väiksem mõju kõrvalistele süsteemidele rikkeolukordades 	<ul style="list-style-type: none"> • Moraalne risk sekundaarsüsteemidele • Kõrged kapitalikulud • Kõrge kompleksus / komponentide arvestamine • Tehnoloogia tähtajad on tarnijast sõltuvad ja kelle tippkeskused asuvad enamasti välismaal • Kaasab vähe kohalikku tootmist • Sünteesitud pinge lainekuju levitab kindlat harmoonikute spektrit, millega raudtee- ja ülekandevõrgud peavad toime tulema • Mitme SFC juhtimisfilosoofia on müüjast sõltuv ja lähtub arengustaadiumist • Piiratud kohapealne kompetents • Raudteevõrgu erinevatesse asukohtadesse paigaldatud SFC-de paralleeltalitlemine nõuab olulisi muudatusi opereerimispraktikas
Võimalused (<i>Opportunities</i>)	Ohud (<i>Threats</i>)
<ul style="list-style-type: none"> • Väiksemad talitluskulud • Paindlik kommutatsioon • Väiksemad kontaktliini kulud mitme SFC-e paralleeltalitulusel* • Isoleervahemike vajaduse vähene- mine* • Efektivsem pidurdusenergia kogumine ja rakendamine • Väiksem risk kvaliteedinõuetele mittevastavuses (fikseeritud harmoonikute tase)* • Raudteeliini efektiivsuse ja võimsuse edastuse parendamisel selgem investeerimiskulude põhjendatus • Lihtsustatud nõuded ühendamisele 	<ul style="list-style-type: none"> • Mitmete SFC topoloogiatega ja jõu- elektroonika seadmete olemasolu turul (nt IGBT/IEGT vs GTO/IGCT), edasimüüjast sõltuv toodete areng • Nõuab kaitseahelate ümberkujundamist ja sertifitseerimist tagamaks korrektset talitlus arvestamiseks madalamaid rikkevoolude tasemeid ja töö- režiime • Sisemine madal tugiteenuste pakkumine, praktika ja konsultatsiooni puudumine

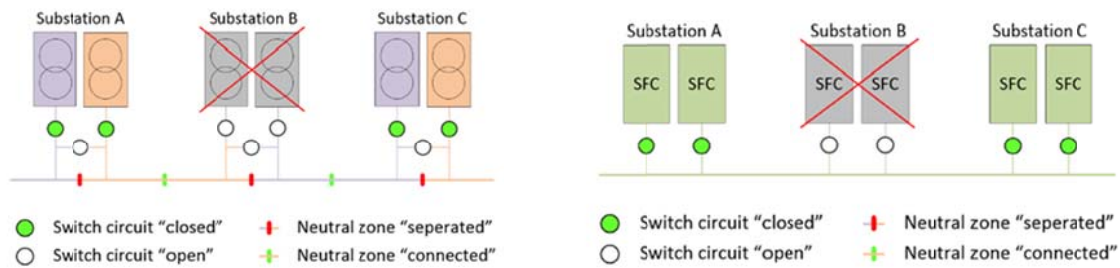
*sõltub tootja pakutavast lahendusest

Esiteks vähendab konverterite rakendamine vajaminevate toitejaamade arvu raudteeliinil. Lisaks on võimalik vältida isolatsioonvahemike tarbeks tehtavaid kulutusi. Tänu staatilise sagedusmuunduri tehnoloogia efektiivsusele saab võimalikuks raudteeliinide ühendamine kesk-

pingevõrku, mistõttu tänu madalamale pingeastmele, vähenevad toitejaamade kulud ka ülekandevõrgu poolel. Keskpingevõrgud on enamasti raudteeliinide läheduses ka rohkem levinud ning nende infrastruktuuri rajamine nõuab vähem kulutusi ja ruumi, võrreldes kõrgematel pingetel talitleva võrguga. Võttes arvesse kõiki üldkulusid võib staatilise sagedusmuunduri rakendamine elektriraudtee toitesüsteemides osutada kasumlikumaks ja mõnel juhul isegi ainuvõimalikuks lahenduseks [22].

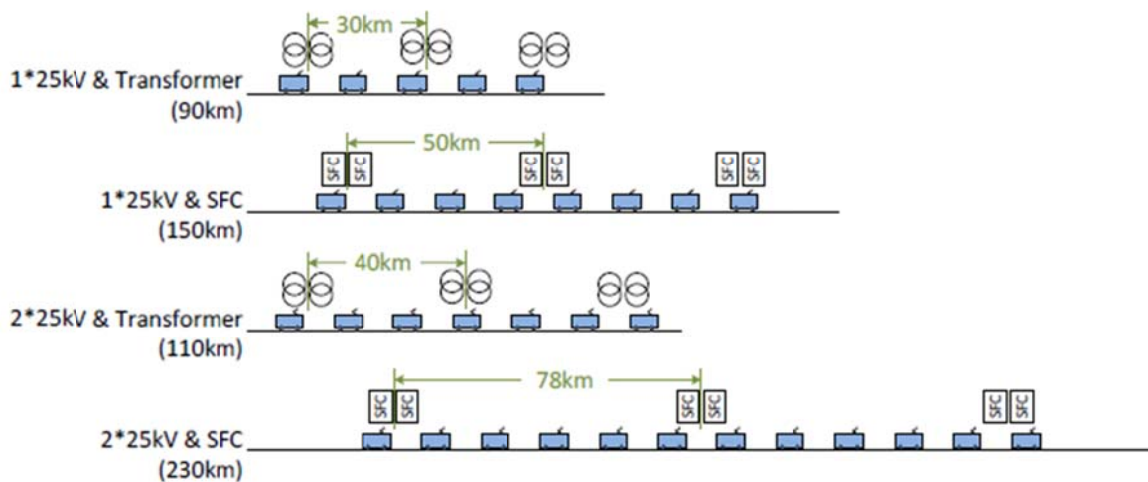
Elektriraudtee toitesüsteemides kogub staatiline sagedusmuundur üha enam populaarsust, seda just 50 Hz sagedusel talitlevates süsteemides. Hoolimata asjaolust, et antud lahendus nõuab tihtipeale tunduvalt suuremaid investeerimiskulusid kui tavapärase ühefaasilise trafoga toitesüsteem, kasutatakse staatilist sagedusmuundurit ka samal sagedusel talitlevate kolme- ja ühefaasiliste süsteemide ühendamiseks [22].

Staatilise sagedusmuunduri rakendamist elektriraudtee süsteemides käsitleb põhjalikult [22]. Töös analüüsitakse mainitud Austraalia Queensland Rail süsteemis kasutusele võetud ja peatselt valmivat konverterjaama lahendust. Lisaks juba olemasolevatele elektriraudteeliinidele on Queensland Rail süsteemis nii lähiajal kui ka pikemas perspektiivis planeeritud lisanduvaid raudteeliine, mistõttu kasvab elektrienergia vajadus raudteeliinide toiteks märkimisväärselt [23]. Arvestades olemasolevat infrastruktuuri, elektrivõrgu konfiguratsiooni ja seatud kriteeriumeid (nt talitluse paindlikkust, töökindlust, võrgu eeskirjadega kohaldumist, investeerimiskulusid jne [23]) leiti analüüside [23] põhjal, et uue konverterjaama rajamine nii uute toitepunktide kui ka olemasolevate uuendamisel on mõistlik valik. Peatselt valmiva Queensland Rail elektriraudteeliini konverterjaama lahendust analüüsivas töös [22] on teostatud mitmete eri stsenaariumitega modelleerimisi. Töös on võrreldud kahe elektriraudtee toitesüsteemi, tavapärase ühefaasilise toitetrafo ja uue staatilisel sagedusmuunduril põhineva tehnoloogia peamisi erinevusi. Modelleerimisel on veermiku võimsuseks määratud 4,2 MW ja maksimaalseks kiiruseks 110 km/h. Kaherealisel raudteeliinil on reisijate peatused orienteeruvalt iga 10 km tagant. Kogu raudteeliini ulatuses on sellel arvestatud kolm toitepunkti. Lisaks on silmas peetud ka regeneratiivse pidurdusenergia võimalikku kasutamist süsteemis. Kahele mainitud tehnoloogiale käsitletakse antud töös täiendavalt ka kahte erinevat kontaktliinisüsteemi, millest üks on lihtsaim 1x25 kV vahelduvvoolu süsteem ilma autotrafodeta kontaktliinil ja teine on 2x25 kV vahelduvvoolu süsteem koos autotrafodega. Modelleerimisel on stsenaariumitena arvesse võetud ka reservvõimalust N-1 kriteeriumi korral, kus raudteeliini keskmise toitepunkti talitus on katkenud. Joonis 5.4 kirjeldab mõlemat analüüsitud toitesüsteemi lahendust antud olukorras.



Joonis 5.4. Kontaktliini toitesüsteem N-1 kriteeriumi korra; vasakul – ühefaasiliste trafodega toitesüsteem; paremal – staatilisel sagedusmuunduril põhinev toitesüsteem [22]

Modelleerimistulemustest [22] selgus, et staatilise sagedusmuunduri rakendamisel pikenesid kontaktvõrgu toitepunktide vahemaad märgatavalt. Elektriraudtee toitesüsteemis tavapärase ühefaasiliste trafoalajaamade asendamisel konverterjaamadega on võimalik tagada toitejaamade pikemaid vahemaid ning vähendada vajalike toitepunktide arvu raudteeliinil. Joonis 5.5 kajastab töös [22] saadud tulemusi raudteeliini pikenedes eri tehnoloogiate ja kontaktliinisüsteemide võrdlusel. Konverterjaamade rakendamisega saadud positiivne mõju raudteeliini pikenedele tuleneb peamiselt tänu pingereguleerimise võimalusele [22]. Staatilise sagedusmuunduri rakendamine võimaldab kontaktliinide toitmist kõrgema pingeväärtusega, seda ülekandevõrgu pingeväärtusest sõltumatult.



Joonis 5.5. Kontaktliini pikkus erinevat toitesüsteemi lahenduste juures [22]

Staatilisel sagedusmuunduril põhineva elektriraudtee toitesüsteemi kuluefektiivsust analüüsitakse allikas [32], kus on võrreldud staatilisel sagedusmuunduril ja autotrafodel põhineva raudteeliini toitesüsteemi investeerimiskulusid. Alljärgnevalt on tabelites 5.2 ja 5.3 vastavalt allikale [32] toodud näide 300 km pikkuse kaheahelalise raudteeliini investeerimis- ja käidukulud.

Tabel 5.2. Elektriraudteeliini autotrafodel (AT) ja staatilisel sagedusmuunduril (SFC) põhineva toitesüsteemi investeerimiskulude võrdlus [32]

		AT	SFC
Kogused ja ühiku hinnad			
Alajaam 220 kV 4x 31,5 MVA	tk	5	0
Alajaam 110 kV 2x 15 MVA	tk	0	7
Ühiku hind	mln €	8	9
Autotrafojaam	tk	20	0
Ühiku hind	mln €	0,7	
Tagasivooluahela pikkus	km	600	0
Ühiku hind	€/km	0,015	
Isoleervahemikud	tk	18	0
Ühiku hind	mln €	0,1	
Investeerimiskulud kokku			
Lülitusseadmed ja alajaamad	mln €	54	63
Kontaktliini ja täiendavad seadmes- tik	mln €	11	0
Kokku	mln €	65	63

Tabel 5.3. Elektriraudteeliini autotrafodel (AT) ja staatilisel sagedusmuunduril (SFC) põhineva toitesüsteemi käidukulude võrdlus [32]

		AT	SFC
Kogused ja ühiku hinnad			
Energia edastuskaod	%	+6	+6
Regeneratiivne pidurdusenergia	%	-4	-9
Energia 3-faasilisest AC võrgust	GWh/a	510	480
Aktiivenergia hind 220 kV, 110 kV	€/MWh	77	80
Käidukulud kokku			
Aktiivenergia tasud	mln €/a	39	39
Hooldus ja täiendav seadmestik	mln €/a	3	0
Kokku	mln €/a	42	39

Tabelites toodud andmete juures tuleb meeles pidada, et tegemist on orienteeruvate hindade ja subjektiivse kalkulatsiooniga, mis sõltuvad paljudest asjaoludest ja seega pole otstarbekas andmete üks-ühele kasutamine. Siiski annavad toodud väärtused nii investeerimis- kui ka käidukuludest ülevaate ja võrdlusmomendi kahe erineva elektriraudtee toitesüsteemi tarbeks.

5.4 Kokkuvõte

Tänapäevased staatilise sagedusmuunduriga konverterjaamad omavad elektriraudteeliinide toite tagamisel mitmeid eeliseid võrreldes tavapärase ühefaasilise trafoga toitealajaamade ees. Konverterjaamadel põhinev toitesüsteem on talitluselt efektiivsem ja stabiilsem, vältides ja/või vähendades mitmeid elektrienergia kvaliteediga seotud probleeme, mis saavad tih-
tipeale määravaks elektriraudtee ühendamisel ülekandesüsteemi (nt ülekandesüsteemi pinge-

asümmeetria, harmoonikud). Lisaks võimaldavad staatilised sagedusmuundurid elektrienergia mitmete parameetrite reguleerimist ja juhtimist (nt pinged, faasinurk, sagedus, aktiiv- ja reaktiivvõimsus).

Staatilisel sagedusmuunduril põhinevate konverterjaamade rajamine elektriraudteeliinide toiteks kogub üha enam populaarsust, eelkõige just tänu oma efektiivsusele, töökindlusele ja mitmekülgetele funktsioonidele. Mitmeid näiteid rajatud konverterjaamadest on tuua nii Saksamaalt, Rootsist, Norrast, Austriast, Šveitsist aga ka Austraaliast.

6. Pingeasümmeetria analüüs ülekandevõrgu konfiguratsiooni muutustel

Elektriraudtee koormuse, kui ühefaasilise tarbija ühendamine ülekandevõrku põhjustab kolmeefaasilise süsteemina talitlevas ülekandevõrgus pingeasümmeetriat. Sõltuvalt tekkiva pingeasümmeetria väärtusest avaldab see lisaks ülekandevõrgu talitlusele mõju ka teistele ülekandevõrgust toidetavatele tarbijatele [1]. Eelkõige aga ülekandevõrku ühendatud generaatoritele ja mootoritele. Projekti eelmises etapis analüüsiti elektriraudtee koormuste mõju ülekandevõrgu normaaltalitluse juures. Käesolevas etapis on rõhk eelkõige suunatud ülekandevõrgus toimuvatele muutustele ja N-1 kriteeriumi täitmisele olukorras, kus võrgu konfiguratsioon muutub (tabel 6.1).

Tabel 6.1. Ülekandevõrgu konfiguratsiooni stsenaariumid

Ülekandevõrguga liituva elektriraudtee koormusena on Rail Balticu projekti alusel liitumispunkti koormuseks arvestatud 30 MW võimsusteguriga $\cos\varphi = 0,8$. Seega on elektriraudtee koormuseks 37,5 MVA. Projekti käesoleva etapi raames on modelleerimismudeleid oluliselt täiendatud ja täpsustatud (peatükk 1 ja 4). Sellest tulenevalt on elektriraudtee koormustest

tingitud pingesümmeetria määrasid ja selle mõjude ülekandumist teistele tarbijatele tarvis esmalt vaadelda võrgu normaalkonfiguratsiooni juures vastavalt uutele mudelitele, et saadud tulemusi hilisemalt erinevate ülekandevõrgu konfiguratsiooni muutuste juures võrrelda. Selleks käsitlebki antud peatüki jaotis 6.1 ülekandevõrgu normaalkonfiguratsiooni ning jaotis 6.2 erinevaid muudatusi ülekandevõrgu konfiguratsioonis. Ülekandevõrgu konfiguratsiooni muutuste hindamiseks tehtud simulatsioonistsenaariumid on loetletud tabelis 6.1. Lähtuvalt simulatsioonitulemustes analüüsitakse nendest olulisemaid järgnevates jaotistes 6.1 ja 6.2.

6.1 Ülekandevõrgu normaalkonfiguratsioon

Käesolevas jaotises analüüsitakse elektriraudtee koormuse ülekandevõrku liitumisel kaasnevat pingesümmeetriat ja selle jagunemist ülekandevõrgu normaaltalitluse ja –konfiguratsiooni juures ning mõjude ülekandumist teistele ülekandevõrgu tarbijatele, eelkõige võrku ühendatud generaatoritele. Elektriraudtee koormuse liitumispunkti alajaamadena käsitletakse Eesti põhjaosas Järveküla alajaama ja lõunaosas Kehtna, Sindi ning Kilingi-Nõmme alajaamasid.

Alljärgnevate elektriraudtee koormuse liitumispunktide analüüsimisel vaadeldakse elektri-raudtee koormusest tingitud pingesümmeetria teguri k_u väärtusi ülekandevõrgu alajaamade lattidel. Generaatorite talitluse puhul avaldub ülekandevõrgu pingesümmeetria generaatori voolu vastujärgnevuskomponendis, mille väärtusele ka järgnevates analüüsides tähelepanu pööratakse. Enne elektriraudtee koormuse ühendamist võib ülekandevõrgu pingesümmeetria lugeda nullilähedaseks. Võrgu seisukohalt on pingesümmeetriale kehtestatud kolm erinevat piirmäära. Nendeks on jaotusvõrgu maksimaalne 2% piirmäär, Elering AS maksimaalne 1,5% piirmäär ja ühele liitujale maksimaalselt lubatud 1% piirmäär. Generaatorite voolu vastujärgnevuskomponendi osakaalule on kehtestatud lubatud 10% piirmäär [1].

Sarnast käitumist on märgata ka teiste ülekandevõrgu põhjaosas ühendatud generaatorite talitluses. Ühenda voolu vastujärgnevuskomponent tõuseb peale elektriraudtee koormuse suurenemise väärtuseni 1,71% ning Iru Elektriijaama generaatori voolu vastujärgnevuskomponent väärtuseni 2,12%. Nii atori kuu i gee neraatori puhul on elektriraudtee koormusest tingitud voolu vastujärgnevuskomponentide väärtused jäävad lubatud piirmäära.

6.1.2 Elektriraudtee liitumispunkt Kehtna alajaamas

Järgnevalt vaadeldakse elektriraudtee koormuse liitumist Eesti ülekandevõrgu lõunaosa Kehtna alajaamas. Elektriraudtee koormuse lülitamisel Kehtna alajaama on võrgus tekkiva pingesümmeetria jagunemine toodud tabelis 6.3. Tabelis toodud andmetest on näha kuidas elektriraudtee liitumisel ülekandevõrgu lõunaosas on suuremad mõjud kui seda oli eelnevalt vaadeldud põhjaosas. Lõunaosa ülekandevõrgus põhjustab elektriraudtee koormus alajaama lattidel väga erinevaid pingesümmeetria väärtusi. Ootuspäraselt avaldub suurim pingesümmeetria liitumispunktis ehk Kehtna alajaamas 4,37%, ületades sealjuures kõik eespool mainitud pingesümmeetria lubatud piirmäärad. Lisaks Kehtna alajaamale ületatakse pingesümmeetria 2% piirmäär veel Järvakandi, Valgu, Rapla ja Vigala alajaamades, vastavalt 3,73%; 3,07%; 2,48%; 2,15% ja 1% piirmäär Kohila ja Lihula alajaamades, vastavalt 1,32% ja 1,04%. Kõigis teistes alajaamades on pingesümmeetria väärtus alla 1%.

Tabel 6.3. Pingeasümmeetria elektriraudtee koormuse liitumisel Kehtna alajaama

Lisaks eelnevalt vaadeldud pingeasümmeetriaale käsitletakse elektriraudtee koormusest tingitud mõju ka ülekandevõrgu lõunaosas Metskombinaadi alajaama lattidele ühendatud Pärnu Elektriijaama generaatorile. Joonisel 6.2 on toodud Pärnu Elektriijaama generaatori voolu vastujärgnevuskomponendi graafik, mis näitab kuidas elektriraudtee koormuse ühendamisel Kehtna alajaama tõuseb generaatori voolu vastujärgnevuskomponendi väärtus 1,10%-ni, jäädes seega lubatud 10% piirmäära.

6.1.3 Elektriraudtee liitumispunkt Sindi alajaamas

Järgnevalt vaadeldakse elektriraudtee koormuse liitumist Sindi alajaamas. Elektriraudtee koormuse lülitamisel Sindi alajaama on võrgus tekkiva pingesümmeetria jagunemist näha tabelis 6.4 toodud pingesümmeetria teguri k_u väärtustest. Antud juhul vaadeldakse kahte ülekandevõrgu konfiguratsiooni, olemasolevat ja tugevdatud. Viimasel juhul on tegemist perspektiivis ette nähtud Sindi alajaama tugevdamisega teise autotrafo töösse viimise puhul. Suurim pingesümmeetria olemasoleva Sindi alajaama konfiguratsiooni korral tekib liitumispunktis, kus selle väärtuseks on vastavalt 2,05%, ületades sealjuures kõiki kehtestatud pingesümmeetria piirmäärasid. Lisaks liitumispunktile ületatakse 1% piirmäär veel Kilingi-Nõmme, Paikuse, Metsakombinaadi, Papiniidu, Audru, Pärnu-Jaagupi, Kabli ja Vändra alajaamades. Toodust selgub, et pingesümmeetria 1% piirmäär ületatakse Sindi alajaama liitumispunkti korral rohkemates ülekandevõrgu alajaamades, kui seda eelnevalt vaadeldud Kehtna alajaama korral. Teisest küljest on ülekandevõrgu alajaamades jagunev pingesümmeetria väärtus madalam, kus 2% piirmäär ületatakse vaid liitumispunkti Sindi alajaamas.

Tabelist 6.4 on näha, kuidas tugevdatud Sindi alajaama konfiguratsiooni korral väheneb elektriraudtee koormusest tingitud pingesümmeetria liitumispunkti Sindi alajaamas 1,50%-ni. Tänu Sindi alajaama tugevdamisele ei ületata enam 2% pingesümmeetria piirmäära, kuid ületades siiski 1% piirmäära ja jäädes 1,5% piirmäära juurde. Lisaks Sindi alajaamale on pingesümmeetria vähenemist teataval määral tunda ka teistes ülekandevõrgu alajaamades, näiteks väheneb Kilingi-Nõmme alajaama pingesümmeetria 0,90%-ni, jäädes seega alla kehtestatud 1% piirmäära.

Tabel 6.4. Pingeasümmeetria elektriraudtee koormuse liitumisel Sindi alajaama

Joonis 6.3 kajastab olemasolevale konfiguratsioonile vastava Sindi liitumispunkti korral Met-sakombinaadi alajaama ühendatud generaatori voolu vastujärgnevuskomponendi graafikut. Jooniselt on näha kuidas elektriraudtee koormuse ühendamisel Sindi alajaama tõuseb generaatori voolu vastujärgnevuskomponendi väärtus 5,62%-ni, jäädes aga siiski lubatud 10% piirmäära juurde.

Joonis 6.3. Pärnu Elektriijaama generaatori voolu vastujärgnevuskomponent elektriraudtee koormuse liitumisel Sindi alajaama

Käsitledes Sindi alajaama tugevdatud konfiguratsiooni juures võib täheldada teatavat parendavat mõju ka Metsakombinaadi alajaama ühendatud generaatori talitlusele, kuna alajaama lattidel tekkiv pingesümmeetria on mõnevõrra vähenenud. Sellest tulenevalt väheneb tugevdatud Sindi alajaama konfiguratsiooni korral generaatori voolu vastujärgnevuskomponent väärtusele 4,10%.

6.1.4 Elektriraudtee liitumispunkt Kilingi-Nõmme alajaamas

Neljandaks vaadeldavaks elektriraudtee koormuse liitumispunktiks on Eesti ülekandesüsteemi lõunaosas olev Kilingi-Nõmme alajaam. Sarnaselt eelnevalt vaadeldud liitumispunktidega vaadeldakse ka Kilingi-Nõmme alajaama elektriraudtee koormuse ühendamisel tekkiva pingesümmeetria jagunemist ülekandevõrgus. Saadud pingesümmeetria teguri väärtused on toodud tabelis 6.5. Suurimaks pingesümmeetria väärtuseks on 4,71% liitumispunkti Kilingi-Nõmme alajaamas. Tabelis toodud andmetest selgub, et lisaks liitumispunkti alajaamale ületatakse 2% pingesümmeetria piimäär ka Viljandi, Reinu ja Kabli alajaamades, kus pingesümmeetria väärtused on vastavalt 2,49%; 2,49% ja 2,39%. Lisaks ületatakse 1% piirmäär veel Sindi, Paikuse, Metsakombinaadi, Papiniidu, Pärnu-Jaagupi ja Suure-Jaani alajaamades.

Lisaks ülekandevõrgu alajaama lattidel tekkivale pingesümmeetria vaadeldakse kuidas elektriraudtee koormuse liitumine Kilingi-Nõmme alajaamas mõjutab Metsakombinaadi alajaama ühendatud generaatori talitlust. Joonisel 6.4 on toodud Pärnu Elektriijaama generaatori voolu vastujärgnevuskomponendi graafik, mis kirjeldab elektriraudtee koormuse lisandumisest tingitud voolu vastujärgnevuskomponendi suurenemist vääruseni 4,54%.

Tabel 6.5. Pingeasümmeetria elektriraudtee koormuse liitumisel Kilingi-Nõmme alajaama

Joonis 6.4. Pärnu Elektriijaama generaatori voolu vastujärgnevuskomponent elektriraudtee koormuse liitumisel Kilingi-Nõmme alajaama

6.1.5 Kokkuvõte

Tehtud analüüside põhjal selgub, et elektriraudtee koormuse liitumine põhjustab ülekandevõrgu teatud piirkondades pingeasümmeetriast tulenevaid probleeme ning seda juba ainuüksi võrgu normaalkonfiguratsiooni juures. Elektriraudtee koormuse mõjud on väikseimad ülekandevõrgu põhjaosas, kus liitumispunktis tekkiv pingeasümmeetria jääb kehtestatud piirmääradesse ja otseseid probleeme ei tekita. Ülekandevõrgu lõunaosas avaldub aga teine pilt, kus vaadeldud kolme liitumispunkti alajaama korral, ainuüksi võrgu normaalkonfiguratsiooni juures, ületatakse kehtestatud pingeasümmeetri piirmäärad. Kehtna ja Kilingi-Nõmme liitumispunktide korral ületatakse 2% piirmäär ning Sindi liitumispunktis, tänu tugevdatud konfiguratsioonile jääb pingeasümmeetri 1,5% piirmäära juurde. Kolme lõunaosa liitumispunkti alajaama võrdlusest selgub, et suurimad pingeasümmeetri piirmäära ületamised leiavad aset Kehtna ja Kilingi-Nõmme liitumispunktide korral, kus pingeasümmeetri tõuseb üle 4%. Märkimisväärne on, et Kehtna alajaama liitumispunkti korral on pingeasümmeetri levik väiksem, mistõttu elektriraudtee koormuse liitumisega kaasnev pingeasümmeetri mõjutab väiksemal arvul ülekandevõrgu alajaamasid. Samas kui Sindi ja Kilingi-Nõmme liitumispunkti rakendamisel on pingeasümmeetri mõju tunda suuremal hulgal ümbruskaudsetes ülekandevõrgu alajaamades. Tekkiva pingeasümmeetri väärtused on aga antud kahe alajaama puhul suuremad Kilingi-Nõmme liitumispunkti korral, kus 4,71% on ka ühtlasi suurim tekkiv pingeasümmeetri väärtus elektriraudtee koormuse liitumisel ülekandevõrguga.

Analüüsidest elektriraudtee koormuse ühendamisest kaasnevaid mõjusid ülekandevõrku ühendatud generaatorite seisukohast selgub kehtestatud voolu vastujärgnevuskomponendi piirmäära silmas pidades, et võrgu normaalkonfiguratsiooni juures märkimisväärseid probleeme generaatorite talitlusele ei avaldu. Suurimaks voolu vastujärgnevuskomponendi väärtuseks on 5,62% ülekandevõrgu lõunaosas asuva Pärnu Elektriijaama generaatori talitluses ning seda elektriraudtee koormuse Sindi alajaama liitumispunkti olemasoleva konfiguratsiooni juures. Mõnevõrra väiksem kuid samas suurusjärgus mõju avaldub Pärnu Elektriijaama generaatorile Kilingi-Nõmme liitumispunkti korral. Kõigist vaadeldud neljast liitumispunkti alajaamast on elektriraudtee koormusega kaasnevad mõjud kõige väiksemad ülekandevõrgu põhjaosas Järveküla alajaamas.

6.2 Ülekandevõrgu konfiguratsiooni muutused

Järgnevas jaotises analüüsitakse elektriraudtee koormusega kaasnevaid mõjusid ülekandevõrgu konfiguratsiooni muutuste korral ehk N-1 kriteeriumi juures. Sarnaselt eelnevale jaotisele käsitletakse elektriraudtee liitumist neljas ülekandevõrgu alajaamas Järveküla, Kehtna, Sindi ja Kilingi-Nõmme. Iga liitumispunkti juures on valitud strateegiliselt olulisemad võrgu konfiguratsiooni muutused, milleks enamasti on mõne lähedal asuva toiteliini välja lülitamine. Vaadeldakse nii alajaama lattide pingesümmeetria väärtusi kui ka selle mõju generaatorite voolu vastujärgnevuskomponendi väärtusele. Saadud tulemusi võrreldakse eelmises jaotises käsitletud ülekandevõrgu normaalkonfiguratsiooni juures saadud väärtustega.

6.2.1 Liini 006A Iru-Järveküla välja lülitamine

Järgnevalt vaadeldakse olukorda, kus elektriraudtee koormus on ühendatud Järveküla alajaama ning simulatsiooni 20. sekundi juures leiab aset Iru ja Järveküla alajaamade toiteliini 006A välja lülitamine.

Tabel 6.6 on kajastab ülekandevõrgu põhjaosa alajaamade lattidel ja generaatorite lattidel tekkivat pingesümmeetria väärtusi. Saadud tulemustest selgub, et liini 006A katkestusel ei põhjusta suurt pingesümmeetria väärtuse tõusu alajaama lattidel. Küll aga toob isegi antud vähene pingesümmeetria tõus liitumispunkti alajaamas kaasa 1% pingesümmeetria piirmäära ületamise, kus Järveküla alajaama pingesümmeetria tõuseb väärtuselt 1,01% väärtuseni 1,27%. Teiste alajaamade lattidel avalduv pingesümmeetria jääb valdavalt samale väärtusele või isegi väheneb teataval määral.

Tabel 6.6. Pingesümmeetria Järveküla alajaama liitumispunkti korral ja liini 006A välja lülitamisel

Sarnast käitumist on märgata ka teiste generaatorite talitluses. Liin 006A välja lülitamisel väheneb Vão generaatori G2 voolu vastujärgnevuskomponent 1,71%-lt 1,31%-ni. Iru Elektri- jaama generaatori voolu vastujärgnevuskomponent väheneb aga väärtuselt 2,12% väärtusele 1,62%.

Toiteliini 006A välja lülitamisega kaasnevad muutused pole märkimisväärsed. Liitumispunkti Järveküla alajaama pingesümmeetria tõuseb vähesel määral, kuid ületab sealjuures kehtestatud 1% piirmäära. Teistes alajaamades jääb pingesümmeetria samale tasemele või väheneb vähesel määral. Kuna ka Iru alajaama pingesümmeetria väheneb väärtusel 0,48% väärtusele 0,37%, siis väheneb ka alajaama lattidele ühendatud generaatoritele avalduv mõju.

6.2.2 Liini 006B Järve-Järveküla välja lülitamine

Järgnevalt vaadeldakse olukorda, kus elektriraudtee koormus on ühendatud Järveküla alajaama ning simulatsiooni 20. sekundi juures leiab aset Järve ja Järveküla alajaamade vahelise toiteliini 006B välja lülitamine.

Tabelis 6.7 on toodud ülekandevõrgu põhjaosa alajaamade lattidel ja generaatorite lattidel avalduvad pingesümmeetria väärtused. Võrreldes saadud tulemusi eelnevalt vaadeldud liini 006A välja lülitamisel saadud tulemustega (Tabel 6.6) selgub, et Järve-Järveküla liini 006B välja lülitamine mõjutab ülekandevõrgu pingesümmeetria väärtusi enam. Nimelt tõuseb liitumispunkti Järveküla alajaama pingesümmeetria 2,76%-ni, millega ületatakse kõik kehtes-

tatud pingesümmeetria piirmäärad. Ühtlasi on märgata pingesümmeetria tõusu ka teistes alajaamades, ületamata aga sealjuures 1% piirmäära.

Tabel 6.7. Pingesümmeetria Järveküla alajaama liitumispunkti korral ja liini 006B välja lülitamisel

Järgnevalt vaadeldakse liini 006B välja lülitamise mõju Iru alajaama lattidele ühendatud generaatoritele. Kui eelnevalt vaadeldud liini 006A lülitamisega Iru alajaama pingesümmeetria mõnevõrra vähenes võrreldes võrgu normaalkonfiguratsioonil saadud tulemustega, siis liini 006B välja lülitamisel Iru alajaama pingesümmeetria väärtus tõuseb. Sellest tulenevalt on ka mõju Iru alajaama ühendatud generaatoritele mõnevõrra suurem. Vastavalt joonisel 6.6 toodule tõuseb Vao generaatori G1 voolu vastujärgnevuskomponent 2,57%-ni, mis on enam kui kaks korda suurem kui liini 006A välja lülitamisel saadud tulemus.

Joonis 6.6. Vao generaatori G1 voolu vastujärgnevuskomponent liini 006B välja lülitamisel, elektriraudtee koormuse liitumisel Järveküla alajaama

Sarnaseid tulemusi on näha ka teiste Iru alajaama ühendatud generaatorite talitluses. Vao generaatori G2 voolu vastujärgnevuskomponent tõuseb väärtuseni 2,84% ning Iru Elektriijaama generaatori voolu vastujärgnevuskomponendi väärtus on 3,51%. Hoolimata mõningasest generaatoritele avalduva mõju kasvust ei ületata siiski generaatorite talitlusest tulenevat 10% voolu vastujärgnevuskomponendi piirmäära.

Võrreldes toiteliinide 006A Iru-Järveküla ja 006B Järve-Järveküla välja lülitamisega saadud tulemusi, selgub et pingesümmeetria ja generaatoritele avalduva mõju seisukohast on suurem mõju liini 006B välja lülitamisel, kus liitumispunkti Järveküla alajaama lattidel pingesümmeetria ületab 2% kehtestatud piirmäära.

6.2.3 Liini 006B Järve-Järveküla ja liini 007 Iru-Ida välja lülitamine

Järgnevalt vaadeldakse lisaks eelnevalt analüüsitud N-1 kriteeriumi täitmisele ülekandevõrgus olukorda, kus järjest lülitatakse välja kaks erinevat toiteliini. Elektrivõrgu seisukohast on tegemist N-2 kriteeriumiga. Välja lülituvateks liinideks on valitud eelnevalt analüüsitud toiteliin 006B Järve-Järveküla, kus avalduvad mõjud osutusid suurimaks. Täiendavalt lülitatakse välja veel Iru ja Ida alajaamade vaheline toiteliin 007. Mainitud liinide toitekatkestuse ja samaaegsel elektriraudtee koormuse ühendusel Järveküla liitumispunkti alajaamas on ülekandevõrgus jaguneva pingesümmeetria väärtused toodud tabelis 6.8.

Tabel 6.8. Pingesümmeetria Järveküla alajaama liitumispunkti korral ning liini 006B ja 007 välja lülitamisel

Toodud andmete põhjal saavutatakse suurim pingesümmeetria liitumispunkti alajaamas väärtusega 3%. Vähemal või rohkemal määral on pingesümmeetria tõusu märgata ka teistes ülekandevõrgu alajaamades. Tähelepanu nõuab asjaolu, et kui senini oli peale liitumispunkti ala-

jaama kõigi teiste alajaamade pingesümmeetria alla 1% piirmäära, siis N-2 kriteeriumi korral saavutab ka Iru alajaamas tekkiv pingesümmeetria 1,02% väärtuse.

Järgnevalt vaatame kuidas suurenenud pingesümmeetria mõjutab Iru alajaama lattidele ühendatud generaatorite talitlust. Joonis 6.7 kujutab Vão generaatori G1 voolu vastujärgnevuskomponenti olukorras, kus elektriraudtee koormus on ühendatud Järveküla liitumispunkti ja peale simulatsiooni 20. sekundit lülitub välja liin 006B ning peale 21. sekundit liin 007. Kuna liini välja lülitamistega suureneb pingesümmeetria väärtus Iru alajaama lattidel, siis on sellel teatav mõju ka generaatorite talitlusele. Jooniselt on näha, kuidas peale kahe liini väljalülitamist suureneb Vão generaatori G1 voolu vastujärgnevuskomponent väärtuseni 3,29%, olles sealjuures seni suurim kuid jäädes siiski lubatud piiridesse.

Joonis 6.7. Vão generaatori G1 voolu vastujärgnevuskomponent liini 006B ja 007 välja lülitamisel, elektriraudtee koormuse liitumisel Järveküla alajaama

Sarnast mõjude kasvu on märgata ka teistele Iru alajaama lattidele ühendatud generaatoritele. Vão generaatori G2 voolu vastujärgnevuskomponent saavutab väärtuse 3,63%. Iru Elektri- jaama generaatori voolu vastujärgnevuskomponent tõuseb aga suurimale väärtusele 4,49%, ületamata siiski sealjuures kehtestatud 10% piirmäära.

6.2.4 Liini 025 Rapla-Kehtna välja lülitamine

Eelnevalt vaadeldud liinide lülitamise juhtumid leidsid aset ülekandevõrgu põhjaosas ning elektriraudtee koormuse liitumisel Järveküla alajaamas. Järgnevalt vaadeldakse ülekandevõrgu konfiguratsiooni muutused lõunaosas Kehtna, Sindi ja Kilingi-Nõmme liitumispunktide korra. Siinjuures olgu mainitud, et alljärgnevate simulatsioonide juures on arvestatud perspektiivset kahe autotrafoga tugevdatud Sindi alajaama skeemi.

Järgnevalt analüüsitakse ülekandevõrgu konfiguratsiooni muutust, kus elektriraudtee koormus on ühendatud Kehtna alajaama ning peale simulatsiooni 20. sekundit leiab aset Rapla ja Kehtna alajaamasid ühendava toiteliini 025 välja lülitamine. Saadud pingesümmeetria tulemusi ülekandevõrgu lõunaosa alajaamades ja Metsakombinaadi alajaama ühendatud generaatori lattidel kajastab tabel 6.9. Võrreldes saadud tulemusi eelnevalt tabelis 6.3 toodutega, kus ülekandevõrk talitleb normaalkonfiguratsiooni juures, on erinevused märkimisväärsed. Liini 025 katkestuse korral tõuseb liitumispunkti Kehtna alajaama pingesümmeetria üle 14%. Märkimisväärselt suur pingesümmeetria tekib lisaks ka Järvakandi, Valgu ja Vigala alajaamades, kus pingesümmeetria väärtused on vastavalt 11,71%; 9,41% ja 6,28%. Lisaks sellele ületatakse 2% pingesümmeetria piirmäär Lihula ja Lõpe alajaamades ning 1% piirmäär Kullamaa, Risti, Audru ja Ellamaa alajaamades.

Tabel 6.9. Pingesümmeetria Kehtna alajaama liitumispunkti korral ning liini 025 välja lülitamisel

Vaadeldes liini 025 välja lülitamisega kaasnevaid mõjusid ülekandevõrku ühendatud generaatorite talitlusele on joonisel 6.8 toodud Metsakombinaadi alajaama lattidele ühendatud Pärnu Elektriijaama generaatori voolu vastujärgnevuskomponent, kus peale simulatsiooni 20. sekundit toimub liini 025 välja lülitamine. Voolu vastujärgnevuskomponent suureneb vähesel määral saavutades väärtuseks 1,15%

Joonis 6.8. Pärnu Elektriijaama generaatori voolu vastujärgnevuskomponent liini 025 välja lülitamisel, elektriraudtee koormuse liitumisel Kehtna alajaama

Saadud tulemusest selgub, et Kehtna alajaama elektriraudtee ühendamisel ja Rapla-Kehtna vahelise toiteliini 025 välja lülitamise korral kaasneb märkimisväärne pingesümmeetria nii liitumispunkti Kehtna alajaamas kui ka Järvakandi, Valgu ja Vigala alajaamades. Lisaks ületatakse nii 1% kui ka 2% pingesümmeetria piirmäärad veel teisteski ülekandevõrgu lõunaosa alajaamades. Liini 025 välja lülitamine ei too kaasa aga olulisi muutusi Metsakombinaadi alajaama ühendatud generaatori talitlusele.

Tabel 6.10. Pingeasümmeetria Kehtna alajaama liitumispunkti korral ning liini 026 välja lülitamisel

Lisaks alajaamade pingesümmeetriaale vaadeldakse liini 026 välja lülitamisega Metsakombinaadi alajaama ühendatud generaatori talitlusele kaasnevaid mõjusid. Joonis 6.9 kajastab Metsakombinaadi alajaama ühendatud generaatori voolu vastujärgnevuskomponendi graafikut elektriraudtee koormuse ühendamisel Kehtna alajaamas ning liini 026 välja lülitamist peale simulatsiooni 20. sekundit. Liini 026 välja lülitamisel väheneb Metsakombinaadi alajaama lattidel pingesümmeetria väärtus normaalaliluse 0,33%-lt väärtusele 0,19%. Viimane mõjutab ka Metsakombinaadi alajaama ühendatud generaatori voolu vastujärgnevuskomponendi väärtust, mis väheneb väärtuseni 0,64%.

6.2.6 Liini 025 Rapla-Kehtna ja liini 187 Rapla-Paide välja lülitamine

Järgnevalt analüüsitakse elektriraudtee koormuse ühendamist Kehtna alajaamas ning sellega kaasnevaid mõjusid ülekandevõrgu N-2 olukorras. Eelnevalt vaadeldud kahe juhtumi juures selgus, et suurim negatiivne mõju ülekandevõrgu talitlusele kaasneb Rapla ja Kehtna liini 025 välja lülitamisel. Järgnevalt vaadeldakse olukorda, kus lisaks simulatsiooni 20. sekundil liini 025 välja lülitamisele toimub simulatsiooni 21. sekundil Rapla ja Paide alajaama vahelise toiteliini 187 välja lülitamine. Saadud pingesümmeetria tulemusi ülekandevõrgu alajaamades ja Pärnu Elektriijaama generaatori lattidel kajastab tabel 6.11. Antud N-2 olukord ei too kaasa täiendavaid mõjusid alajaamade pingesümmeetria le võrreldes eelnevalt vaadeldud N-1 kriiteeriumiga. Ülekandevõrgu alajaamades tekkiv pingesümmeetria jääb samadele väärtustele üksnes liini 025 välja lülitamisel saadud tulemustega.

N-2 juhtum ei too täiendavaid mõjusid kaasa ka Metsakombinaadi alajaama lattidele ühendatud generaatorile. Jooniselt 6.10 on näha, et lisaks liini 025 välja lülitamisel ei põhjusta peale simulatsiooni 21. sekundit aset leidev liini 187 välja lülitamine suuremat voolu vastujärgnevuskomponendi väärtust.

Saadud tulemustest selgub, et N-2 juhtumi esinemisel ei kaasne täiendavaid mõjusid ülekandevõrgu alajaamade pingesümmeetria le ning Metsakombinaadi alajaama lattidele ühendatud generaatorile.

Tabel 6.11. Pingeasümmeetria Kehtna alajaama liitumispunkti korral ning liini 025 ja 187 välja lülitamisel

Joonis 6.10. Pärnu Elektriijaama generaatori voolu vastujärgnevuskomponent liini 025 ja 187 välja lülitamisel, elektriraudtee koormuse liitumisel Kehtna alajaama

6.2.7 Liini 106D Kabli-Sindi välja lülitamine

Järgnevalt analüüsitakse ülekandevõrgu konfiguratsiooni muutusi elektriraudtee koormuse ühendamisel Sindi alajaama. Analüüsimisele tuleb olukord, kus peale simulatsiooni 20. sekundit leiab aset Kabli ja Sindi alajaamade vahelise toiteliini 106D välja lülitamine. Tabel 6.12 kajastab saadud pingesümmeetria väärtusi ülekandevõrgu alajaama lattidel ja Pärnu Elektriijaama generaatori lattidel. Liini 106D välja lülitamisega kaasneb mõnevõrra suurenev pingesümmeetria liitumispunkti Sindi alajaamas, kus pingesümmeetria väärtus ületab normaalkonfiguratsiooni juures saadud 1,50% tulemuse (tabel 6.4) ja saavutab väärtuse 1,66%. Vähesel määral tõuseb pingesümmeetria ka Paikuse, Metsakombinaadi, Papiniidu, Audru ja Pärnu-Jaagupi alajaamades. Samas kui Kilingi-Nõmme alajaama pingesümmeetria väheneb oluliselt.

Tabel 6.12. Pingesümmeetria Sindi alajaama liitumispunkti korral ning liini 106D välja lülitamisel

Vaadeldes liini L106D välja lülitamisest tulenevalt mõju Metsakombinaadi alajaama lattidele ühendatud generaatorile on joonisel 6.11 toodud generaatori voolu vastujärgnevuskomponendi väärtust, mis on antud juhul väärtusel 4,52%.

Joonis 6.11. Pärnu Elektriijaama generaatori voolu vastujärgnevuskomponent liini 106D välja lülitamisel, elektriraudtee koormuse liitumisel Sindi alajaama

6.2.8 Liini 106A Viljandi-Kilingi-Nõmme välja lülitamine

Järgnevalt analüüsitakse ülekandevõrgu konfiguratsiooni muutusi elektriraudtee koormuse liitumisel Kilingi-Nõmme alajaama. Tabel 6.13 kajastab tekkivaid pingesümmeetria väärtusi olukorras, kus ülekandevõrgus leiab aset Viljandi ja Kilingi-Nõmme alajaamade vahelise toiteliini 106A välja lülitamine. Võrreldes saadud tulemusi ülekandevõrgu normaalkonfiguratsiooni juures saadud tulemustaga (tabel 6.5) on näha, kuidas liini 106A välja lülitamisega tõuseb liitumispunkti alajaama pingesümmeetria märgatavalt, saavutades väärtuse 9,69%. Lisaks liitumispunkti alajaamale ületatakse antud olukorras pingesümmeetria 2% piirmäär veel Kabli alajaamas ja 1% piirmäär Sindi, Pärnu-Jaagupi, Paikuse, Papiniidu, Metsakombinaadi ja Audru alajaamades.

Lisaks alajaama pingesümmeetria muutustele vaadeldakse liini 106A välja lülitamisega kaasnevat mõjusid ka Metsakombinaadi alajaama lattidele ühendatud generaatorile. Joonis 6.12 kajastab Pärnu Elektriijaama generaatori voolu vastujärgnevuskomponenti, mis liini 106A välja lülitamisel saavutab väärtuse 5,14%. ületamata sealjuures generaatoritele kehtestatud 10% piirmäära.

Tabel 6.13. Pingeasümmeetria Kilingi-Nõmme alajaama liitumispunkti korral ning liini 106A välja lülitamisel

Joonis 6.12. Pärnu Elektriijaama generaatori voolu vastujärgnevuskomponent liini 106A välja lülitamisel, elektriraudtee koormuse liitumisel Kilingi-Nõmme alajaama

6.2.9 Liini 134B Viljandi-Suure-Jaani välja lülitamine

Järgmiseks vaadeldakse olukorda, kus elektriraudtee koormus on ühendatud Kilingi-Nõmme alajaama ning ülekandevõrgus toimub Viljandi ja Suure-Jaani alajaamu ühendava toiteliini 134B välja lülitamine. Saadud tulemusi kajastab tabel 6.14. Võrreldes tulemusi eelnevalt analüüsitud liini 106A välja lülitamisega on näha, et antud ülekandevõrgu konfiguratsiooni muutusega kaasnevad mõjud on mõnevõrra väiksemad. Kui liini 106A välja lülitamisel tekkis liitumispunkti Kilingi-Nõmme alajaama lattidele pingesümmeetria väärtusega 9,69%, siis liini 134B välja lülitamisel on selle väärtuseks 5,37%. Lisaks liitumispunkti alajaamale ületatakse liini 134B välja lülitamisel pingesümmeetria 2% piirmäär veel Reinu, Viljandi ja Kabli alajaamades. Pingesümmeetria Sindi ja Pärnu-Jaagupi alajaamades on 1% piirmäära juures, olles vastavalt 1,08% ja 1,01%.

Vaadeldes liini 134B väljalülitamisest tingitud mõjusid Metsakombinaadi alajaama ühendatud generaatorile, on vastavalt joonisele 6.13 Pärnu Elektriijaama generaatori voolu vastujärgnevuskomponent 2,95%.

Joonis 6.13. Pärnu Elektriijaama generaatori voolu vastujärgnevuskomponent liini 106A välja lülitamisel, elektriraudtee koormuse liitumisel Kilingi-Nõmme alajaama

Lisaks N-1 kriteeriumile vaadeldi Kilingi-Nõmme liitumispunkti korral ka juhtumit, kus samaaegselt nii liini 106A kui ka liini 134B välja lülitumine. Saadud tulemustest selgus, et antud N-2 olukord ei too kaasa suuremaid mõjusid ja täiendavaid asjaolusid võrreldes eelnevalt analüüsitud raskeima juhtumi liini 106A välja lülitamisega.

6.2.10 Kokkuvõte

Ülekandevõrgu põhjaosas ning elektriraudtee koormuse liitumisel Järveküla alajaamas põhjustab ülekandevõrgu konfiguratsiooni muutus suurimaid mõjusid eelkõige liitumispunkti Järveküla alajaamale, kus pingesümmeetria piirmäär ületab kehtestatud 1% ja 2% piirmäärad. N-1 kriteeriumi juures on halvimaks juhtumiks Järve-Järveküla liini 006B välja lülitamine, kus pingesümmeetria tõuseb väärtuseni 2,76%. Vaadeldud juhtumitest halvimaks on N-2 kriteerium, kus lisaks liinile 006B lülitakse välja veel Iru-Ida liin 007. Antud olukorras on liitumispunkti Järveküla alajaamas tekkiv pingesümmeetria 3% ning ka Iru alajaama pingesümmeetria tõuseb 1% piirmääraneni. Iru alajaama ühendatud generaatorite seisukohast ei ületata ühelgi vaadeldud konfiguratsiooni muutuse juures voolu vastujärgnevuskomponendi 10% lubatud piirmäära.

Ülekandevõrgu lõunaosas elektriraudtee koormuse liitumisel Kehtna alajaama toob ülekandevõrgu konfiguratsiooni muutus kaasa olulisi mõjutusi liitumispunkti alajaama pingesümmeetria. Kahest vaadeldud N-1 kriteeriumi konfiguratsiooni muutusest on suurim mõju Rapla-Kehtna liini 025 välja lülitamisel, mil pingesümmeetria saavutab liitumispunkti alajaamas

väärtuse 14,05%, mille mõjud kanduvad edasi ka teistesse ülekandevõrgu alajaamadesse. N-2 kriteeriumi seisukohast vaadeldi juhtumit, kus lisaks liinile 025 lülitati välja ka Rapla-Paide liin 187, antud juhtumiga ei kaasnenud aga eelnevalt vaadeldust suuremaid mõjusid ülekandevõrgu pingesümmeetrialet. Metsakombinaadi alajaama ühendatud Pärnu Elektriijaama generaatori talitluse seisukohast ei avalda elektriraudtee koormuse Kehtna alajaama liitumispunkti juures vaadeldud ülekandevõrgu muutused märgatavaid mõjusid. Suurimaks generaatori voolu vastujärgnevuskomponendi väärtuseks oli 1,15% liini 025 välja lülitamisel, mis on aga ligilähedane ülekandevõrgu normaalkonfiguratsiooni juures saadud väärtusega.

Elektriraudtee koormuse liitumisel Sindi alajaamas vaadeldud ülekandevõrgu konfiguratsiooni muutuste seisukohast on ainsaks juhtumiks Kabli-Sindi toiteliini 106D välja lülitamine. Antud N-1 kriteeriumi juures suurenes liitumispunkti Sindi alajaama pingesümmeetria 1,50%-lt väärtusele 1,66%, ületamata sealjuures 2% kehtestatud piirmäära. Metsakombinaadi alajaama ühendatud Pärnu Elektriijaama generaatori seisukohast ei too N-1 kriteerium kaasa oluliselt suurenevaid mõjusid, võrreldes ülekandevõrgu normaalkonfiguratsiooni juures saaduga.

Elektriraudtee koormuse liitumisel Kilingi-Nõmme alajaamas vaadeldud ülekandevõrgu konfiguratsiooni muutuste seisukohast on raskeimaks juhtumiks Viljandi – Kilingi-Nõmme toiteliini 106A välja lülitamine, mille juures liitumispunkti alajaama pingesümmeetria tõuseb väärtuseni 9,69%, võrreldes normaalkonfiguratsiooni juures saadud 4,71%-ga. Lisaks toob antud juhtum kaasa pingesümmeetria tõusu ka teistes ülekandevõrgu alajaamades. Metsakombinaadi alajaama ühendatud generaatori seisukohast suurendab liini 106A välja lülitamine mõnevõrra generaatori voolu vastujärgnevuskomponenti väärtusele 5,14%, ületamata sealjuures aga kehtestatud 10% piirmäära. Ülekandevõrgu võimalik N-2 olukord ei too kaasa täiendavaid mõjusid juba analüüsitud liini 106A lülitamisel ilmnunud mõjudele.

7. Ülekandevõrgus toimuvate lühiste mõju generaatoritele

Ülekandevõrku ühendatav elektriraudtee koormus toob endaga kaasa püsiva pingesümmeetria olukorra võrgus, mis pole ülekandevõrgus tavapärane nähtus. Ülekandevõrgu teised tarbijad, eelkõige generaatorid pole aga mõeldud talitlema püsivas pingesümmeetria olukorras. Viimastest tingitud mõju generaatorite talitlusele on detailsemalt selgitatud ja analüüsitud projekti eelnevas etapis [1]. Lisaks elektriraudtee koormusest tingitud pingesümmeetria esineb ülekandevõrgus ka lühiseid. Projekti antud etapis pööratakse rõhku generaatorite talitlusele avalduvate mõjude hindamisele ülekandevõrgu lühiste korral, arvestades ka elektriraudteest tingitud asümmeetriliste pingete olukorda ülekandevõrgus.

Pingesümmeetria mõjude kirjeldamisel kasutatakse generaatori voolu vastujärgnevuskomponenti. Generaatorite kaitseks on kehtestatud voolu vastujärgnevuskomponendile piirmäärad, milleks püsitalitlusele on lubatava voolu vastujärgnevuskomponendi osakaal generaatori nimivoolust (I_2/I_n) 10%. Lühise korral on oluline aga jälgida nii pingesümmeetria kui lühisest tulenevat soojuslikku mõju generaatorile. Selleks kasutatakse lühisetalitlusele kumulatiivset pingesümmeetria mõju, kus voolu vastujärgnevuskomponendi poolt põhjustatud soojusena salvestuva energia hulka generaatori rootoris lühise kestvuse jooksul (I_2) ei tohi ületada 30 suhtühikut [1]. Viimane kajastab maksimaalset rootoris salvestuvat ohutut energia hulka, mille ületamisel aktiveeritakse relekaitse, kaitsmaks generaatorit ülekuumenemise eest katkestades selle talitluse. Alljärgnevalt on eesmärgiks hinnata just generaatorile avalduvat soojusliku mõju ülekandevõrgu lühise korral ning hinnata pingesümmeetria ja lühise koosmõjul tekkivat generaatorite ülekuumenemise ohtu.

Ülekandevõrgu lühise asukohtade valikul on eelkõige arvesse võetud generaatorite ühenduspunkte, milleks ülekandevõrgu põhjaosas on Iru alajaam ja lõunaosas Metsakombinaadi alajaam. Sellest tulenevalt vaadeldakse lühise toimumise kohtadena Iru ja Metsakombinaadi alajaamade latte, kus generaatorite talitlusele avalduv mõju on eeldatavasti suurim. Ülekandevõrgus toimuva lühise kestvuseks on määratud 0,1 sekundit, mis leiab kõigi stsenaariumite korral aset simulatsiooniperioodi 23. sekundil. Lühisestsenaariumite määramisel tuleb meeles pidada, et elektriraudtee koormus ühendatakse ülekandevõrgu kahe faasi, faasi A ja B vahele. Sellest tulenevalt vaadeldakse eri liiki lühiseid, et välja selgitada generaatorite talitluse seisukohast rakseim juhtum. Analüüsimisele tulevad järgmised lühisejuhtumid:

- faasi A ja maa vaheline lühis (A-G);
- faasi B ja maa vaheline lühis (B-G);

- faasi C ja maa vaheline lühis (C-G);
- faasi A ja B ning maa vaheline lühis (AB-G);
- faasi B ja C ning maa vaheline lühis (BC-G);
- kolmefaasiline maalühis (ABC-G).

Ülekandevõrgus toimuvate lühiste mõju hindamiseks analüüsitakse generaatori talitlust ja selle stabiilsuse säilimist lühise toimumise hetkel ja peale lühise möödumist. Generaatori stabiilsust kirjeldab generaatori faasinurk. Raskeima lühisejuhtumi määramiseks hinnatakse generaatori voolu vastujärgnevuskomponendi väärtust ning soojuslikku kumulatiivse pingeasümmeetria mõju lühise ajal. Kõigi lühisejuhtumite simulatsioonitulemused on lisaks alljärgnevale analüüsile eraldi välja toodud peatüki kokkuvõttes tabelis 7.1.

7.1 Lühis Iru alajaama lattidel

Järgnevalt vaadeldakse ülekandevõrgu lühise toimumise asukohana Iru alajaama latte, mis on ülekandevõrgu põhjaosas olevatele generaatoritele lähim punkt. Analüüsitakse Iru alajaama ühendatud Vao generaatorite G1 ja G2 ning Iru Elektriijaama generaatori talitlust erinevate ülekandevõrgu lühisejuhtumite juures, kus pingeasümmeetria allikas elektriraudtee koormus on ühendatud Järveküla alajaama.

A-G lühis

Ülekandevõrgus ühefaasilise, faasi A ja maa vahelise lühise mõju Iru alajaama ühendatud Vao G1 generaatorile kirjeldatakse alljärgnevatel joonistel toodud graafikute abil. Joonisel 7.1 on kajastatud generaatori G1 pingelohk lühise ajahetkel, kus pinge langeb väärtusele 8,41 kV. Lühise möödumisel generaatori väljundpinge taastub lühise eelsele väärtusele.

Joonisel 7.2 toodud generaatori G1 faasinurk annab kinnitust, et antud lühisega ei kaasne püsivaid talitlushäiringuid generaatori töös ning lühise möödumisel säilitab generaator oma stabiilse talitluse.

Hindamaks antud lühisejuhtumi pingesümmeetriast tulenevat tõsidust generaatori talitlusele on joonisel 7.3 toodud generaatori G1 voolu vastujärgnevuskomponendi osakaal, mis lühise ajal saavutab väärtuse 105,66%. Joonis 7.44 kajastab aga kumulatiivset pingesümmeetria mõju lühise ajal, mis saavutab maksimaalseks väärtuseks 0,105 sü, jäädes seega alla kehtestatud 30 sü piirmäärale.

Järgnevalt hindame ühefaasilise A-G lühisejuhtumi mõju Vão generaatorile G2, mille väljundpinge graafik on kujutatud joonisel 7.5. Generaatori G2 väljundpinge langeb lühise ajal väärtuseni 8,27 kV, mis lühise möödumisel taastub oma esialgsele väärtusele. Lühise korral tekkiv pingelohk Vão G2 generaatoril on sarnane eelnevalt vaadeldud Vão G1 generaatori tulemustega.

Sarnaselt generaatorile G1, ei kajasta antud lühise korral püsivaid talitlushäiringuid ka generaatori G2 faasinurga graafik joonisel 7.6. Generaator G2 talitus saavutab lühise möödumisel oma stabiilsuse.

Vão generaaatori G2 voolu vastujärgnevuskomponendi väärtus lühise ajal on 119,16%, vastavalt joonisel 7.7 toodule ning pingeasümmeeria kumulatiivne mõju jääb alla 30 sü, olles väärtusega 0,129, vastavalt joonisele 7.8. Saadud pingeasümmeetriast tingitud mõjud on mõnevõrra suuremad kui eelnevalt vaadeldud Vão G1 generaaatori korral.

Vaadeldes ülekandevõrgu lühise mõju Iru Elektriijaama generaatorile, siis vastavalt joonisele 7.9 langeb generaatori pinge lühise ajal väärtuseni 8,33 kV. Lühisest tingitud pingelohk on sarnane eelnevalt vaadeldud Vão G1 ja G2 generaatorite tulemustega.

Antud ülekandevõrgu lühis ei põhjusta aga püsivaid talitlushäiringuid Iru Elektriijaama generaatori töös. Joonisel 7.10 toodud Iru generaatori faasinurk säilitab stabiilse talitluse lühise möödumisel.

Iru Elektriijaama generaatori voolu vastujärgnevuskomponent joonisel 7.11 saavutab lühise ajal suurima väärtuse 147,88%, mis on vaadeldud kolme generaatori juures suurim. Sama asjaolu selgub ka kumulatiivse pingeasümmeetria mõjust, mille väärtuseks lühise ajal vastavalt joonisele 7.12 on 0,196 sü.

Toodu põhjal saab järeldada, et antud A-G lühisejuhtumiga ei kaasne püsivaid talituslikke häiringuid Iru alajaama ühendatud generaatorite töös ning lühisetalitlusel generaatoritele seatud piirmäärasid ei ületata. Võrreldes omavahel Vão G1 ja G2 ning Iru Elektriijaama generaatorite tulemusi on sarnast mõju näha kõigi kolmele generaatori puhul. Lühisest tekkinud pingelohk on kõigi kolme generaatori puhul sarnane. Analüüsides aga lühisetalitlusel pingesümmeetriast tingitud mõjusid võib tulemuste põhjal välja tuua, et kolmest generaatorist on pingesümmeetria mõjudele enim tundlik Iru Elektriijaama generaator, mille voolu vastujärgnevuskomponendi väärtus ja kumulatiivse pingesümmeetria mõju on suurimad. Viimane tuleneb asjaolust, et Iru Elektriijaama generaatori ekvivalentne takistus on ülekandevõrgu suhtes kolmest generaatorist väikseim. Sellest tulenevalt analüüsitakse järgmiste lühisejuhtumite simulatsioonitulemusi vaid Iru Elektriijaama generaatorile.

B-G lühis

Järgnevalt analüüsitakse ülekandevõrgu ühefaasilise, faasi B ja maa vahelise lühise mõju Iru Elektriijaama generaatorile. Joonise 7.13 põhjal langeb generaatori väljundpinge lühise ajal väärtuseni 8,30 kV. Lühise möödumisel generaatori väljundpinge aga taastub oma lühise eelsele väärtusele.

Hindamaks ülekandevõrgu lühisest tingitud mõju pingesümmeetria seisukohast on joonistel 7.15 ja 7.16 toodud generaatori voolu vastujärgnevuskomponendi ja pingesümmeetria kumulatiivse mõju graafik lühise ajal. Voolu vastujärgnevuskomponendi maksimaalseks väärtuseks on 142,09% ja lühisest tingitud kumulatiivne pingesümmeetria mõju ulatub 0,192 sü. Viimase korral ei ületata lühisetalitlusele kehtestatud piirmäära.

Toodu põhjal ei kaasne vaadeldud ülekandevõrgu lühisejuhtumiga püsivaid talitlushäiringuid Iru Elektriijaama generaatori töös. Faasi B ja maa vahelise lühise mõju on sarnane eelnevalt vaadeldud faasi A ja maa vahelise lühisega.

C-G lühis

Järgmiseks analüüsitakse ülekandevõrgu ühefaasilise, faasi C ja maa vahelise lühise mõju Iru Elektriijaama generaatorile. Generaatori väljundpinget kajastab joonis 7.17, kus lühise ajal langeb generaatori väljundpinge väärtusele 8,27 kV.

Sarnaselt eelnevalt vaadeldud kahele lühisejuhtumile, ei avalda ka faasi C ja maa vaheline lühis püsivaid häiringuid generaatori talitluses. Võrreldes omavahel kõiki kolme vaadeldud lühisejuhtumit selgub tulemuste põhjal, et ühefaasilise lühise mõjud generaatori talitlusele on samasugused sõltumata, kas tegemist on faasi A, B või C ja maa vahelise lühisega.

AB-G lühis

Järgnevalt vaadeldakse kahefaasilist lühisejuhtumit ülekandevõrgus, kus lühis toimub faasi A ja B ning maa vahel. Joonisel 7.21 on toodud Iru elektrijaama generaatori väljundpinge, mis lühisest tingituna langeb väärtuseni 5,99 kV. Kahefaasilise lühise korral tekkiv pingelohk on märgatavalt suurem võrreldes eelnevalt vaadeldud ühefaasiliste lühisejuhtumitega.

Pingeasümmeetriast generaatorile avalduvad kahefaasilise lühise mõjud on toodud joonisel 7.23 ja 7.24. Generaatori voolu vastujärgnevuskomponent saavutab lühise ajal väärtuse 185,91%, mis on suurem kui eelnevalt vaadeldud ühefaasiliste juhtumite korral saadud tulemused. Ka pingeasümmeetria kumulatiivne mõju on kahefaasilise lühise korral suurem olles 0,263 sü, sealjuures aga ületamata lühisetalitlusele kehtestatud piirmäära.

Saadud tulemuste põhjal järeldub, et antud kahefaasilise lühisejuhtumi korral on pingesümmeetriast avalduv mõju seni suurim. Sellest hoolimata ei kaasne AB-G lühisejuhtumiga püsivaid talitlushäiringuid Iru Elektriijaama generaatori talitluses ning lühise möödumisel saavutab generaator oma lühise eelse talitluse.

BC-G lühis

Järgnevalt analüüsitakse kahefaasilist lühist faasi B ja C ning maa vahel. Joonis 7.25 kajastab Iru Elektriijaama generaatori väljundpinge pingelohku, kus lühise ajal langeb pinge väärtusele 5,96 kV, mis on samas suurusjärgus eelnevalt vaadeldud faaside A ja B ning maa vahelisel lühisejuhtumiga.

Joonis 7.27 ja 7.28 kajastavad BC-G lühise mõju pingesümmeetria seisukohast. Joonisel 7.27 toodud generaatori voolu vastujärgnevuskomponent saavutab lühise ajal väärtuse 162,55%, mis on mõnevõrra väiksem eelnevalt vaadeldud kahefaasilise AB-G lühise juures saadud tulemusest. Samuti on mõnevõrra väiksem ka generaatorile avalduv pingesümmeetria kumulatiivne mõju, mis lühise ajal on maksimaalselt 0,240 sü.

silise BC-G lühise simulatsioonitulemuste põhjal selgub, et antud lühisega ei kaasne otseseid talitlushäiringuid Iru Elektri jaama generaatorile. Generaator säilitab oma stabiilsuse ning lühise möödumisel taastub esialgne talitusrežiim.

ABC-G lühis

Viimaseks lühisejuhtumiks on ülekandevõrgu kolmefaasiline lühis maaga. Sarnaselt eelnevate lühisejuhtumitega analüüsitakse ülekandevõrgu lühise mõju Iru Elektri jaama generaatorile. Joonisel 7.29 on toodu generaatori väljundpinge graafik, kus lühise ajal langeb pinge väärtuseni 3,36 kV. Tekkiv pingelohk on kõigist vaadeldud lühisejuhtumitest suurim. Lühise möödumisel taastub aga generaatori väljundpinge esialgsele väärtusele.

Hinnates ülekandevõrgu pingeasümmeetria ja lühise koosmõjul generaatorile avalduvat mõju on jooniselt 7.31 näha, et lühise ajal saavutab voolu vastujärgnevuskomponent väärtuse 16,09%. Ühtlasi on see vaadeldud lühisejuhtumistest väikseim väärtus. Joonis 7.32 kajastab lühise ajal generaatorile avalduvat soojuslikku mõju tulenevalt kumulatiivsest pingeasümmeetriast, olles lühise ajal 0,032 sü. Antud tulemus ei ületa lühisetalitlusel generaatorile kehtestatud piirmäära ning sarnaselt voolu vastujärgnevuskomponendile on see vaadeldud lühisejuhtumitest väikseim.

Kolmefaasilise lühise simulatsioonitulemuste põhjal selgub, et antud lühisejuhtumiga on generaatorile avalduvad mõjud väiksemad ning ülekandevõrgu lühis ei põhjusta talitlushäiringuid generaatorite töös.

Ülekandevõrgu põhjasoas ülekandevõrgu lühisega generaatoritele kaasnevate mõjude hindamisel analüüsitakse kuut erinevat lühisejuhtumit Iru alajaama lattidel. Kõige paremini kirjeldab erinevate lühisejuhtumite kriitilisust generaatori voolu vastujärgnevuskomponendi väärtus lühise ajal. Saadud tulemuste põhjal selgub, et ühefaasiliste lühiste korral, sõltumata lühistatud faasist on generaatorile avalduvad mõjud sarnased. Seega ei saa eraldi eristada A, B või C faasi lühise kriitilisust üksteisest. Kahefaasilistest lühiste juures oli näha suuremaid mõjutusi generaatorite talitlusele, kui seda oli ühefaasiliste lühiste korral. Ühtlasi kahest vaadeldud kahefaasilisest lühisest, avaldas generaatorite talitlusele enam mõju faaside A ja B ning maa vaheline lühis. Kõige lihtsamaks lühisejuhtumiks osutus kolmefaasiline maaga lühis, kus lühi-

sest tingitud pingelohk generaatori väljundpinges oli küll suurim kuid generaatori voolu vastujärgnevuskomponent ja kumulatiivne pingesümmeetria mõju on väikseimad.

Iru alajaama lattidele ühendatud kolmest generaatorist avaldavad ülekandevõrgus toimuvad lühised kõige enam mõju Iru Elektriijaama generaatorile. Väo generaatoritele G1 ja G2 avalduvad mõjud on omavahel sarnased ning mõnevõrra väiksemad võrreldes Iru Elektriijaama generaatorile avalduvate mõjudega.

7.2 Lühis Metsakombinaadi alajaama lattidel elektriraudtee liitumisel Kehtna alajaamas

Ülekandevõrgu lõunaosas on Pärnu Elektriijaama generaator ühendatud Metsakombinaadi alajaama lattidele. Sellest tulenevalt vaadeldakse juba eelnevalt kirjeldatud ülekandevõrgu lühisejuhtumeid ka Metsakombinaadi alajaama lattidel. Kuna ülekandevõrgu lõunaosas on kolm elektriraudtee koormuse liitumispunkti, siis analüüsitakse lühise mõjusid Pärnu Elektriijaama generaatorile kõikide liitumispunkti korral. Esmalt vaadeldakse elektriraudtee koormuse liitumispunktina Kehtna alajaama.

A-G lühis

Järgnevalt analüüsitakse ühefaasilise, faasi A ja maa vahelise lühise mõjusid. Pärnu Elektriijaama generaatori väljundpinge graafikut kajastab joonis 7.33, kus pinge langeb lühise ajal 8,22 kV-ni. Lühise möödumisel pinge aga taastub lühise eelsele olukorrale.

Lühise möödumisel generaatori talitluse kiirest taastumist ja stabiilsust kinnitab ka joonise 7.34 toodud generaatori faasinurk.

Pingeasümmeeria seisukohast lühisega kaasnevaid mõjusid Pärnu Elektri jaama generaatorile kirjeldavad joonised 7.35 ja 7.36. Joonisel 7.35 toodud voolu vastujärgnevuskomponent saavutab lühise ajal väärtuseks 112,56%. Vastavalt joonisele 7.36 on lühisetalitlusel pingeasümmeeria kumulatiivne mõju generaatorile 0,127 sü, millega ei ületata kehtestatud 30 sü piirmäära.

Eelnevalt toodu põhjal järeldeb, et ülekandevõrgu faasi A ja maa vahelise lühise korral ei ületata lühisetalitlusel generaatorile seatud piirmäära ning lühisega ei kaasne püsivaid häiringuid generaatori töös.

Sarnaselt eelnevalt vaadeldud Iru alajaama lühisejuhtumitega, on ka Metsakombinaadi lühisejuhtumite korral ühefaasiliste lühiste mõjud sarnased. Sellest tulenevalt tuuakse ülekandevõrgu lõunaosa liitumispunktide juures (Kehtna, Sindi ja Kilingi-Nõmme) ühefaasiliste lühiste mõjudena eraldi välja kolmest juhtumist üks. Sellest tulenevalt ei analüüsita alljärgnevalt eraldi lühisejuhtumeid B-G ja C-G (saadud simulatsioonitulemused on kajastatud tabelis 7.1)

AB-G lühis

Järgnevalt vaadeldakse ülekandevõrgu kahefaasilist lühist, kus lühis toimub Metsakombinaadi alajaamas faaside A ja B ning maa vahel. Joonisel 7.37 on toodud lühisest tingitud mõju generaatori väljundpingele. Lühise toimumise ajal langeb pinge väärtusele 5,78 kV. Tekkiv pingelohk on suurem kui eelnevalt vaadeldud ühefaasilise lühijuhtumi juures.

Joonisel 7.38 toodud generaatori faasinurga graafik näitab, et generaator säilitab oma stabiilsuse ning lühise möödumisel taastub oma esialgsele talitlusele.

Saadud tulemustest selgub, et kahefaasilise AB-G lühisejuhtumiga ei kaasne püsivaid häiriguid generaatori talitluses. Sarnaselt jaotises 7.1 vaadeldud Iru alajaama lühisejuhtumitega, on ka antud juhul kahefaasilise lühisega generaatorile kaasnevad mõjud mõnevõrra suuremad kui ühefaasiliste lühiste korral.

BC-G lühis

Järgnevalt analüüsitakse ülekandevõrgu faaside B ja C ning maa vahelist lühist ja sellega kaasnevaid mõjusid Pärnu Elektri jaama generaatorile. Joonisel 7.41 toodud generaatori väljundpinge graafikult on näha, kuidas lühise ajal langeb pinge väärtusele 5,72 kV. Lühise möödumisel pinge taastub esialgsele väärtusele.

Ka joonisel 7.42 toodud generaatori faasinurk näitab, et lühise möödumisel säilitab generaator oma stabiilse talitluse esialgsete parameetrite juures.

Joonisel 7.43 kajastatud generaatori voolu vastujärgnevuskomponent kirjeldab ülekandevõrgu pingeasümmeetriast tulenevat mõju lühisetalitluse juures, kus voolu vastujärgnevuskomponent saavutab väärtuseks 108,65%. Pingeasümmeetria kumulatiivne mõju ulatub aga vastavalt joonisele 7.44 0,109 sü-ni, mis jääb alla kehtestatud piirmäära.

Saadud tulemuste põhjal ei kaasne ülekandevõrgu faaside B ja C ning maa vahelise lühisega Pärnu Elektriijaama generaatorile püsivaid talitlushäiringuid. Lühise möödumisel suudab generaator säilitada oma stabiilse lühise eelse talitluse. Võrreldes lühisejuhtumi BC-G mõjusid eelnevalt vaadeldud AB-G lühisejuhtumiga selgub, et BC-G lühisel on mõnevõrra väiksem mõju generaatorile. Sealjuures tuleb märkida, et BC-G lühise korral on pingeasümmeetriast tingitud mõju ühtlasi väiksem ka ühefaasiliste lühisejuhtumite juures saadud tulemustest.

ABC-G

Järgnevalt analüüsitakse kolmefaasilise maaühendusega lühise mõju Pärnu Elektriijaama generaatorile. Generaatori väljundpinge langeb lühise ajal vastavalt joonisele 7.45 väärtusele 2,93 kV. Ühtlasi on see madalaim pinge väärtus seni vaadeldud Metsakombinaadi alajaamas toimuvate lühisejuhtumite juures. Lühise möödumisel generaatori pinge aga taastub lühise eelsele väärtusele.

Joonis 7.46 kinnitab, et antud lühisejuhtum ei põhjusta püsivaid talitlushäiringuid generaatori töös ning generaatori faasinurga graafik taastub lühise möödumisel oma esialgsele kujule.

Ülekandevõrgu pingesümmeetriast tulenevaid mõjusid lühisetalitlusel kirjeldavad joonised 7.47 ja 7.48. Joonisel 7.47 kajastatud generaatori voolu vastujärgnevuskomponent saavutab lühise ajal väärtuse 12,48% ning pingesümmeetria kumulatiivne mõju on 0,047 sü. Saadud tulemuste põhjal ei kaasne ülekandevõrgu kolmefaasilise lühisega generaatorile püsivaid talitlushäiringuid. Saadud tulemuste põhjal langeb kolmefaasilise lühise korral generaatori pinge kõige madalamale väärtusele. Hinnates aga pingesümmeetriast tingitud mõjusid, siis ülekandevõrgu kolmefaasiline lühis on generaatorile kõige kergem juhtum

Elektriraudtee koormuse ühendamisel Kehtna alajaamas ning ülekandevõrgus Metsakombinaadi alajaamas toimuvate erinevate lühisejuhtumite juures on alajaama lattidele ühendatud generaatorile avalduvad mõjud suurimad kahefaasilise, faaside A ja B ning maa vahel toimuva lühise korral. Ühegi lühisejuhtumi juures ei ole kaasnevad mõjud aga nii suured, et ohustaksid generaatori stabiilset talitlust.

7.3 Lühis Metsakombinaadi alajaama lattidel elektriraudtee liitumisel Sindi alajaamas

Järgnevalt analüüsitakse ülekandevõrgu Metsakombinaadi alajaama lattidel toimuvaid lühisejuhtumeid elektriraudtee koormuse liitumisel Sindi alajaama. Analüüsi käigus hinnatakse pingesümmeetriast ja lühisetalitlusest tulenevaid mõjusid Metsakombinaadi alajaama lattidele ühendatud Pärnu Elektriijaama generaatorile.

A-G lühis

Ühefaasilise, faasi A ja maa vahelise lühise korral Pärnu Elektriijaama generaatori väljundpinget kajastab joonis 7.49, mille põhjal langeb pinge väärtusele 8,17 kV. Lühise möödumisel pinge taastub oma esialgsele väärtusele.

Joonisel 7.50 on näha generaatori faasinurga kuju, millele antud ülekandevõrgu lühisejuhtum A-G ei avalda mõjuta.

Ülekandevõrgu pingeasümmeetriast tulenev mõju lühisetalitluse juures on toodud joonisel 7.51 ja joonisel 7.52. Joonis 7.51 kajastab generaatori voolu vastujärgenvuskomponenti, mis lühise ajal saavutab väärtuse 113,31%. Pingeasümmeetria kumulatiivne mõju lühisetalitlusel vastavalt joonisele 7.52 on 0,161 sü. Antud väärtus ei ületa kehtestatud 30 sü piirmäära.

Joonis 7.51. Pärnu Elektriijaama generaatori voolu vastujärgnevuskomponent A-G lühise korral Metsakombinaadi alajaama lattidel, elektriraudtee koormuse liitumisel Sindi alajaama

Joonis 7.52. Pärnu Elektriijaama generaatori kumulatiivne pingesümmeetria A-G lühise korral Metsakombinaadi alajaama lattidel, elektriraudtee koormuse liitumisel Sindi alajaama

Saadud tulemustest selgub, et ühefaasiline lühis Metsakombinaadi alajaama lattidel ei põhjusta püsivaid talitlushäiringuid Pärnu Elektriijaama generaatorile.

AB-lühis

Järgmiseks analüüsitakse ülekandevõrgu kahefaasilist lühist Metsakombinaadi alajaamas, kus lühis toimub faaside A ja B ning maa vahel. Joonisel 7.53 on toodud generaatori pingegraafik, kus pinge langeb lühise ajal väärtusele 5,74 kV. Kahefaasilise lühisega kaasnev generaatori väljundpinge langus on suurem kui eelnevalt vaadeldud ühefaasilise lühise korral. Peale lühise möödumist generaatori väljundpinge taastub oma esialgsele väärtusele. Joonisel 7.54 toodud generaatori faasinurga graafik näitab, et antud lühisejuhtum ei mõjuta generaatori faasinurga kuju. Joonis 7.55 kajastab generaatori voolu vastujärgnevuskomponenti, mis ülekandevõrgu kahefaasilise lühise ajal saavutab väärtuseks 109,52%. Pingesümmeetriast tingitud kumulatiivne mõju generaatorile avaldub joonis 7.56, kus selle väärtuseks on 0,158. Saadud

tulemuste põhjal ei ületata 30 sü piirmäära ning antud lühisejuhtumiga ei kaasne püsivaid ta-
litlushäiringuid Pärnu Elektri jaama generaatori töös.

korral Metsakomb

BC-lühis

Järgmiseks vaadeldakse ülekandevõrgu kahefaasilist lühist, faasi B ja C ning maa vahel. Joonisel 7.57 on toodud Pärnu Elektriijaama generaatori pinge väärtus, mis lühise ajal langeb väärtusele 5,67 kV. Sarnaselt kõigile eelmistele juhtumitele taastub generaatori pinge lühise möödumisel.

Joonisel 7.58 toodud generaatori faasinurga graafik näitab, et ülekandevõrgu lühisega ei kaasne püsivaid talitlushäiringuid generaatori töös.

Antud kahefaasilise lühisejuhtumiga kaasnev pingesümmeetriast tingitud mõju avaldub joonistel 7.59 ja 7.60. Vastavalt joonisele 7.59 saavutab generaatori voolu vastujärgnevuskomponent väärtuse 108,49%. Joonisel 7.60 toodud kumulatiivne pingesümmeetria mõju ulatub lühisajalilisele väärtusele 0,144 sü, mis jääb kehtestatud piirmäära. Saadud tulemuste põhjal ei põhjusta faasi B ja C ning maa vaheline lühis Pärnu Elektriijaama generaatori töös püsivaid talitlushäiringuid.

korral Metsakomb

ABC-lühis

Järgmiseks analüüsitakse ülekandevõrgu kolmefaasilise maaühendusega lühise mõju Pärnu Elektriijaama generaatorile. Joonisel 7.61 toodud generaatori väljundpinge graafik näitab sarnaselt eelnevalt vaadeldud liitumispunktidele, et kolmefaasilise lühisega kaasnev pingelohk on kõigist kuuest vaadeldavast lühisejuhtumist suurim. Antud juhul langeb generaatori pinge väärtusele 4,58 kV. Lühise möödumisel taastub generaatori väljundpinge aga lühise eelsele olukorrale. Generaatori talitluse stabiilsuse säilimist kirjeldab ka joonisel 7.62 toodud generaatori faasinurga graafik, mis lühise möödumisel taastab oma esialgse kuju.

Pingeasümmeeria seisukohast generaatorile avalduv mõju lühisetalitlusel on kolmefaasilise lühise korral kõige väiksem. Seda kirjeldab joonisel 7.63 toodud generaatori voolu vastujärgnevuskomponent, mis lühise ajal saavutab väärtuse 12,31%. Joonisel 7.64 on toodud pingeasümmeeria kumulatiivne mõju, mille väärtus lühise ajal jääb alla kehtestatud 30 sü, olles väärtusega 0,047 sü. Toodud tulemuste põhjal saab järeldada, et ülekandevõrgu kolmefaasilise lühisega ei kaasne generaatorile püsivaid talitlushäiringuid.

*ama generaatori kumulatiivne ping etria ABC-G
korral Metsakombinaadi alajaama lattidel, elektriraudtee koormuse liitumisel Sindi alajaama*

Elektriraudtee koormuse ühendamisel ülekandevõrgu lõunaosas Sindi alajaama ja Metsakombinaadi alajaamas toimuvate ülekandevõrgu lühisejuhtumite juures selgub, et nii ühefaasilise kui kahefaasiliste lühiste juures on generaatorile avalduvad mõjud väga sarnased. Erinevalt eelnevalt analüüsitud Järveküla ja Kehtna alajaama liitumispunktidele, on antud Sindi liitumispunkti korral keeruline eraldi välja tuua raskeimat lühisejuhtumit generaatorile. Nii ühefaasiliste kui kahefaasiliste lühisejuhtumite juures saadud pingeasümmeetriast tingitud voolu vastujärgnevuskomponendi väärtused ning pingeasümmeetria kumulatiivne mõju on sarnased. Kõige vähem mõjutab generaatorite talitlust aga kolmefaasiline maaühendus.

7.4 Lühis Metsakombinaadi alajaama lattidel elektriraudtee liitumisel Kilingi-Nõmme alajaamas

Järgmiseks analüüsitakse ülekandevõrgu lühise mõjusid Metsakombinaadi alajaama ühendatud Pärnu Elektriijaama generaatorile elektriraudtee koormuse ühendamisel Kilingi-Nõmme alajaama.

A-G lühis

Ülekandevõrgu ühefaasilise, faasi A ja maa vahelise lühise mõju Pärnu Elektriijaama generaatori väljundpingele on toodud joonisel 7.65, kus lühise ajal generaatori pinge langeb väärtusele 8,20 kV. Lühise möödumisel pinge aga taastub oma esialgsele väärtusele.

Joonised 7.67 ja 7.68 kajastavad ülekandevõrgu pingesümmeetriast tulenevat mõju lühisetalitlusel. Joonisel 7.67 toodud generaatori voolu vastujärgnevuskomponent saavutab lühise ajal väärtuse 109,88%. Pingesümmeetria kumulatiivne mõju antud juhtumi juures on 0,141 sü, mis jääb lühisetalitlusel kehtestatud piirmäära.

Saadud tulemuste põhjal järeldub, et elektriraudtee koormuse ühendamisel Kilingi-Nõmme alajaama ning ühefaasilise lühise toimumisel Metsakombinaadi alajaama lattidel, ei avalda talitluslikke häiringuid Pärnu Elektri jaama generaatorile.

AB-lühis

Järgmiseks vaadeldakse ülekandevõrgu kahefaasilist lühis, kus lühis toimub faasi A ja B ning maa vahel. Joonisel 69 on toodud Pärnu Elektri jaama generaatori väljundpinge, mis lühise ajal langeb väärtusele 5,79 kV. Lühise möödumisel pinge aga taastub lühise eelsele väärtusele.

Pingeasümmeetriast tingitud mõju ülekandevõrgu lühisetalitluses generaatori voolu vastujärgnevuskomponendile on toodud joonisel 7.71, kus antud lühisejuhtumi juures saavutab voolu vastujärgnevuskomponent väärtuseks 105,97%. Pingeasümmeetria kumulatiivne mõju, vastavalt joonisele 7.72, on sealjuures 0,137 sü, mis jääb alla kehtestatud piirmäära ning ei põhjusta häiringuid generaatori talitluses.

BC-lühis

Järgnevalt analüüsitakse faaside B ja C ning maa vahelise lühise mõjusid Pärnu Elektriijaama generaatorile. Generaatori pinge graafik on toodud joonisel 7.73, kus väljundpinge väärtus langeb 5,72 kV-ni. Sarnaselt eelnevatele juhtumitele taastub pinge väärtus lühise möödumisel.

Joonisel 7.74 toodud generaatori faasinurga graafik põhjal on näha, et antud lühisejuhtum ei põhjusta püsivaid talitlushäiringuid generaatori talitluses.

Ülekandevõrgu pingesümmeetriast tingitud generaatori voolu vastujärgnevuskomponendi väärtus lühise korral on 103,51%, vastavalt joonisel 7.75 toodule. Pingesümmeetria kumulatiivne mõju vastavalt joonisele 7.76 saavutab lühise ajal väärtuse 0,106 sü. Sealjuures ei ületata lühisetalitlusel kehtestatud piirmäära. Saadud tulemuste põhjal ei kaasne faasi B ja C ning maa vahelise lühisega püsivaid talitlushäiringuid Pärnu Elektri jaama generaatorile.

ABC-lühis

Järgmiseks vaadeldakse ülekandevõrgu kolmefaasilist maahendusega lühisejuhtumit ning sellest tulenevat mõju Pärnu Elektri jaama generaatorile. Joonisel 7.77 on toodud lühisest tingitud generaatori väljundpinge pingelohk, kus lühise ajal langeb pinge väärtusele 2,91 kV. Samaselt eelnevalt vaadeldud liitumispunktidele on ka Kilingi-Nõmme liitumispunkti puhul kolmefaasilisest lühisest tingitud pingelohk suurim võrreldes teiste lühisejuhtumitega. Lühise möödumisel generaatori väljundpinge taastub aga oma lühise eelsele väärtusele.

Pingeasümmeetriast tingitud mõju kolmefaasilise lühise ajal on kajastatud joonistel 7.79 ja 7.80. Vastavalt joonisele 7.79 saavutab generaatori voolu vastujärgnevuskomponent väärtuseks 12,41%. Pingeasümmeetria kumulatiivne mõju on vastavalt joonisele 7.80 lühise ajal aga 0,030 sü, mis jääb alla kehtestatud piirmäära.

Kolmefaasilise lühise simulatsioonitulemuste põhjal selgub, et antud lühisjuhtumiga on Pärnu Elektriijaama generaatorile avalduvad mõjud väiksemad ning ülekandevõrgu lühis ei põhjusta talitlushäiringuid generaatori töös.

Elektriraudtee koormuse ühendamisel ülekandevõrgu lõunaosas Kilingi-Nõmme alajaama ja Metskombinaadi alajaamas toimuvate ülekandevõrgu lühisejuhtumite simulatsioonidest selgub, et sarnaselt eelnevalt analüüsitud Sindi alajaama liitumispunktile, on nii ühe- kui kahefaasiliste lühiste mõjud Metsakombinaadi alajaama ühendatud Pärnu Elektriijaama generaatorile sarnased. Antud juhul on raske eraldi välja tuua generaatorile kriitilisemat lühisejuhtumit, kuna nii generaatori voolu vastujärgnevuskomponendi väärtused kui kumulatiivne pingesümmeetria mõju erinevate lühisejuhtumite juures on sarnane. Kõige väiksem mõju generaatori talitlusele on aga kolmefaasilise maaühendusega ülekandevõrgu lühise korral.

7.5 Kokkuvõte

Ülekandevõrgu põhjaosas on käsitletud lühise asukohana Iru alajaama, mis on generaatoritele lähimaks punktiks. Ülekandevõrgu lõunaosaks on samadel põhimõtetel lühise asukohaks valitud Metsakombinaadi alajaam. Antud ülekandevõrgu lühisejuhtumite juures on huvi eelkõige ülekandevõrgus elektriraudtee koormuse liitumisest tingitud pingesümmeetria mõju generaatoritele erinevat liiki lühiste juures. Sellest tulenevalt on generaatori juures tähelepanu pööratud voolu vastujärgnevuskomponendi väärtusele ja pingesümmeetria kumulatiivsele mõjule.

Elektriraudtee koormus on ühendatud ülekandevõrgu faaside A ja B vahele, mistõttu võib eeldada, et erinevate lühisejuhtumitega kaasnev mõju generaatoritele on erinev. Sellest tulenevalt vaadetakse erinevaid lühisejuhtumeid, kus lühisega on kaasatud erinevad ülekandevõrgu faasid. Eesmärgiks oli välja selgitada generaatoritele kõige enam mõju avaldav ehk kõige kriitilisem ülekandevõrgu lühisejuhtum. Tabel 7.1 kajastab ülekandevõrgu lühisejuhtumite mõju generaatorite talitlusele.

Tabel 7.1. Ülekandevõrgu lühisejuhtumite mõjud generaatorite talitlusele

Vastavalt simulatsioonitulemustele on näha, et ühefaasilise lühiste mõjud on sarnased. Hoolimata sellest, kas lühis toimub faasi A, faasi B või faasi C ja maa vahel. Ülekandevõrgu põhjaosas avaldub lühisetalitlusest tingitud suurim mõju Iru Elektriijaama generaatorile, kus voolu vastujärgnevuskomponendi ja kumulatiivse pingesümmeetria tulemused on mõnevõrra suuremad. Kahefaasiliste lühiste mõju Iru alajaama ühendatud generaatoritele on mõnevõrra suurem kui ühefaasiliste lühiste mõju, kusjuures ülekandevõrgu põhjaosas Järveküla liitumispunkti korral on kriitilisemaks lühisejuhtumiks faasi A ja B ning maa vaheline lühis.

Ülekandevõrgu lõunaosas analüüsiti Metsakombinaadi alajaama lühisega kaasnevate mõjude erinevust Kehtna, Sindi ja Kilingi-Nõmme liitumispunkti korral. Ka lõunaosas Pärnu Elektriijaama generaatorile avalduvad mõjud on põhjaosas saadud tulemustega samas suurusjärgus, või mõningate lühisejuhtumite juures isegi väiksemad. Samas kui Järveküla liitumispunkti korral võis selgelt eristada kriitilisema lühisejuhtumi, siis lõunaosa liitumispunktide korral on see keerulisem. Kehtna liitumispunkti korral võib öelda, et kriitilisemaks juhtumiks on sarnaselt Järveküla liitumispunktile faasi A ja B ning maa vaheline lühis, kus generaatori voolu vastujärgnevuskomponent saavutab suurima väärtuse. Sindi ja Kilingi-Nõmme liitumispunktide korral on kindlat lühisejuhtumi esiletoomine keerulisem. Saadud tulemused on väga sarnased nii ühe- kui kahefaasiliste lühiste korral. Kõigi liitumispunktide ja vaadeldud generaatorite mõjude juures saab aga väita, et ülekandevõrgu kolmeefaasilisest lühisest tingitud mõjud on kõikidest lühisejuhtumitest väikseimad.

Pingesümmeetria seisukohast paistavad saadud tulemuste põhjal ülekandevõrgu lühised enam mõjutavat põhjaosas Iru alajaama ühendatud generaatoreid. Lõunaosa erinevate liitumispunktide juures Metsakombinaadi lühisejuhtumitega kaasnevad mõjud generaatori talitlusele on mõnevõrra väiksemad, kui Iru alajaamas aset leidvate lühiste korral Iru alajaama ühendatud generaatoritel. Ülekandevõrgu lõunaosas vaadeldud kolme liitumispunkti juures on märgata mõnevõrra suuremaid mõjusid generaatori talitlusele Kehtna alajaama liitumispunkti

korra. Samas kui Sindi ja Kilingi-Nõmme liitumispunktide juures on saadud tulemused teineteisele väga sarnased.

Antud analüüsi põhjal võib öelda, et ülekandevõrgu lühistele on kõige tundlikum Iru Elektri-jaama generaator ning kriitilisemaks lühisejuhtumiks on kahefaasiline, faasi A ja B ning maa vaheline lühis. Ühegi lühisejuhtumi ja liitumispunkti korral ei ületa generaatorid 0,1 sekundi pikkuse lühisetalitluse juures neile kehtestatud kumulatiivse pingesümmeetria piirmäära. Antud lühisetalitus on lühike põhjustamaks kumulatiivsest pingesümmeetriast tulenevat generaatorite ülekuumenemise ohtu. Ühegi vaadeldud stsenaariumi juures ei kaasne ülekandevõrgu lühisega püsivaid häiringuid generaatorite töös ning lühise möödumisel taastub generaatorite stabiilne talitus.

8. Elektriraudtee kontaktvõrgus toimuvate lühiste mõju liitumispunktidele ja generaatoritele

Antud peatükk analüüsib elektriraudtee kontaktvõrgust toimuvate lühiste mõju edasi kandumiselt ülekandevõrku. Vaadeldakse lühise tagajärjel tekkivat pinge väärtuse langust ülekandevõrgu alajaamades. Eelkõige elektriraudtee koormuse liitumispunkti alajaamades, kus oodatavad mõjud on suurimad. Lisaks analüüsitakse elektriraudtee kontaktvõrgu lühisest tingitud mõjusid ka ülekandevõrgu generaatoritele, Iru alajaamas ja Metsakombinaadi alajaamas. Elektriraudtee toitesüsteemis on mitmeid seksioone ja ümberlülitusi, mistõttu erinevalt tavapärasest elektrivõrgust võib kontaktvõrgus lühisekoha leidmine ja lühise välja lülitamine võtta tavapärasest enam aega. Sellest tulenevalt vaadeldakse kontaktvõrgus toimuvate lühiste korral pikendatud lühisetalitlust, kus lühise kestvuseks on määratud 1 sekund. Ka nimiaandmete järgi on elektriseadmed sertifitseeritud lühisele kestvusega 1 sekund, mistõttu on see ühtlasi maksimaalne lubatud lühise kestvus elektriraudtee toitesüsteemis.

Vastavalt projekti eelmises etapis tehtud analüüsidele [1] selgus, et kontaktvõrgus toimuvate lühiste korral kanduvad suurimad mõjud ülekandevõrku veoalajaama vahetus läheduses toimuvate lühiste korral. Selles tulenevalt käsitletakse alljärgnevate juhtumite juures elektriraudtee kontaktvõrgus toimuvate lühise asukohana veoalajaama vahetut lähedust, kus lühis toimub viimase toitetrafo lattidel.

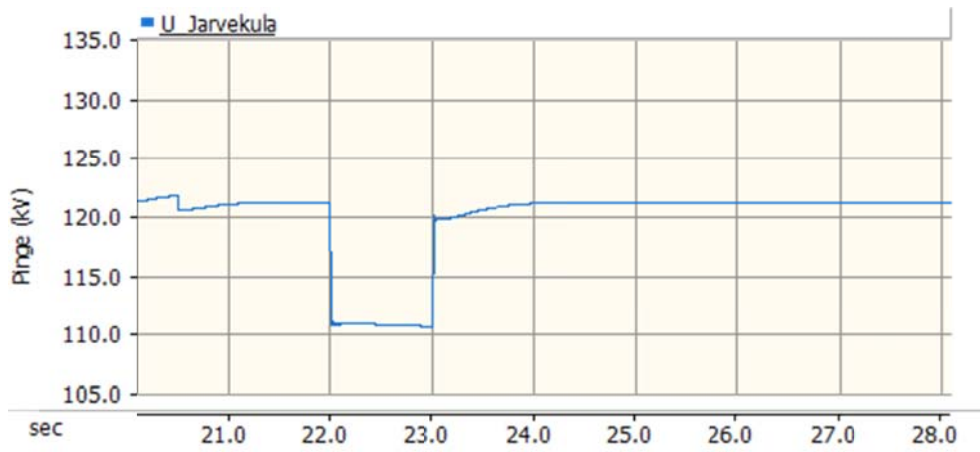
Järgnevalt analüüsitakse elektriraudtee kontaktvõrgus aset leidva lühise mõjusid ülekandevõrgu alajaamade pingele ja ülekandevõrku ühendatud generaatorite talitlusele kõigil neljal elektriraudtee koormuse liitumispunkti korral, milleks ülekandevõrgu põhjaosas on Jär-

veküla alajaam ja lõunaosas Kehtna, Sindi ning Kilingi-Nõmme alajaamad. Kontaktvõrgu ühefaasiline lühis leiab aset simulatsiooniperioodi 22. sekundil ning kontaktvõrgu normaalne talitus taastub simulatsiooni 23. sekundil.

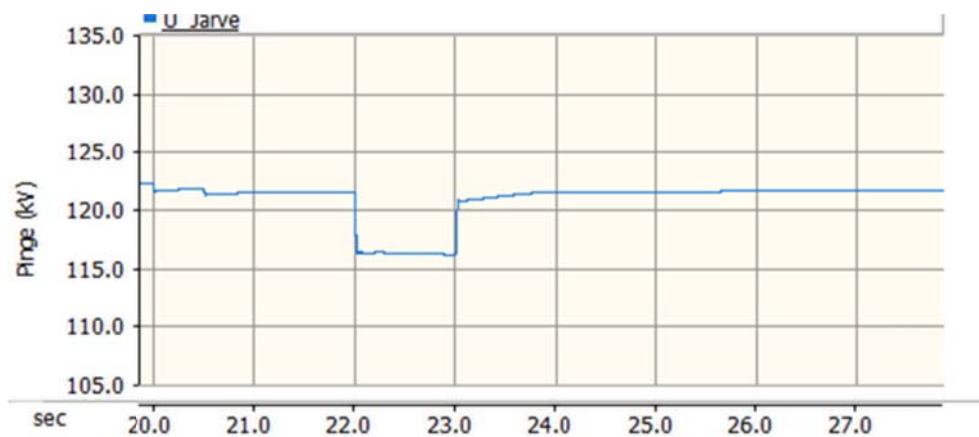
8.1 Järveküla liitumispunkt

Järgnevalt analüüsitakse kontaktvõrgu lühisetalitlust elektriraudtee koormuse liitumisel ülekandevõrgu põhjaosas Järveküla alajaama. Liitumispunkti alajaama ja teiste ülekandevõrgu alajaamade lattidel lühise ajal tekkivad pingelohud on toodud tabelis 8.1. Suurim lühisest tingitud pinge langus tekib liitumispunkti Järveküla alajaamas, kus pinge väärtus langeb 10,37 kV võrra, saavutades lühise perioodiks väärtuse 110,70 kV. Seega on kontaktvõrgu lühisest tingitud pinge väärtuse langus liitumispunkti alajaamas 8,56%. Vastavat pinge väärtuse muutust lühise ajal kirjeldab joonisel 8.1 toodud Järveküla alajaama faasidevaheline pinge graafik. Tabelis 8.1 toodud andmetest on näha, et ülekandevõrgu teistes alajaamades on lühisest tingitud pinge langus valdavalt suurusjärgus 3-5 kV. Joonisel 8.2 on toodud Järve alajaama pingelohk väärtusega 5,27 kV ja joonisel 8.3 Iru alajaama pingelohk väärtusega 5,21 kV.

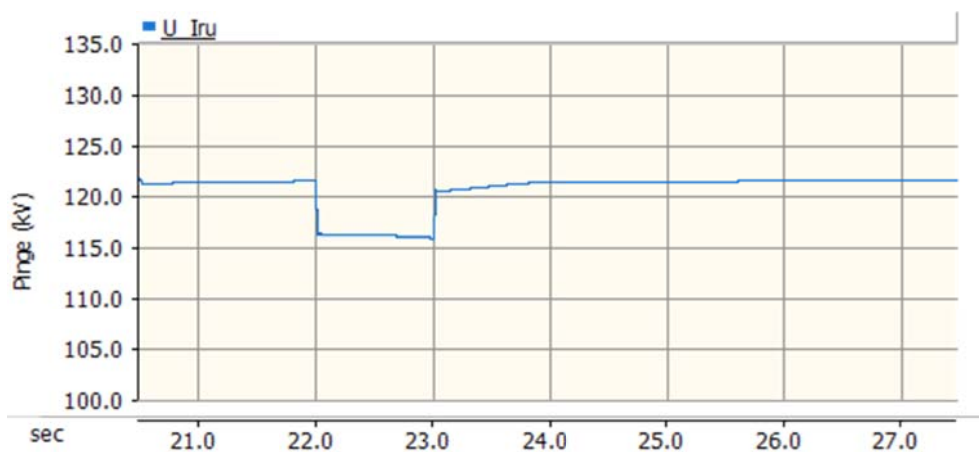
Tabel 8.1. Pingelohk alajaama lattidel kontaktvõrgu lühise korral, liitumispunkt Järveküla alajaam



Joonis 8.1. Järveküla alajaama faasidevaheline pinge kontaktliini lühise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Järveküla alajaama



Joonis 8.2. Järve alajaama faasidevaheline pinge kontaktliini lühise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Järveküla alajaama



Joonis 8.3. Iru alajaama faasidevaheline pinge kontaktliini lühise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Järveküla alajaama

Lisaks alajaama latipingetele analüüsitakse kontaktvõrgus aset leidva lühise mõju ka ülekandevõrgu põhjaosas Iru alajaama ühendatud generaatorite talitlusele. Joonis 8.4 kajastab Vão generaatori G1 pinge graafikut, kus lühise ajal väljundpinge väärtus langeb 0,62 kV ehk 5,77% võrra, saavutades minimaalseks väärtuseks 10,12 kV. Joonis 8.5 toodud Vão generaatori G1 faasinurga graafik näitab, et kontaktvõrgu lühisega ei kaasne püsivaid häiringuid generaatori talitluses ning lühise möödumisel 23. sekundil taastub generaatori stabiilne talitus.

Joonis 8.4. Vão generaatori G1 väljundpinge kontaktliini lühise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Järveküla alajaama

Joonis 8.5. Vão generaatori G1 faasinurk kontaktliini lühise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Järveküla alajaama

Iru Elektriijaama generaatori väljundpinges lühisest tingitud pingelohk on 0,56 kV ehk 5,19%, vastavalt joonisel 8.10 toodud väljundpinge graafikule. Joonisel 8.11 toodud generaatori faasinurga graafikust järeldub, et antud kontaktvõrgu lühisega ei kaasne püsivaid talitlushäiringuid Iru Elektriijaama generaatori töös.

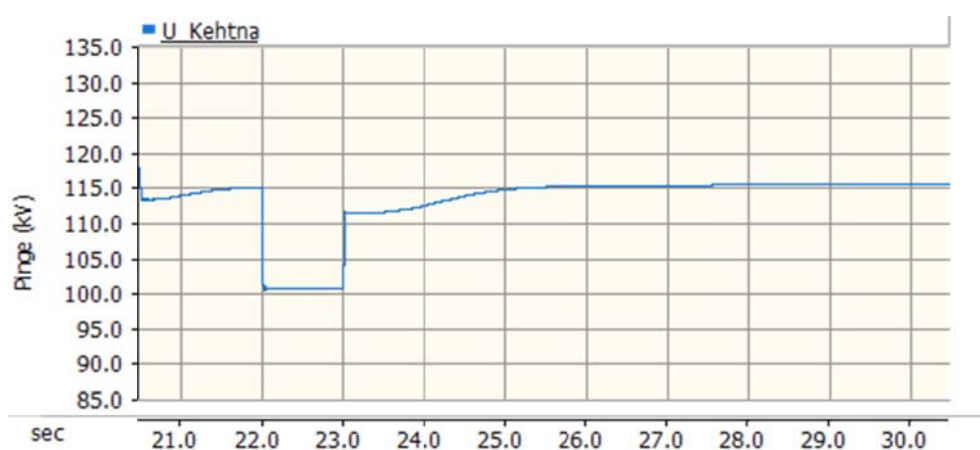
Joonisel 8.12 toodud generaatori voolu vastujärgnevuskomponendi graafikult on näha, et kontaktvõrgu lühisega kaasneva pingeasümmeetria mõju ulatub väärtuseni 20,12%. Ühtlasi on see kolme vaadeldud generaatori puhul suurim voolu vastujärgnevuskomponendi väärtus kontaktvõrgu lühise korra.

Saadud tulemuste puhul võib järeldada, et elektriraudtee kontaktvõrgus tekkiv lühis ei põhjusta ülekandevõrgu põhjaosas olevate generaatorite talitluses püsivaid häiringuid. Kolmest vaadeldud generaatorist on kontaktvõrgu lühistele aga kõige tundlikum Iru Elektrijaama generaator, kus generaatori voolu vastujärgnevuskomponent saavutab väärtuse 20,12%.

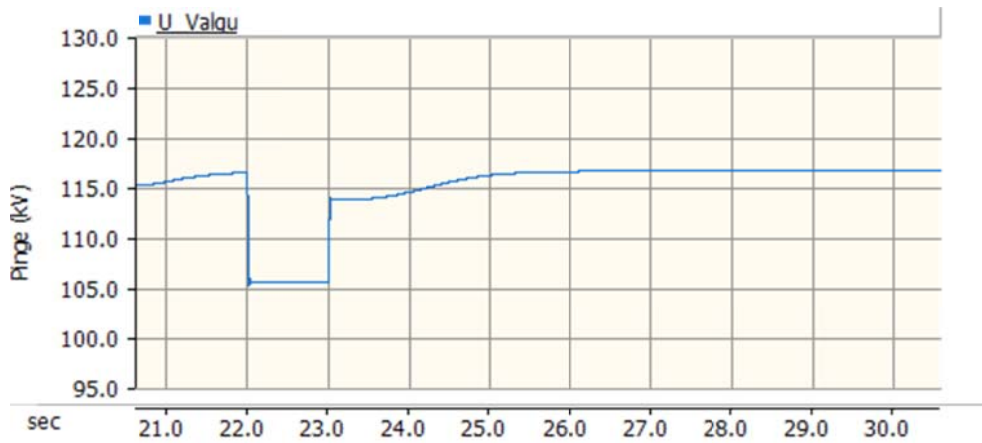
8.2 Kehtna liitumispunkt

Järgnevalt vaadeldakse kontaktvõrgus toimuva lühise olukorda elektriraudtee koormuse liitumisel ülekandevõrgu lõunaosas Kehtna alajaama. Lühise toimumise perioodil ülekandevõrgu alajaamade lattidel tekkivat pinget kajastavad tabelis 8.2 toodud pingelohkude väärtused. Suurim pinget langus tekib liitumispunkti Kehtna alajaamas, kus pinget väärtus langeb 20,57 kV võrra, saavutades latipinget väärtuseks 100,57 kV. Seega on kontaktvõrgu lühisest tingitud pinget väärtuse langus liitumispunkti alajaamas 16,98%. Kehtna alajaama faasidevahelise pinget langust kajastab joonis 8.13. Lisaks liitumispunkti alajaamale on suurt pinget langust märgata ka Valgu (joonis 8.14), Järvakandi (joonis 8.15), Vigala (joonis 8.16), Rapla ja Kohila alajaamades, vastavate pingelohkude väärtustega 15,34 kV; 12,62 kV; 11,20 kV; 9,33 kV ja 7,21 kV.

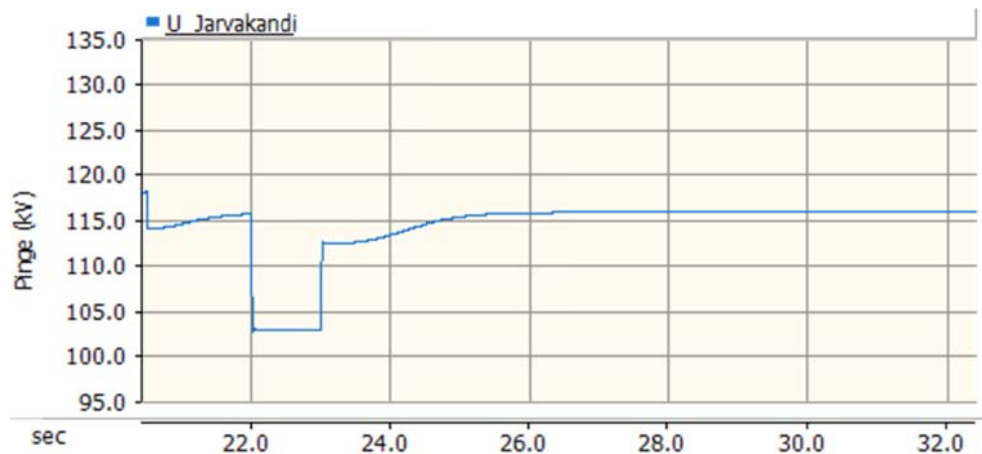
Tabel 8.2. Pingelohk alajaama lattidel kontaktvõrgu lühise korral, liitumispunkt Kehtna alajaam



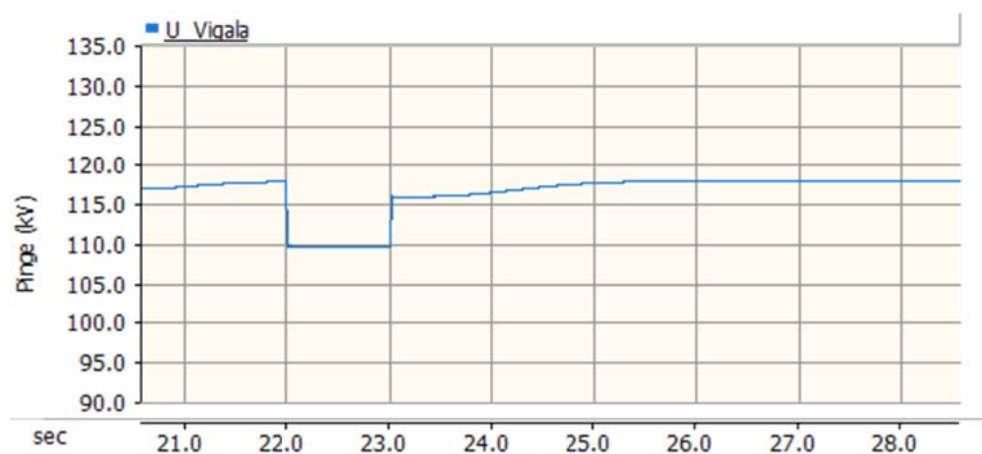
Joonis 8.13. Kehtna alajaama faasidevaheline pinge kontaktliini lühise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Kehtna alajaama



Joonis 8.14. Valgu alajaama faasidevaheline pinge kontaktliini lühise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Kehtna alajaama

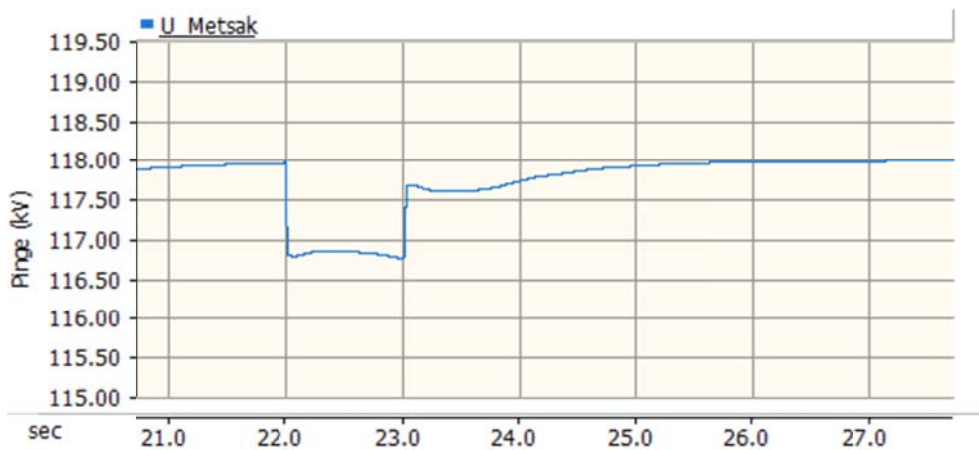


Joonis 8.15. Järvakandi alajaama faasidevaheline pinge kontaktliini lühise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Kehtna alajaama

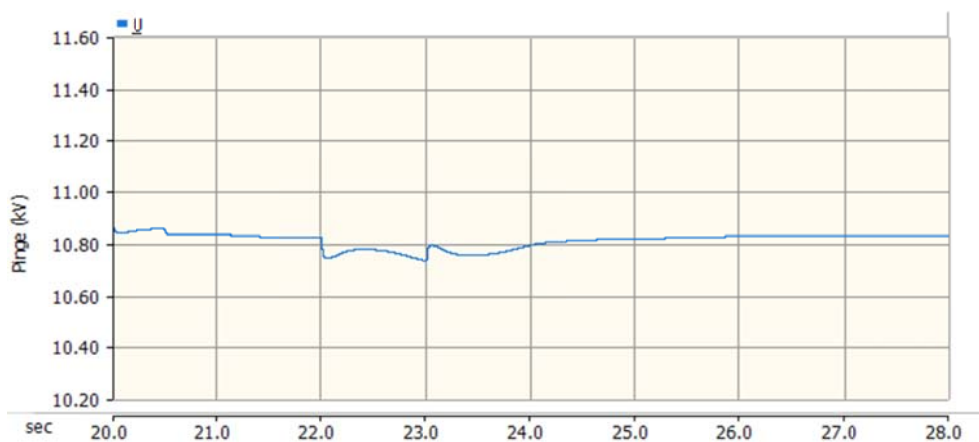


Joonis 8.16. Vigala alajaama faasidevaheline pinge kontaktliini lühise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Kehtna alajaama

Lisaks ülekandevõrgu alajaamade latipingetele vaadeldakse elektriraudtee kontaktvõrgu lühise mõju ka ülekandevõrgu lõunaosas Metsakombinaadi alajaama ühendatud Pärnu Elektri- jaama generaatori talitlusele. Kontaktvõrgu lühisest tingitud pingelohk Metsakombinaadi alajaamas on 1,12 kV, vastavalt joonisele 8.17. Antud pingelohk on niivõrd väike, et ei mõjuta oluliselt generaatori lattide väljundpinge väärtust, vastavalt joonisel 8.18 toodule.



Joonis 8.17. Metsakombinaadi alajaama faasidevaheline pinge kontaktliini lühise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Kehtna alajaama



Joonis 8.18. Pärnu Elektri jaama generaatori väljundpinge kontaktliini lühise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Kehtna alajaama

Ka joonisel 8.19 toodud generaatori faasinurga graafik kinnitab, et Kehtna alajaama liitumispunkti korral ei põhjusta kontaktvõrgus aset leidev lühis häiringuid Metsakombinaadi alajaama ühendatud generaatori talitluses ning generaator säilitab oma stabiilse talitluse.

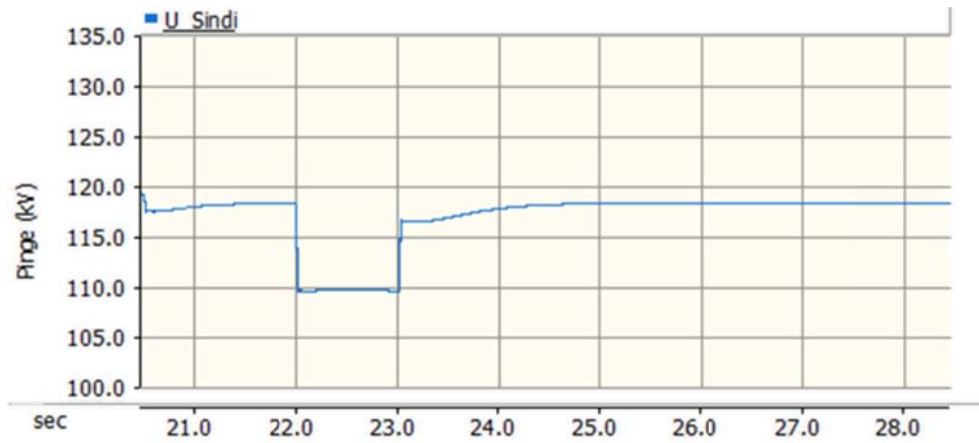
Saadud tulemustest järeldub, et elektriraudtee koormuse liitumisel Kehtna alajaamas ning kontaktvõrgu lühisetalitluse juures ei kaasne märgatavaid mõjusid Metsakombinaadi alajaama ühendatud Pärnu Elektri jaama generaatori talitluses.

8.3 Sindi liitumispunkt

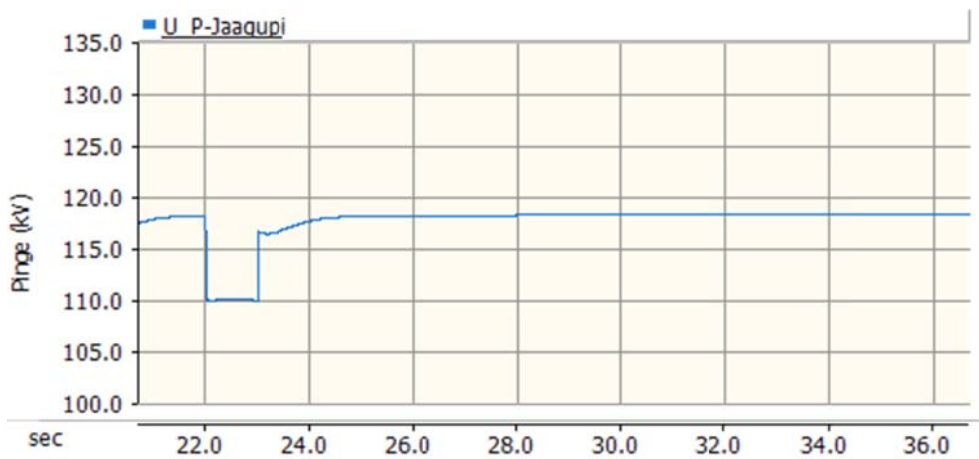
Järgnevalt vaatleme elektriraudtee koormuse liitumispunktina ülekandevõrgu lõunaosas Sindi alajaama. Elektriraudtee kontaktvõrgu lühisest tingitud pingelohkude väärtused ülekandevõrgu alajaamade lattidel on toodud tabelis 8.3. Suurim pingelohk tekib liitumispunkti Sindi alajaamas, kus pinge väärtus langeb 8,53 kV võrra ehk 7,23%, saavutades alajaama lattidel mi-

nimaalseks väärtuseks 109,65 kV. Sindi alajaama faasidevahelise pinge graafikut kontaktvõrgu lühise korral kajastab joonis 8.21. Lisaks Sindi alajaamale tekib samas suurusjärgus pingelohk veel Pärnu-Jaagupi (joonis 8.22), Suure-Jaani (joonis 8.23), Papiniidu, Kabli, Paikuse ja Metsakombinaadi (joonis 8.24) alajaamades.

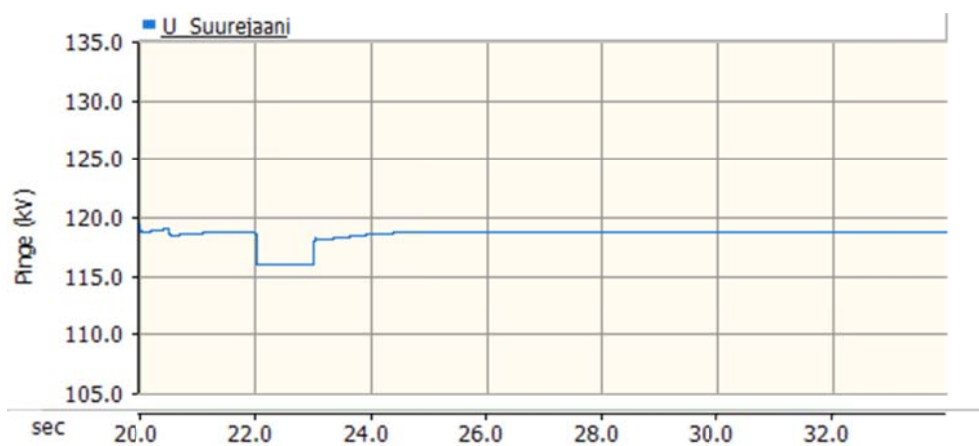
Tabel 8.3. Pingelohk alajaama lattidel kontaktvõrgu lühise korral, liitumispunkt Sindi alajaam



Joonis 8.21. Sindi alajaama faasidevaheline pinge kontaktliini lühise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Sindi alajaama



Joonis 8.22. Pärnu-Jaagupi alajaama faasidevaheline pinge kontaktliini lühise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Sindi alajaama



Joonis 8.23. Suure-Jaani alajaama faasidevaheline pinge kontaktliini lühise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Sindi alajaama

Elektriraudtee kontaktvõrgu lühisest põhjustatud pingelohk Metsakombinaadi alajaama lattidel on 7,42 kV, vastavalt joonisel 4.24 toodule. Antud pinge väärtuse langus avaldab mõju ka Metsakombinaadi alajaama lattidel ühendatud Pärnu Elektriijaama generaatorile, mille väljundpinge graafikut lühise ajal kajastab joonis 8.25. Lühisest tingitud generaatori väljundpinge langeb 0,52 kV ehk 4,84% võrra, saavutades minimaalseks pinge väärtuseks 10,22 kV. Lühise möödumisel taastub generaatori talitus lühise eelne olukorrale. Generaatori stabiilset talitlust kinnitab ka joonisel 8.26 toodud generaatori faasinurga graafik.

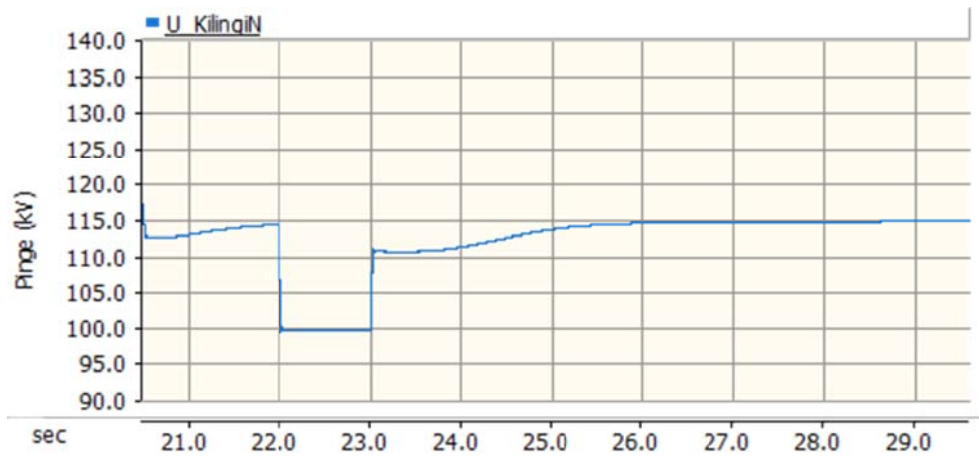
Saadud tulemuste põhjal selgub, et elektriraudtee liitumisel Sindi alajaama ning kontaktvõrgus toimuva lühisega ei kaasne olulisi talituslikke häiringuid Metsakombinaadi alajaama ühendatud Pärnu Elektriijaama generaatorile.

8.4 Kilingi-Nõmme liitumispunkt

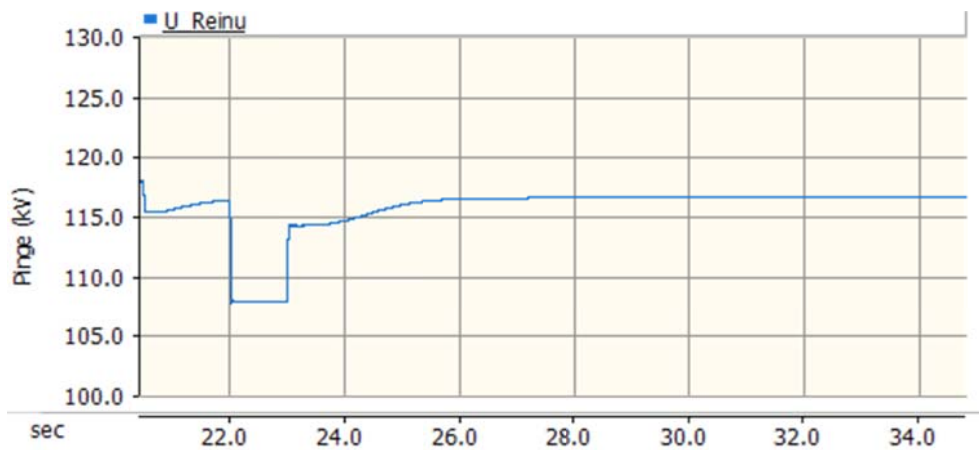
Järgnevalt vaatleme elektriraudtee liitumispunktina ülekandevõrgu lõunaosas Kilingi-Nõmme alajaama. Elektriraudtee kontaktvõrgu lühise korral ülekandevõrgu alajaamade lattidel tekkivad pingelohkudel väärtused on toodud tabelis 8.4. Liitumispunkti Kilingi-Nõmme alajaamas tekkiv pingelohk on suurim 14,69 kV ja pinge alajaama lattidel langeb lühise ajal väärtuseni

99,42 kV. Seega langeb kontaktvõrgu lühise korral liitumispunkti Kilingi-Nõmme alajaama latipinge 12,87% võrra. Kilingi-Nõmme alajaama faasidevahelise pinge graafikut kontaktvõrgu lühise korral kajastab joonis 8.28. Lisaks Kilingi-Nõmme alajaamale on võrdlemisi suurt pinge langust näha ka Reinu (joonis 8.29), Viljandi (joonis 8.30), Kabli ja Suure-Jaani alajaamade lattidel.

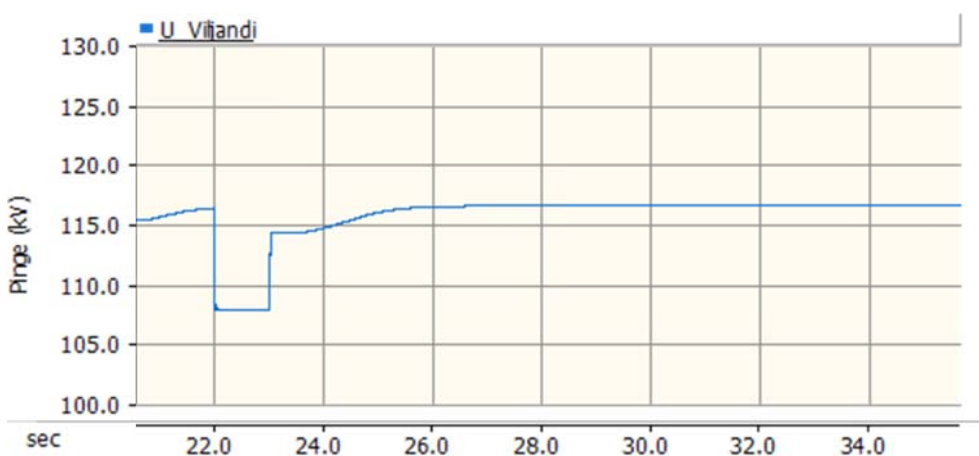
Tabel 8.4. Pingelohk alajaama lattidel kontaktvõrgu lühise korral, liitumispunkt Kilingi-Nõmme alajaam



Joonis 8.28. Kilingi-Nõmme alajaama faasidevaheline pinge kontaktliini lühise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Kilingi-Nõmme alajaama



Joonis 8.29. Reinu alajaama faasidevaheline pinge kontaktliini lühise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Kilingi-Nõmme alajaama



Joonis 8.30. Viljandi alajaama faasidevaheline pinge kontaktliini lühise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Kilingi-Nõmme alajaama

Elektriraudtee kontaktvõrgu lühise korral väheneb pinge väärtus Metsakombinaadi alajaama lattidel vastavalt joonisel 8.31 toodule 3,41 kV võrra. Sellest tulenevalt ilmneb ka Metsakombinaadi alajaama lattidele ühendatud Pärnu Elektriijaama generaatori väljundpinges pingelohk väärtusega 0,23 kV ehk 2,14%, mistõttu vastavalt joonisele 8.32 generaatori pinge lühise ajal langeb väärtusele 10,53 kV.

ektriraudte

Saadud tulemustest järeldub, et elektriraudtee koormuse liitumisel Kilingi-Nõmme alajaama ning kontaktvõrgus aset leidava lühise korral ei kaasnevad märkimisväärsed mõjusid Metsa-kombinaadi alajaama ühendatud Pärnu Elektriijaama generaatori talitlusele.

8.5 Kokkuvõte

Antud peatükis analüüsiti elektriraudtee kontaktvõrgus toimuva lühise mõjusid ülekandevõrgu alajaama latipingetele ning ülekandevõrgu ühendatud generaatorite talitlusele. Kontaktvõrgu lühisekohana käsitleti veoalajaama vahetut lähedust, kus trafo lattidel toimub ühefaasiline lühis kestvusega 1 sekund. Lühisega kaasnevaid mõjusid vaadeldi kõigi nelja elektriraudtee

liitumispunkti põhjaosas Järveküla ja lõunaosas Kehtna, Sindi ning Kilingi-Nõmme alajaamade juures. Analüüsi elektriraudtee kontaktvõrgus toimuvast lühisest tingitud pingelohku ülekandevõrgu alajaamade lattidel, kui ka mõju ülekandevõrgu Iru ja Metsakombinaadi alajaama lattidele ühendatud generaatorite talitlusele.

Elektriraudtee kontaktvõrgu lühisega kaasneb suurim pingelohk liitumispunkt alajaama lattidel, mis sõltuvalt võrgu konfiguratsioonist ja selle elektrilisest tugevusest kandub edasi ka teistesse ülekandevõrgu alajaamadesse. Ülekandevõrku edasi kanduvad mõjud on kõige väiksemad ülekandevõrgu põhjaosas, kus elektriraudtee liitumispunktiks on Järveküla alajaama. Antud juhul on liitumispunktis tekkiv pingelohk 10,37 kV, mis kandub edasi teistesse ülekandevõrgu alajaamadesse suurusjärgus 3-5 kV.

Kontaktvõrgu lühisest tingitud suurim pingelohk liitumispunkti alajaamas tekib elektriraudtee koormuse liitumisel ülekandevõrgu lõunaosas Kehtna alajaama, kus tekkiva pingelohu väärtus ulatub 20,57 kV-ni. Kilingi-Nõmme alajaama liitumispunkti korral võis täheldada aga madalaimat alajaama latipinget lühise ajal, väärtusega 99,42 kV, kusjuures lühisest tingitud pingelohu väärtuseks on liitumispunkti Kilingi-Nõmme alajaamas 14,69 kV. Ülekandevõrgu lõunaosas tekkis kontaktvõrgu lühisest väiksem pingelohk Sindi alajaama liitumispunkti korral, väärtusega 8,53 kV.

Kontaktvõrgu lühisest tingitud mõjud ülekandevõrku ühendatud generaatorite talitlusele märkimisväärseid probleeme ei tekita. Ülekandevõrgu põhjaosas Iru alajaama ühendatud generaatorite korral on kontaktvõrgu lühise ajal suurimaks generaatori pinge väärtuse languseks 0,62 kV Vao alajaama generaatori G1 väljundpinges. Ülekandevõrgu pingeasümmeetriast tingitud mõjud avalduvad kontaktvõrgu lühisetalitlusel kõige tugevamalt aga Iru Elektriijaama generaatoril, kus generaatori voolu vastujärgnevuskomponent saavutab väärtuseks 20,12%.

Elektriraudtee kontaktvõrgu lühise korral ülekandevõrgu lõunaosas Metsakombinaadi alajaama ühendatud Pärnu Elektriijaama generaatori väljundpinges tekkiv pinge väärtuse langus on suurim elektriraudtee koormuse liitumisel Sindi alajaamas, kus generaatori väljundpinge väärtus langeb 0,52 kV võrra. Ühtlasi on ka ülekandevõrgu pingeasümmeetriast tulenev mõju kontaktvõrgu lühisetalitluse korral suurim Pärnu Elektriijaama generaatorile Sindi liitumispunkti korral, kus generaatori voolu vastujärgnevuskomponent saavutab lühise ajal väärtuseks 22,78%. Ülekandevõrgu lõunaosas on kontaktvõrgu lühisest tingitud mõjud Pärnu Elektriijaama generaatorile väikseimad aga Kehtna liitumispunkti korra. Viimasel juhul ei avalda lühis mõju generaatori väljundpinge väärtusele ning generaatori voolu vastujärgnevuskomponendi maksimaalseks väärtuseks on 3,49%.

Tehtud analüüside põhjal on kontaktvõrgu lühisetalitlusel ülekandevõrgu alajaamadesse edasi kanduvad mõjud suurimad Kehtna ja Kilingi-Nõmme liitumispunktide korral. Kehtna liitumispunkti juures on kontaktvõrgu lühisest tungitud pingelohk liitumispunkti alajaama lattidel suurim ning Kilingi-Nõmme liitumispunkti korral langeb alajaama latipinge lühise ajal kõige madalama väärtuseni. Kontaktvõrgu lühisega ei kaasne aga märkimisväärseid ja püsivaid talitlushäiringuid Iru ja Metsakombinaadi alajaama ühendatud generaatoritele.

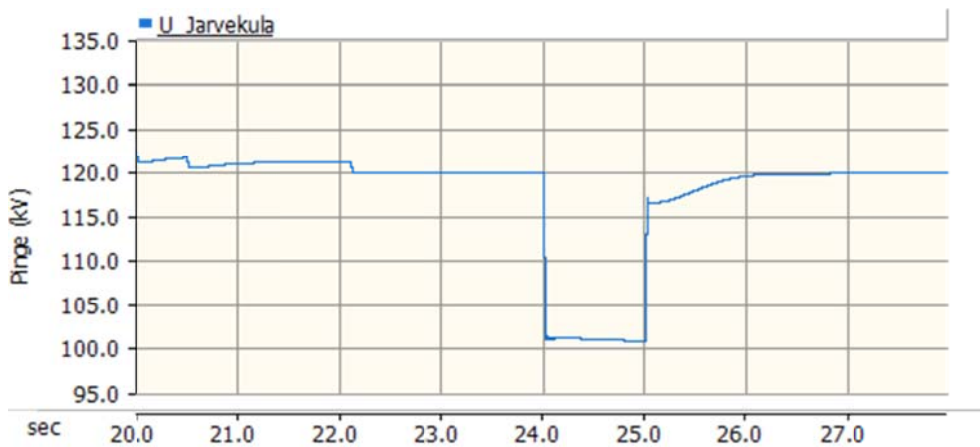
9. Täiendavad ülekandevõrgu ja elektriraudtee kontaktvõrgu rikketalitluse juhtumid

9.1 Järveküla liitumispunkt

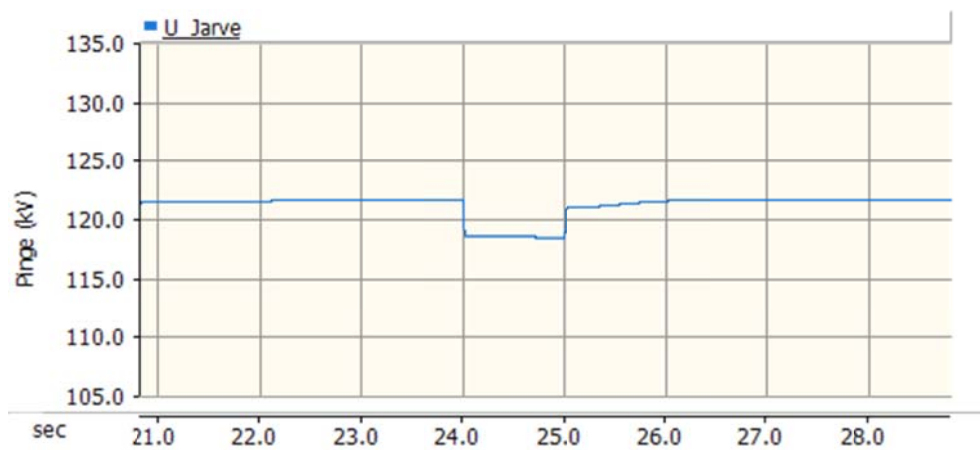
Järgnevalt analüüsitakse täiendavaid juhtumeid ülekandevõrgu konfiguratsioonimuutuse (N-1 kriteeriumi) ja samaaegse elektriraudtee kontaktvõrgu lühisetalitluse korral. Ülekandevõrgu põhjaosas elektriraudtee koormuse ühendamisel Järveküla alajaama liitumispunkti osutus kõige enam mõju omavaks konfiguratsiooni muutuseks liini 006B Järve-Järveküla välja lülitamine. Seega vaadeldakse juhtumit, kus elektriraudtee koormuse liitumisel Järveküla alajaamas simulatsiooni 22. sekundil toimub liini 006B välja lülitamine, millele 24. sekundil järgneb lühis elektriraudtee kontaktvõrgus.

Kontaktvõrgus toimuva lühise ja samaaegselt ülekandevõrgu liini 006B toitekatkestuse korral alajaamade lattidel avalduvad pingelohkude väärtused on toodud tabelis 9.1. Liitumispunkti Järveküla alajaama latipinge väärtus langeb 20,29 kV ehk 16,76% võrra, saavutades pinge väärtuseks kontaktvõrgu lühise ajal 100,78 kV. Antud pingelohk joonisel 9.1 on peaaegu kaks korda suurem kui eespool jaotise 8.1 käsitletud juhtumi korral tabelis 8.1 toodud, kus vaadeldi vaid kontaktvõrgu lühisetalitlust. Võrreldes tabelis 9.1 ja 8.1 väärtusi on näha kuidas täiendav ülekandevõrgu liini 006B toitekatkestus omab erinevat mõju ülekandevõrgu alajaamades tekkivale pingelohule kontaktvõrgu lühisetalitlusel. Joonisel 9.2 toodud Järve alajaama pingelohk on antud juhtumi juures 3,05 kV, olles väiksem kui tabelis 8.1 ja joonisel 8.2 toodud. Iru alajaama lattidel liini 006B välja lülitamisel ja kontaktvõrgu lühise korral tekkiv pingelohk on aga väärtusega 6,41 kV (joonis 9.3), mis on mõnevõrra suurem kui jaotises 8.1 saadud tulemus.

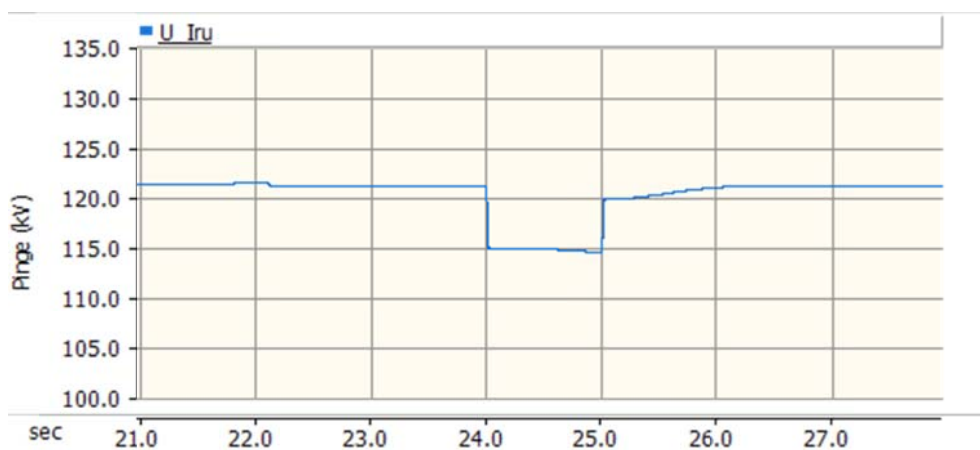
Tabel 9.1. Pingelohk alajaama lattidel kontaktvõrgu lühise ja liini 006B välja lülitamisel, liitumispunkt Järveküla alajaam



Joonis 9.1. Järveküla alajaama faasidevaheline pinge kontaktliini lühise ja liini 006B välja lülitamise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Järveküla alajaama



Joonis 9.2. Järve alajaama faasidevaheline pinge kontaktliini lühise ja liini 006B välja lülitamise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Järveküla alajaama



Joonis 9.3. Iru alajaama faasidevaheline pinge kontaktliini lühise ja liini 006B välja lülitamise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Järveküla alajaama

Lisaks ülekandevõrgu alajaamades tekkivale pingelohule vaadeldakse täiendava juhtumi mõjusid ka Iru alajaama lattidele ühendatud Iru Elektriijaama generaatorile. Ülekandevõrgu liini 006B toitekatkestusel ja samaaegselt elektriraudtee kontaktvõrgus toimuva lühise mõju Iru Elektriijaama generaatorile kirjeldab joonisel 9.4 toodud generaatori väljundpinge graafik. Generaatori pinge langeb lühise ajal 0,65 kV ehk 6,06% võrra, saavutades väljundpinge väärtuseks 10,08 kV. Antud pinge langus on mõnevõrra suurem kui jaotises 8.1 kajastatud juhtumi juures. Vastavalt joonisel 9.5 toodud generaatori faasinurga graafikule ei kaasne aga täiendava juhtumiga suuremaid mõjusid Iru Elektriijaama generaatori talitlusele.

Joonis 9.6 kirjeldab ülekandevõrgu pingesümmeetriast tulenevalt mõju Iru Elektriijaama generaatori talitlusele olukorras, kus lisaks liini 006B välja lülitamisele toimub samaaegselt lühis elektriraudtee kontaktvõrgus. Generaatori voolu vastujärgnevuskomponent saavutab antud konfiguratsiooni juures kontaktvõrgu lühise ajal väärtuseks 24,73%, mis on samas suurusjärgus kui jaotises 8.1 saadud 20,12% tulemusega.

Jooni lektriijaama generaatori voolu vastujärgnevuskomponent kontaktliini liini 006B välja lülitamise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Järveküla alajaama

Saadud tulemustest järeldub, et Järveküla alajaama liitumispunkti korral viimase lattidel kontaktvõrgu lühisest tingitud pingelohk suureneb peaaegu kahe korra kui lisaks kontaktvõrgu lühisele leiab ülekandevõrgus aset ka konfiguratsiooni muutus, kus liin 006B lülitatakse välja. Vastavalt võimsusvoogude jagunemisele ülekandevõrgu konfiguratsiooni muutusel, on pingesümmeetria suurenemist ja mõnel juhu ka vähenemist näha ülekandevõrgu teisteski alajaamades. Suurim mõju antud täiendaval juhtumil on siiski liitumispunkti Järveküla alajaamas.

Sarnaselt alajaama lattidel tekkiva pingelohu väärtusele mõjutab antud täiendav juhtum ka Iru alajaama lattidele ühendatud generaatori väljundpinges tekkivat pinget väärtuse langust kontaktvõrgu lühisetalitluse korral, kus täiendava juhtumi juures on tekkiv pingelohk mõnevõrra suurem. Kontaktvõrgu lühise ja samaaegselt ülekandevõrgu liini 006B välja lülitamisega ei kaasne aga olulist suurenemist generaatori voolu vastujärgnevuskomponendi väärtuses.

9.2 Kehtna liitumispunkt

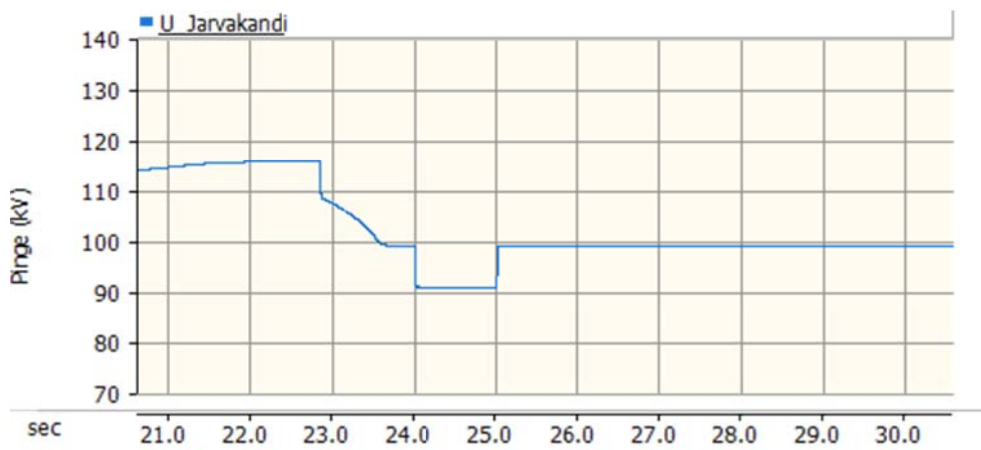
Sarnast täiendavat juhtumit vaadeldakse ka ülekandevõrgu lõunaosas elektriraudtee liitumisel Kehtna alajaama. Simulatsiooniperioodi 22. sekundil toimub liini 025 Rapla-Kehtna välja lülitamine, millele 24. sekundil lisandub kontaktvõrgus toimuv lühis. Täiendava juhtumi korral ülekandevõrgu alajaamades elektriraudtee kontaktvõrgu lühise ajal tekkivad pingelohkude

väärtused on toodud tabelis 9.2. Liitumispunkti Kehtna alajaama latipinge väheneb 27,21 kV ehk 23,64% võrra vastavalt joonisele 9.7, kus kontaktvõrgu lühise ajal on alajaama latipinge väärtuseks vaid 87,90 kV. Võrreldes vaid kontaktvõrgu lühise korral avaldunud pingelohule 20,57 kV (jaotise 8.2 tabelis 8.2) selgub, et täiendav ülekandevõrgu konfiguratsiooni muutus suurendab mõnevõrra tekkiva pingelohu väärtust. Kõige enam mõjutab aga täiendav juhtum Järvakandi alajaama, kus tekkiv pingelohk suureneb peaaegu kaks korda (joonis 9.8). Lisaks on täiendava juhtumiga suurenevat pingelohku märgata teisteski ülekandevõrgu alajaamades, näiteks Valgu (joonis 9.9) ja Vigala (joonis 9.10) alajaamades. Nii mõneski alajaamas aga tulenevalt liini 025 välja lülitamisel võimsusvoogude jagunemisest pinge väärtus alajaama lattidel aga kasvab, näiteks Rapla ja Kohila alajaamades.

Tabel 9.2. Pingelohk alajaama lattidel kontaktvõrgu lühise ja liini 025 välja lülitamisel, liitumispunkt Kehtna alajaam



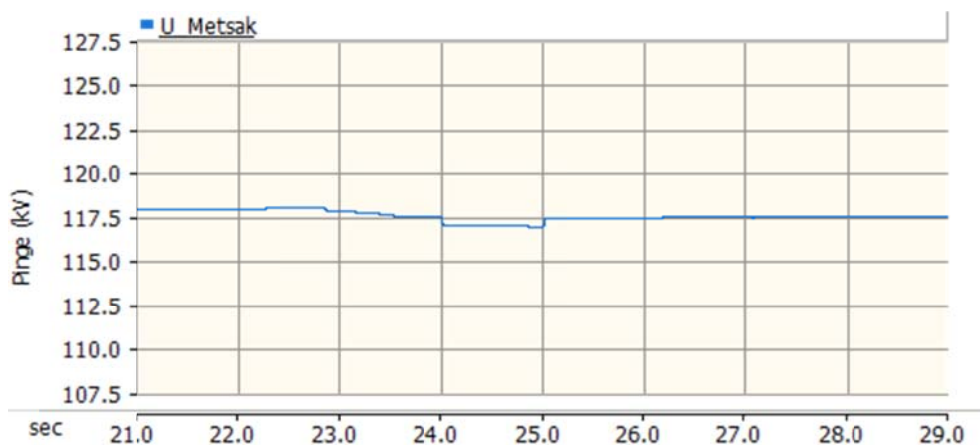
Joonis 9.7. Kehtna alajaama faasidevaheline pinge kontaktliini lühise ja liini 025 välja lülitamise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Kehtna alajaama



Joonis 9.8. Järvakandi alajaama faasidevaheline pinge kontaktliini lühise ja liini 025 välja lülitamise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Kehtna alajaama

Joonis 9.10. Vigala alajaama faasidevaheline pinge kontaktliini lühise ja liini 025 välja lülitamise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Kehtna alajaama

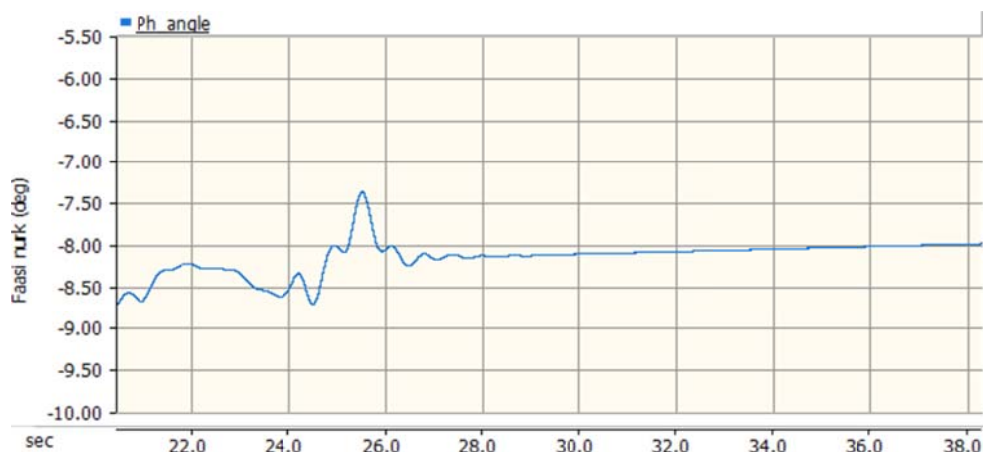
Lisaks ülekandevõrgu alajaamades tekkivale pingelohule vaadeldakse täiendava juhtumi mõjusid ka Metsakombinaadi alajaama lattidele ühendatud Iru Elektriijaama generaatorile. Võrreldes jaotises 8.2 tabelis 8.2 ja antud juhtumi juures tabelis 9.2 toodud Metsakombinaadi alajaama lattidel tekkivat pinge langust selgub, et kontaktvõrgu lühisele täiendavalt liini 025 välja lülitamisel Metsakombinaadi alajaama lattidel lühise ajal tekkiv pingelohk väheneb väärtuselt 1,12 kV väärtusele 0,97 kV (joonis 9.11). Sellest tulenevalt võib eeldada, et täiendava juhtumiga kaasnevad mõjud ka Metsakombinaadi alajaama ühendatud Pärnu Elektriijaama generaatorile on väiksemad.



Joonis 9.11. Metsakombinaadi alajaama faasidevaheline pinge kontaktliini lühise ja liini 025 välja lülitamise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Kehtna alajaama

Ülekandevõrgu liini 025 toitekatkestusel ja samaaegselt elektriraudtee kontaktvõrgus toimuva lühise mõju Iru Elektriijaama generaatorile kirjeldab joonisel 9.12 toodud generaatori väljundpinge graafik. Antud jooniselt ei ole näha generaatori pingele avalduvaid mõjusid. Ka vasta-

Joonis 9.12. Pärnu Elektriijaama generaatori väljundpinge kontaktliini lühise liini 025 välja lülitamise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Kehtna alajaama



Joonis 9.13. Pärnu Elektriijaama generaatori faasinurk kontaktliini lühise liini 025 välja lülitamise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Kehtna alajaama

Joonis 9.14 kirjeldab ülekandevõrgu pingeasümmeetriast tulenevalt mõju Iru Elektriijaama generaatori talitlusele olukorras, kus lisaks liini 025 välja lülitamisele toimub samaaegselt lühis elektriraudtee kontakivõrgus. Generaatori voolu vastujärgnevuskomponent saavutab antud konfiguratsiooni juures kontakivõrgu lühise ajal väärtuseks 3,05%, mis on samas suurusjärgus kui jaotises 8.2 saadud 3,49% tulemusega.

Saadud tulemustest järeldub, et Kehtna alajaama liitumispunkti korral viimase lattidel kontaktvõrgu lühisest tingitud pingelohk suureneb mõnevõrra kui lisaks kontaktvõrgu lühisele leiab ülekandevõrgus aset ka konfiguratsiooni muutus, kus liin 025 lülitatakse välja. Vastavalt võimsusvoogude jagunemisele ülekandevõrgu konfiguratsiooni muutusel, on pingesümmeeria suurenemist ja mõnel juhul ka vähenemist näha ülekandevõrgu teisteski alajaamades, kus suurim mõju avaldub Järvakandi alajaama. Antud juhtumi juures tuleb silmas pidada, et ülekandevõrgu talitluse seisukohast on selline olukord lubamatu kuna nii liitumispunkti Kehtna alajaamas kui ka teistes ümberkaudsetes alajaamades langeb pinge väärtus alla kriitilise piiri. Sellest tulenevalt on tarvis tõsta liinide võimekust või rakendada parendavaid meetmeid.

Antud täiendava juhtumiga ei kaasne aga lisanduvaid mõjusid Metsakombinaadi alajaama ühendatud Pärnu Elektriijaama generaatori talitlusele.

10. Pingeasümmeetriat parendavad meetmed ja nende mõjude analüüs

Vahelduvvoolulul (AC) nimipingega 25 kV ja 50 Hz sagedusel talitlevad elektriraudtee toitesüsteemid on enamasti ülekandevõrku ühendatud läbi traditsioonilise ühefaasilise trafoühenduse veoalajaamades, kus kolmefaasiline ülekandesüsteemi toitepinge edastatakse elektriraudtee kontaktliini ühefaasilisse süsteemi. Koormates seeläbi ülekandevõrku asümmeetriliselt ning põhjustades ülekandevõrgus pingeasümmeetriat. Elektriraudtee kontaktvõrkudes kasutusel olevaid klassikalisi toitesüsteeme kirjeldatakse põhjalikumalt [2] ning uudseid konverteritel põhinevaid toitesüsteeme käesoleva aruande peatükis 5.

Tavapärastelt on elektriraudtee koormusest põhjustatud elektri kvaliteediprobleemid, sealhulgas pingeasümmeetria, lahendatud ülekandevõrgu elektrilise tugevuse suurendamise läbi. Tehnilisest küljest lähtudes pole antud meetodi rakendamine aga alati võimalik ja majanduslikult küljest põhjendatud. Seega tuleb kasutusele võtta alternatiivseid lahendusi, milleks on jõuelektroonikal põhinevate seadmete rakendamine elektriraudtee toitesüsteemides. Ülekandevõrgu pingeasümmeetria vähendamiseks kasutatakse türistoridega juhitavatel kondensaatoritel (*TSC*) ja reaktoritel (*TCR*) põhinevaid staatilisi reaktiivvõimsuse kompenseerimise seadmeid (*SVC - Static Var Compensator*) või juhitavatel pingesallikatel (*VSC*) põhinevaid STATCOM seadmeid. Eritüüpi trafoühendustega (nt *Scott-* või *V*-ühendusega trafod) liitunud elektriraudtee korral on võimalik rakendada kahe kontaktvõrgu faasi vahele ühendatud *RPC (Railway Static Power Conditioner)* seadet, mis läbi kahe faasi koormuse ühtlustamise võimaldab kompenseerida ülekandevõrgus tekkivat pingeasümmeetriat. Tegemist on *back-to-back* tüüpi alalisvooluühendusega (*DC*), mis lisaks elektriraudtee koormuse ühtlustamisele võimaldab ka reaktiivenergia kompenseerimist ja harmoonikute taseme ning pinge värelyse vähendamist [15]. *RPC* talitluse lühiülevaade on toodu peatükis 5.

Türistoridega juhtivate kondensaatorite ja reaktorite omadustest tulenevalt leiavad *SVC* seadmed laialdast kasutust elektriraudteest põhjustatud pingeasümmeetria kompenseerimisel. Kirjanduses enim toodud *SVC* lahendusel põhinev näide on projekti *Channel Tunnel Rail link* [33] raames ehitatud kompenseerimiseseade, mille põhimõtteline skeem on toodud joonisel 10.1. Tulenevalt elektriraudtee koormuse aeglastest siirdeprotsessidest võrreldes türistori lülitamissagedusega (üks lülitus poolperioodi kohta), saavutavad *SVC* kompensaatorid häid tulemusi elektriraudtee koormusest tingitud pingeasümmeetria kompenseerimisel, kus võimalikus osutub väiksema kui 0,1% pingeasümmeetria saavutamise ülekandevõrgus [33]. Pinge-

asümmeetria kompenseerimiseks peab SVC olema paigaldatud kolmnurkühenduses, võimaldamaks aktiivvõimsuse kulgemist vähem koormatud faasidest enam koormatud faasi. Lisaks pingeasümmeetriale võimaldab SVC samaaegselt ülekandevõrgu pinge reguleerimist. Tulenevalt türistoride omadustest ei ole aga SVC põhiste seadmetega võimalik kompenseerida elektriraudtee poolt põhjustatud harmoonikuid ja kiiretoimelisi muutusi.

Joonis 10.1. Channel Tunnel Rail link SVC kompenseerimisseadme põhimõtteskeem [33]

SVC tehnoloogia peamine eelis uuemate VSC-l põhinevate lahendustega on nende suurem võimsus [33]-[34]. SVC üheks oluliseks puuduseks on aga nende passiivelementidele põhinemine, mistõttu on seadmed suured ja vajavad madalast lülitussagedusest tingituna suure võimsusega filtreid.

VSC tehnoloogial põhinevad STATCOM kompensaatorid on võrreldes SVC enam juhtivad, tulenevalt nende kõrgemast lülitussagedusest. Kompensaatori juhtimissüsteem võimaldab erikujuliste väljundpingete koostamist, mistõttu osutub lisaks pingeasümmeetria kompenseerimisele võimalikuks ka harmoonikute ja pinge väreluse kompenseerimine [34]. Tulenevalt kõrgemast lülitussagedusest väljastab VSC kõrgemaid harmoonikuid. Silumisreaktori ja ühendustrafo induktiivsus piiravad oluliselt väljastatavaid harmoonikuid, mistõttu on VSC tehnoloogial põhinevad STATCOM-i rakendamisel võimalik kasutada väiksemaid filtreid. Joonis 10.2 kajastab Evron projekti näitel STATCOM-il põhineva kompenseerimisseadme skeemi. STATCOM-i eeliseks võrreldes SVC-ga on seadme kompaktsus, paremad reguleerimise võimalused ja väiksem elementide arv. STATCOM-i peamiseks puuduseks võrreldes SVC-ga, on aga nende väiksem võimsus [33]-[34]. Vastavalt allikale [34] on ± 16 Mvar

STATCOM-i hind konkurentsivõimeline enam kui 10 km pikkuse 90 kV õhuliini ehitamisega.

Joonis 10.2. Evron STATCOM kompenseerimisseadme põhimõtteskeem [34]

10.1 STATCOM-i PSCAD mudel

Elektriraudtee koormuse ülekandevõrku ühendamisel kaasnevate mõjude parendamisel on üheks võimalikuks lahenduseks elektriraudtee liitumispunktis koormusega paralleelselt ühendatud STATCOM kompenseerimisseadme rakendamine. Järgnevalt kirjeldatakse uurimistöö raames koostatud STATCOM-i *PSCAD* mudelit.

Käesolevas projektis vaadeldakse kõige elementaarsemat STATCOM-i lahendust, mis koosneb pingel 10 kV talitlevast kaheastmelisest ja 6-pulsilisest ideaalsest inverterist, silumisreaktorist, harmoonikute filtrist ja jõutrafoost. Antud lahendus on piisav pingeasümmeetria kompenseerimise põhimõtete illustreerimiseks ja juhitavatel pingeallikatel põhinevate inverterite kasulike mõjude kirjeldamiseks, kus tehtud järeldusi on võimalik üle kanda ka keerulisemate inverterite ehituste korral. Projekti raames *PSCAD* tarkvaras koostatud STATCOM-i mudel on toodud joonisel 10.3.

Joonis 10.3. PSCAD tarkvaras koostatud STATCOM-i mudel

STATCOM-i mudeli elektriliste parameetrite valikul on ühe inverteeri maksimaalseks koormuseks määratud 30 MVA, mille alusel on valitud silumisreaktori ja alalisvoolu kondensaatori suurused. Liinidevahelisest ühendusest tingitud pingesümmeetria kompenseerimiseks läbivad inverteeri faase elektriraudtee koormusvood, millega füüsiliselt muudetakse ühefaasiline koormus ülekandevõrgu tarbeks kolmefaasiliseks sümmeetriliseks koormuseks. Tulenevalt inverteeri tööpõhimõttest on lühiajaliselt vajalik ühest faasist teise siirduva aktiivvõimsuse salvestamine alalisvoolu kondensaatoris kahe lülitusimpulsivaheliseks perioodiks, mistõttu kasutatakse pingesümmeetriat kompenseerimiseks rakendavate STATCOM-ide puhul tüüpilisest suuremaid alalisvoolu kondensaatoreid. Lülitamistest põhjustatud kõrgemate harmoonikute eemaldamiseks on mudelisse lisatud *PSCAD* standardne „*High Pass Filter*“, mille seadistamisel on arvesse võetud, et harmoonikute kogu moonutus filtri ja trafo vahel on väiksem kui 1%.

Joonisel 10.4 on toodud STATCOM-i juhtimiseks välja töötatud juhtimissüsteemi mudel, mis koosneb kolmest faasipinge individuaalselt juhitavast kontrollierist ja ühest sümmeetriliselt talitlevast alalisvoolu kondensaatori pinget juhtivast kontrollierist.

Välja töötatud juhtimissüsteem arvutab 110 kV ülekandevõrgu liinipingete põhiharmooniku efektiivväärtuste põhjal pingesümmeetria kompenseerimiseks vajaliku individuaalsete faaside reaktiivvõimsuste vahekorra, muutes seeläbi faaside nihkenurgad sümmeetriliseks. Sümmeetria saavutamisel faasipingete nihkenurkades muutub ülekandevõrgu koormusvoogude jagunemine ja aktiivvõimsus liigub läbi STATCOM-i inverteri vähem koormatud faasidest enam koormatud faasi, ühtlustades seeläbi kolme faasi vahelist koormust. Tulenevalt aktiivvõimsusvoogude suundadele on summaarne kolmefaasiline aktiivvõimsus inverteri lattidel null. Alalisvoolu pingereguleerimiseks on tarvis sümmeetrilist kontrolleri, mis arvutab nurga inverteri poolt lülitatava ja ülekandevõrgu pingevektorite vahel, tagamaks kolme faasi vahelise sümmeetrilise võimsusvoo inverterisse. Sümmeetrilise aktiivvõimsusega reguleeritakse alalisvoolu kondensaatori pingemuutuseid, mis on põhjustatud kondensaatorit läbivast voolust. Joonisel 10.4 toodud koostatud STATCOM-i juhtimissüsteem võimaldab lisaks pingesümmeetria kompenseerimisele samaaegselt reguleerida ka ülekandevõrgu pinget, juhtides selleks reaktiivvõimsuse sümmeetrilist komponenti induktiivse ja mahtuvusliku talitluse vahel. Ülekandevõrgu pingetuhtimisel on oluline, et faaside vaheline reaktiivvõimsuse vahekord säiliks.

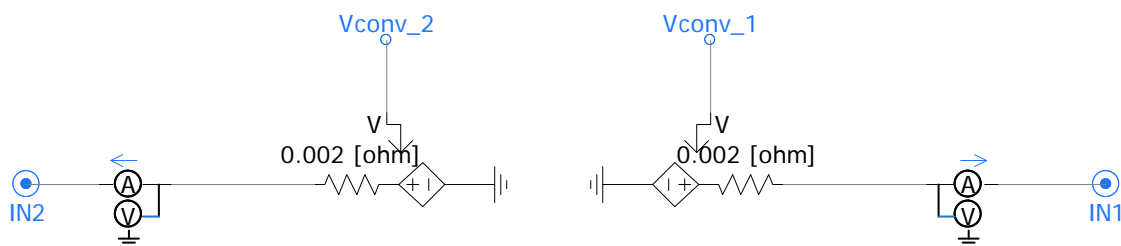
10.2 Scott-trafo ja RPC hübriidlahenduse PSCAD mudel

Järgnevalt kirjeldatakse elektriraudtee koormusest tingitud mõjude parendamiseks kasutatava eritüübilisest *Scott*-trafost ja RPC-st koosneva hübriidlahenduse *PSCAD* tarkvaras koostatud mudelit. Koostatud mudeli põhimõtteskeem on toodud joonisel 10.5.

LP1

Joonis 10.5. *PSCAD* tarkvaras *Scott*-trafo ja RPC hübriidlahenduse põhimõtteskeem

Projekti raames analüüsitava ülekandevõrgu mudeli arvutused on mahukad, mistõttu osutub vajalikuks lihtsustatud RPC *back-to-back* inverteri lihtsustamine, kus inverterit modelleerimiseks kasutatakse kahte standardset ühefaasilist juhitavat pingeallikat. Antud lihtustus on õigustatud, kuna mudelit kasutatakse koormusvoogude jagunemisest tulenevate protsesse analüüsimiseks ülekandevõrgus ja elektriraudtee kontaktvõrgu paikneva inverteeri lühisetalitus ei ole antud juhul oluline. Lühisetalitluste täpsemal vaatlemisel tuleks rakendada inverteri täismudeleid ja juhtimissüsteemi tuleks täiendada vastava lülitusmooduliga. Projekti raames koostatud inverteri lihtsustatud mudel on toodud joonisel 10.6.



Joonis 10.6. *PSCAD* tarkvaras koostatud lihtsustatud RPC *back-to-back* inverteri mudel

Järgnevalt tuleb kirjeldamise joonisel 10.7 toodud RPC seadme juhtimiseks välja töötatud juhtimissüsteem. Juhtimissüsteemis on arvesse võetud *Scott*-trafo omadust, kus sekundaarpoole faaside võrdsel koormamisel avaldub kahe faasi koormus trafo primaarpoolel sümmeetriliseks. Juhtimissüsteemi moodul „*Power Balance Calculator*“ arvutab *Scott*-trafo sekundaarpoole faaside vahelise erinevuse ning RPC konverterit läbiva võimsusvoo väärtuse ja suuna. Seeläbi saavutatakse ülekandevõrgu sümmeetriline kolmefaasiline koormus ning elektriraudtee talitlusega ei kaasne pingesümmeetria ülekandevõrgus. Mooduli poolt arvutatava sätteväärtuste alusel juhitakse inverteri aktiivvõimsuse kontrollerit. Inverteri aktiivvõimsuse kontroller põhineb standardsel *PI* kontrolleril, mis sätteväärtuse alusel arvutab allika ja võrgupinge vahelise nurga vastavalt sätteväärtusega määratud aktiivvõimsusvoole. Sarnaselt aktiivvõimsuse kontrollerile kasutakse ka pingeregulaatori juhtimissüsteemis standardsel *PI* kontrolleril, mis arvutab allika juhtsignaali amplituudväärtuse. Muutes vastavaid sätteväärtusi ja mõõdetavat tagasiside signaali, on võimalik pingeregulaatori ümberseadistamine reaktiivvõimsuse regulaatoriks. Allika juhtsignaali sünkroniseerimiseks võrgupingega kasutatakse *PSCAD*-i standardset „*Voltage Controlled Oscillator*“ mudelit, mille signaali ja regulaatorite väljundite põhjal arvutatakse allika siinuseline juhtsignaal. Inverterite juhtimissüsteemid on koostatud sümmeetriliselt ja samade parameetritega, tagamaks võimsusvoogude sümmeetrilist mõlemas suunas. Lisaks on juhtimissüsteemi mudelisse lisatud ka lühise loogika moodul, mis lühisest tingitud pingelohu sügavuse alusel blokeerib inverteri talitluse lühise perioodil.

Joonis 10.7. RPC juhtimissüsteemi mudel

10.3 Pingeasümmeetriat parendatavate meetmete rakendatavus

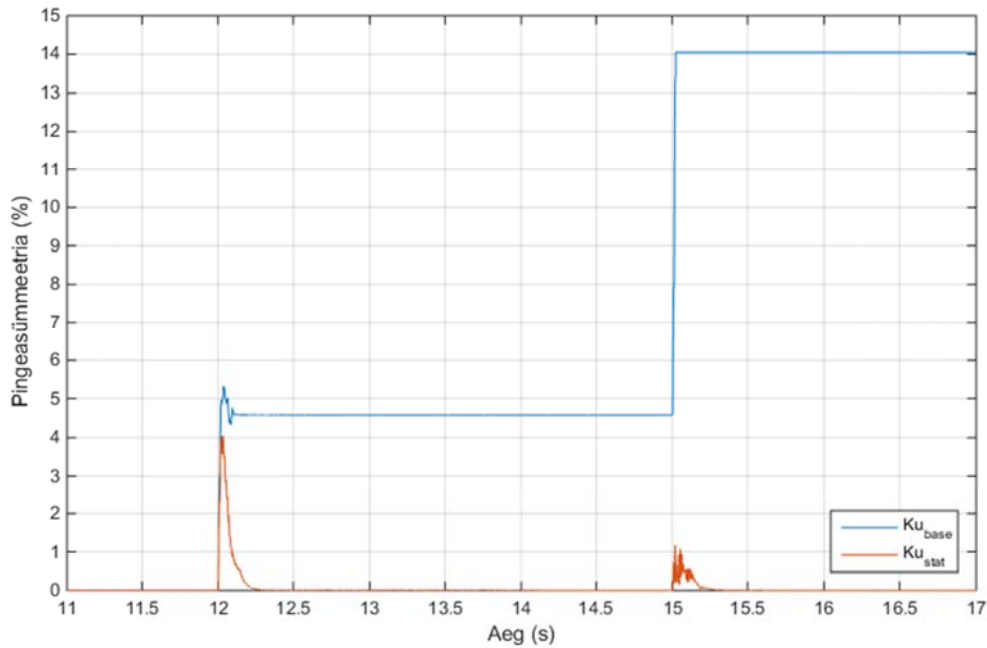
Järgnevalt analüüsitakse elektriraudtee liitumisest tingitud pingeaasümmeetria mõjude parendamise võimalusi. Uurimistöös tehtud analüüside põhjal on selgunud, et elektriraudtee liitumisest tingitud mõjud ja nende ülekandevõrgus edasi kandumine on tihedalt seotud liitumispunkti ja sellele toite tagava ülekandevõrgu osa elektrilisest tugevusest. Peatükis 2 tehtud pingeaasümmeetria taseme hindamised elektriraudtee liitumispunktide Järveküla, Kehtna, Sindi ja Häädemeeste/Nepste alajaamades näitasid, et olemasoleva konfiguratsiooni juures ei ole ülekandevõrgu elektriline tugevus elektriraudtee liitumiseks soovitud võimsusel piisav. Võttes Järveküla alajaamas arvesse võimalikke perspektiivseid plaane [3], osutub tulevikus antud liitumispunktis elektriraudtee mõjude vähendamine läbi elektrivõrgu tugevdamise, alajaama üleviimisel 330 kV nimipingele, võimalikuks. Vastasel korral on vajalik teiste parendavate meetmete rakendamine. Kehtna, Sindi ja Nepste liitumispunktide korral ei ole alajaamade elektrilist tugevust aga võimalik ilma ülekandevõrgus tehtavate ulatuslike konfiguratsiooni muutuste tõsta, mistõttu eeldab elektriraudtee soovitud võimsusel liitumine mainitud alajaamadesse võimalikuks vaid teiste parendavate meetmete rakendamisel.

Järgmiseks käsitletakse võimalike alternatiivsete parendavate meetmete, STATCOM-i ning *Scott*-trafost ja RPC-st koosnevat hübriidlahenduse rakendatavust. Selleks vaadeldakse alajaotises 6.2.4 analüüsitud N-1 juhtumit, kus elektriraudtee koormus liitub Kehtna alajaama ning ülekandevõrgus leiab aset liini 025 välja lülitamine. Antud stsenaariumit võib käsitleda kui ühte halvimat juhtumit kuna Kehtna alajaam kuulub elektriliselt võrdlemisi nõrka ülekandevõrku. Alljärgnevalt toodud graafikutelt on näha kuidas elektriraudtee koormus liitub Kehtna alajaama simulatsiooniperioodi 12. sekundil ning liini 025 välja lülitamine toimub 15. sekundil. Lisaks vaadeldakse täiendavat juhtumit lisanduva elektriraudtee kontakivõrgu lühisetalitlusel. Sellisel juhul leiab simulatsiooniperioodi 18. sekundil kontakivõrgus aset 1 sekundi pikkune lühis.

Tabel 10.1. Pingeasümmeetria Kehtna alajaama liitumispunkti korral parendavate meetmete rakendamisel

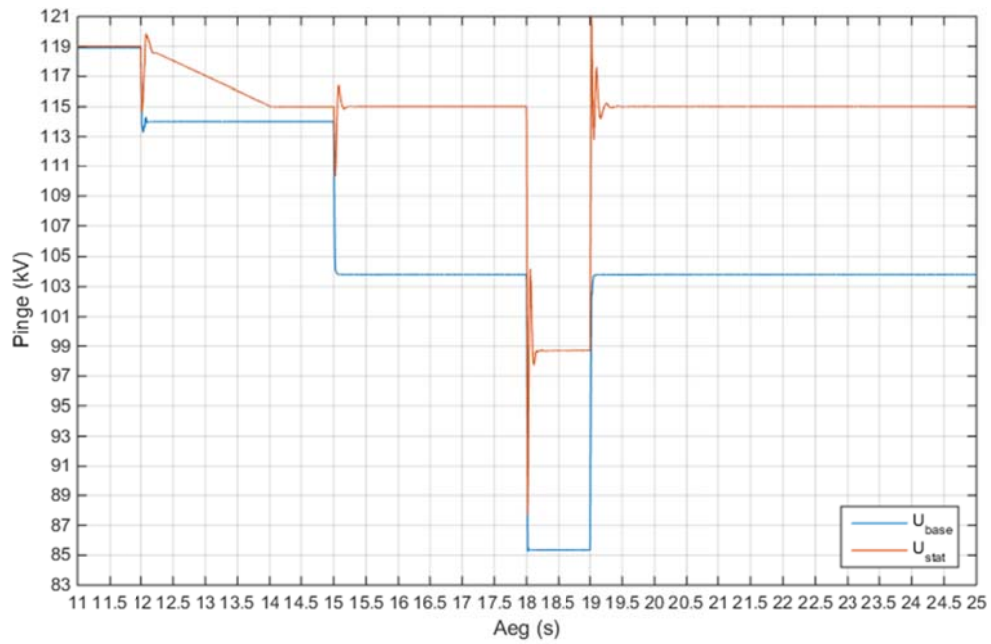
Tabelis 10.1 toodud pingesümmeeria väärtustest on näha kuidas nii STATCOM-i kui RPC lahenduse rakendamisel väheneb kõigi ülekandevõrgu alajaamade pingesümmeeria nullilähedasele väärtusele. Püsitalitlusel suudavad mõlemad seadmed pingesümmeeria liitumispunkti Kehtna alajaamas väärtuselt 14,05% vähendada väiksemaks kui 0,05%.

STATCOM-i rakendamisel Kehtna alajaamas tekkiv pingesümmeeria on toodud joonisel 10.8, kus Ku_{stat} tähistab pingesümmeeria taset STATCOM-i rakendamisel ja Ku_{base} samaäärset juhtumit ilma parendavate meetmeteta (alajaotis 6.2.4). STATCOM võimaldab püsitalitluses tagada nullilähedase pingesümmeeria liitumispunkti alajaamas. Sellest tulenevalt ei teki pingesümmeeria levikut ka teistesse ülekandevõrgu osadesse ja alajaamadesse. Tulenevalt aga juhtimissüsteemi viitest ja aeglasest seadistusest võib koormuse järsul muutusel tekkida lühiajalisi kõrgemaid pingesümmeeria väärtusi.

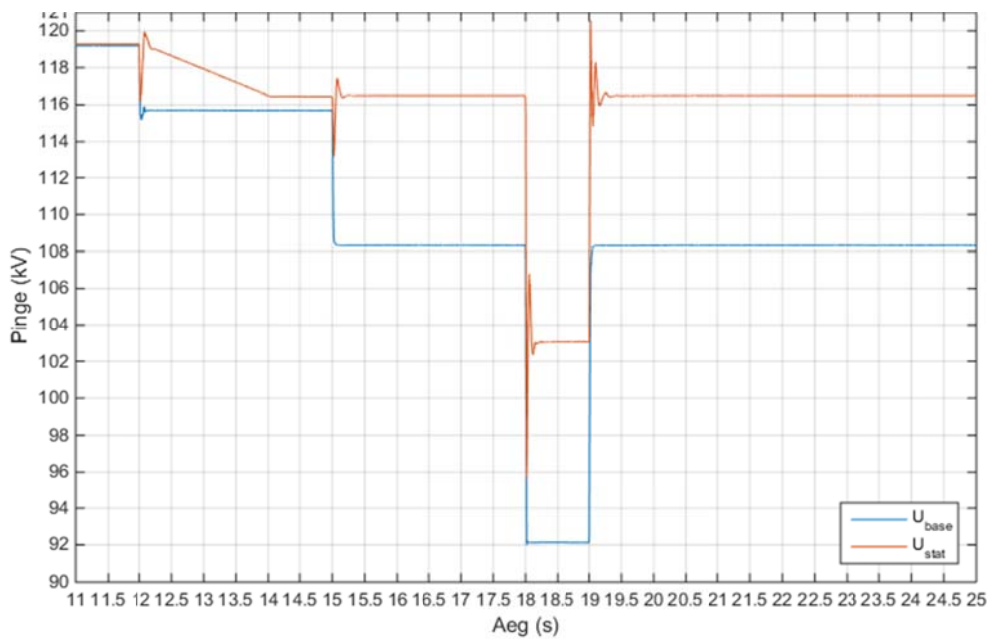


Joonis 10.8. Kehtna alajaama pingesümmeetria STATCOM-i rakendamisel ja liini 025 välja lülitumisel, elektriraudtee koormuse liitumisel Kehtna alajaama

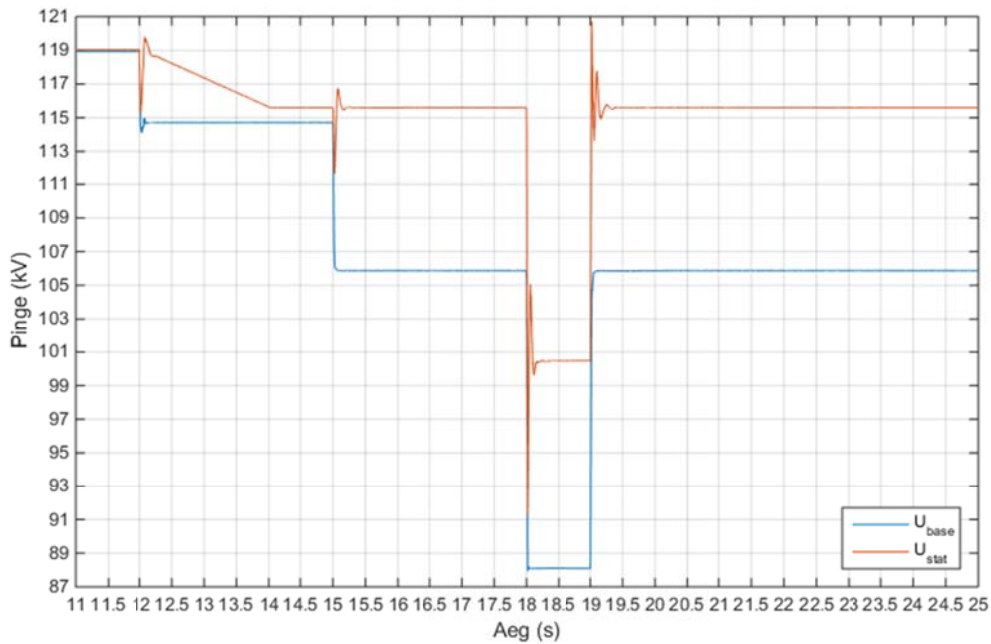
Järgmiseks vaadeldakse pingesümmeetria tekkimist *STATCOM*-i rakendamisel Kehtna alajaamas täiendava lühisetalitluse korral, kus lisaks ülekandevõrgu liini 025 välja lülitamisele leiab elektriraudtee kontakivõrgus aset lühis. Joonistel 10.9-10.11 toodud alajaamade faasid vahelise pinge graafikutest selgub, et lisaks pingesümmeetria kompenseerimisele on *STATCOM* võimeline reguleerima ka ülekandevõrgu pinget. Tänu *STATCOM*-i rakendamisele jäävad elektriraudtee koormuse lisandumisel ülekandevõrgu alajaamade latipinged lubatud piiresse. Joonistele on näha, kuidas simulatsiooniperioodi 12.-14. sekundil talitleb juhtimissüsteemi algoritm, mis vähendab reaktiivvõimsuse reguleerimise ulatust säilitamaks pingesümmeetria kompenseerimiseks vajalikku faasipingete suhet ja vältimaks seadme ülekoormumist. Võrreldes samaväärseid juhtumeid *STATCOM*-i rakendamisel U_{stat} (joonised 10.9.10.11) ja ilma parendavate meetmete rakendamiseta U_{base} (jaotis 9.2 joonised 9.7-9.9) selgub, et *STATCOM* toetab ülekandevõrgu talitlust kontakivõrgu lühise korral. *STATCOM*-i poolt ülekandevõrku lisanduv täiendav reaktiivvõimsus vähendab kontakivõrgu lühisest tingitud pingelohu väärtust, mistõttu väheneb selle mõju ka teistele ülekandevõrgu tarbijatele.



Joonis 10.9. Kehtna alajaama faasidevaheline pinge STATCOM-i rakendamisel, liini 025 välja lülitamise ja kontaktvõrgu lühise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Kehtna alajaama

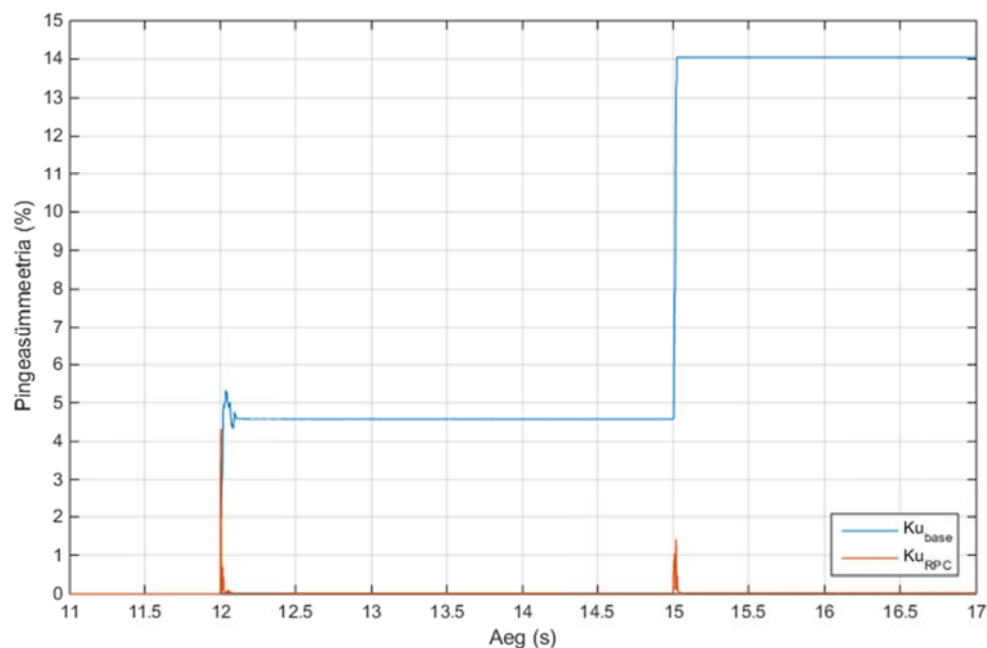


Joonis 10.10 Valgu alajaama faasidevaheline pinge STATCOM-i rakendamisel, liini 025 välja lülitamise ja kontaktvõrgu lühise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Kehtna alajaama



Joonis 10.11 Järvakandi alajaama faasidevaheline pinge STATCOM-i rakendamisel, liini 025 välja lülitamise ja kontaktvõrgu lühise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Kehtna alajaama

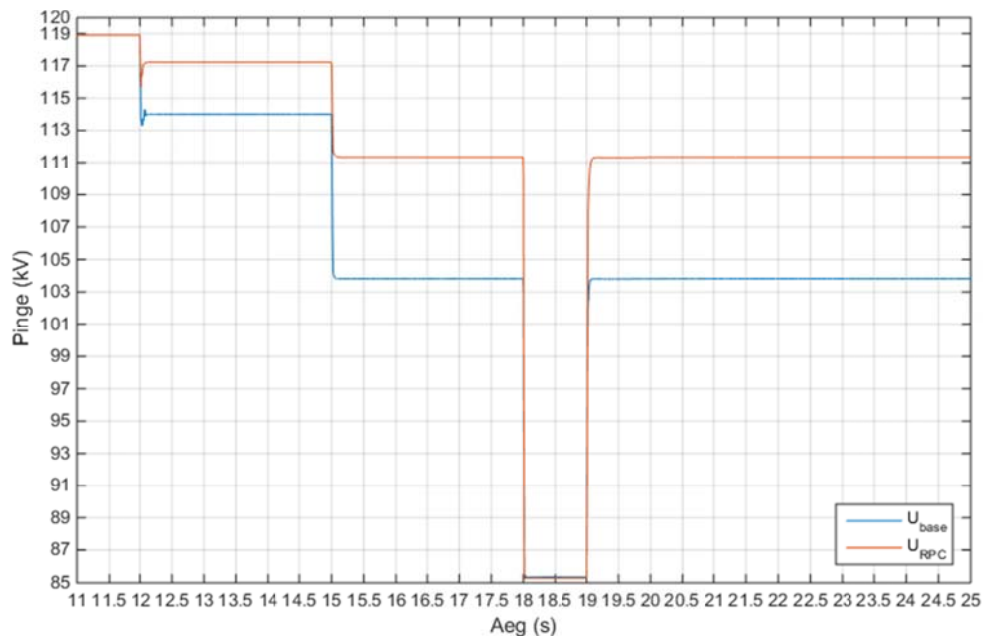
Scott-trafost ja RPC seadme koosneva hübriidlahenduse rakendamisel elektriraudtee koormuse liitumispunkti Kehtna alajaamas tekkiv pingeasümmeetria on toodud joonisel 10.12, kus K_{URPC} tähistab pingeasümmeetria taset RPC rakendamisel ja $K_{U_{base}}$ samaväärset juhtumit ilma parendavate meetmeteta. Sarnaselt STATCOM-ile võimaldab ka RPC lahendus tagada nullilähedase pingeasümmeetria liitumispunkti alajaamas.



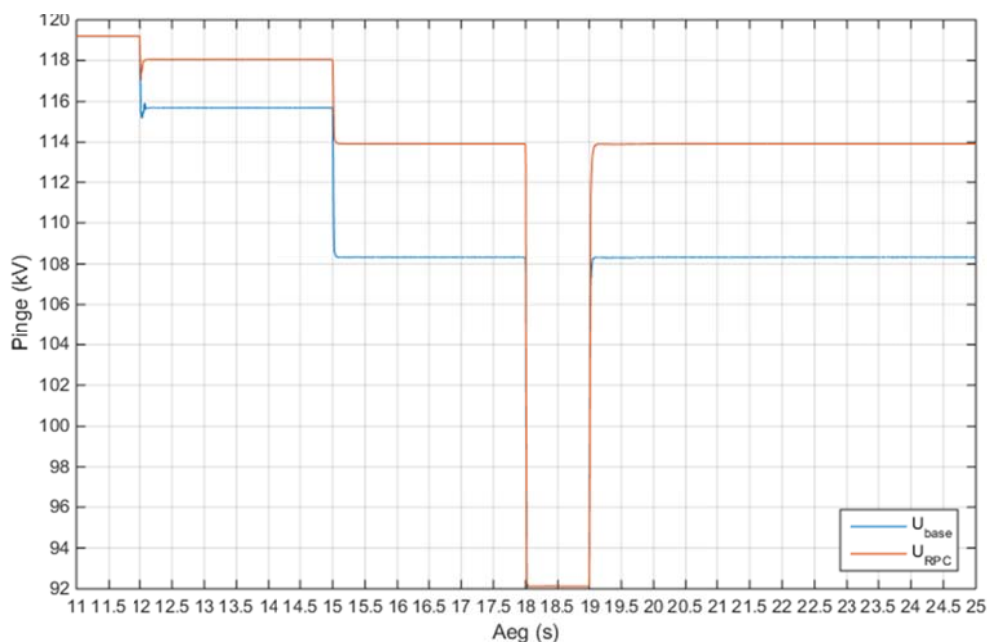
Joonis 10.12. Kehtna alajaama pingeasümmeetria RPC rakendamisel ja liini 025 välja lülitumisel, elektriraudtee koormuse liitumisel Kehtna alajaama

Võrreldes nii STATCOM-i kui RPC lahenduse rakendust selgub jooniste 10.8 ja 10.12 põhjal, et pingesümmeetria kompenseerimise seisukohast tagavad mõlemad lahendused samaväärse tulemuse ning on seeläbi sobivad meetodid elektriraudtee koormusest tuleneva pingesümmeetria vähendamiseks ülekandevõrgus.

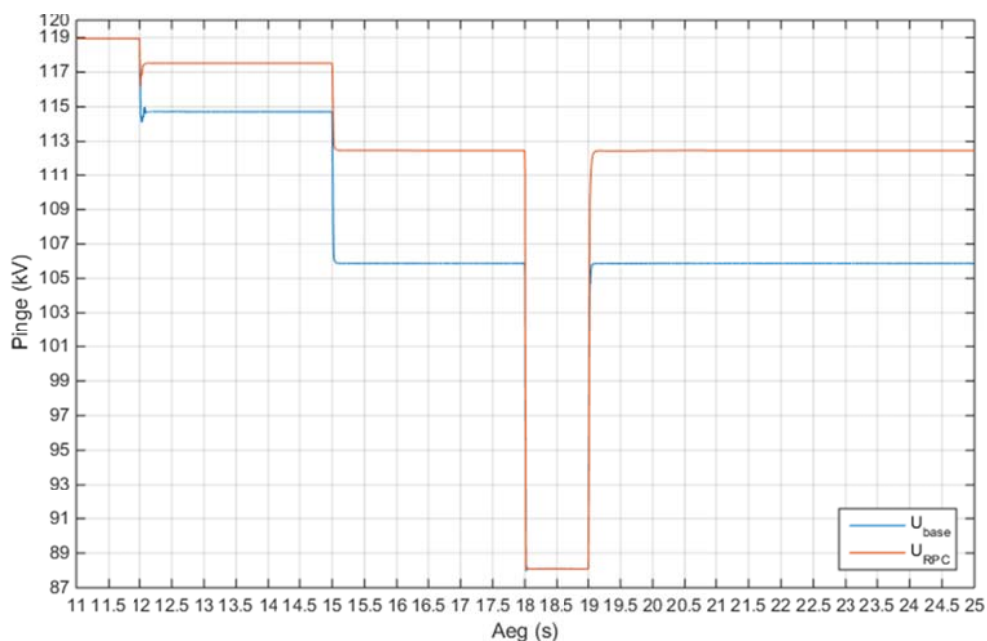
Hübriidlahenduse rakendamise mõju täiendava kontaktvõrgu lühisetalitluse korral on näha joonistel 10.13-10.15. Joonised kajastavad nii liitumispunkti Kehtna alajaamas tekkivat pingelohku kui ka selle mõju kandumist edasi teistesse lähedal asuvatesse alajaamadesse. Võrreldes joonistel RPC rakendamisel saadud pingegraafikuid U_{RPC} ilma selle rakendamiseta U_{base} selgub, et antud hübriidlahendus võimaldab vähendada ülekandevõrgus tekkivat pingelangu. RPC tagab elektriraudtee ühefaasilise koormuse konverteerimise ülekandevõrgu kolmefaasiliseks sümmeetriliseks koormuseks ning tänu reaktiivvõimsuse kompenseerimisele vähendab koormust.



Joonis 10.13 Kehtna alajaama faasidevaheline pinge RPC rakendamisel, liini 025 välja lülitamise ja kontaktvõrgu lühise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Kehtna alajaama



Joonis 10.14 Valgu alajaama faasidevaheline pinge RPC rakendamisel, liini 025 välja lülitamise ja kontaktvõrgu lühise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Kehtna alajaama



Joonis 10.15 Järvakandi alajaama faasidevaheline pinge RPC rakendamisel, liini 025 välja lülitamise ja kontaktvõrgu lühise korral, elektriraudtee koormuse liitumisel Kehtna alajaama

Tulenevalt RPC juhtimissüsteemi konfiguratsioonist kompenseerib RPC kontaktvõrus tarbitavat reaktiivvõimsust ja ei reguleeri seeläbi otseselt ülekandevõrgu pinge muutuseid. Ülekandevõrgu aktiivse pingejuhtimise puudumist iseloomustab simulatsiooni 15. sekundil toimuv liini 025 välja lülitamine, mille tõttu tekib RPC lahendus rakendamisel alajaamades latipingetes väärtuse vähenemine. Samas kui STATCOM-i rakendamisel toimus ülekandevõrgu pinge

väärtuse reguleerimine ja vastavat pingelohku ei tekkinud (joonised 10.9-10.11). RPC lahenduse parendavat mõju ülekandevõrgu pingele väärtustele iseloomustab U_{base} ja U_{RPC} juhtumite proportsionaalsus liini 025 välja lülitamisel. Kontaktvõrgus toimuva lühise korral on inverteri juhtimissüsteem blokeeritud ja kompenseerimisseade ei võimalda täiendava toe pakkumist ülekandevõrgu talitlusele, mistõttu on kontaktvõrgu lühise korral ülekandevõrgu teistele tarbijatele avalduvad mõjud sarnased ilma kompenseerimisseadme rakendamiseti U_{base} (jaotis 9.2 joonised 9.7-9.9). Joonistel 10.13-10.15 toodud pingele graafikud kinnitavad, et pingele väärtused on püsitalitlusele lubatud vahemikus, mistõttu *Scott*-trafost ja RPC seadmest koosnev hübriidlahendus on pingele seisukohast igati sobiv elektriraudtee koormusest tulenevate mõjude vähendamiseks.

Saadud tulemustest järeldub, et mõlemad analüüsitud kompenseerimisseadmed on sobivad elektriraudtee koormusest tingitud pingesümmeetria kompenseerimiseks. Analüüsi käigus vaadeldi elektriraudtee koormuse liitumispunktina Kehtna alajaama, mille põhjal võib pingesümmeetria kompenseerimisel ja vaadeldud seadmete rakendatavuseks järeldusi teha ka teiste liitumispunktide tarbeks. Tulenevalt täiendavast pingele reguleerimise võimalusest osutub ülekandevõrgu seisukohast otstarbekamaks kompenseerimisseadmeks STATCOM-il põhinev lahendus. Lisaks tagab STATCOM ka täiendavat tuge siirdeprotsessides, mistõttu suureneb elektrisüsteemi stabiilsus. Elektriraudtee seisukohast osutub paremaks aga *Scott*-trafol ja RPC-l põhinev hübriidlahendus, mis võimaldab pingele reguleerimist kontaktvõrgu siseselt. Tänu millele on võimalik vähendada reaktiivvõimuse kompenseerimist kondensaatoritega või sellest täielikult loobuda. Lisaks võimaldab RPC kompenseerida ka kontaktvõrgus tekkinud harmoonikuid [15].

10.4 Kokkuvõte

Antud peatükis kirjeldati ja analüüsiti elektriraudtee koormusest tingitud pingesümmeetria mõjude parendamise meetodeid ja nende rakendatavust. Kirjeldatud on nii STATCOM-il kui ka *Scott*-trafol ja RPC seadmepõhineva hübriidlahenduse *PSCAD* tarkvaras koostatud mudeleid.

Parendavate meetmete analüüsimisel lähtuti elektriraudtee koormuse liitumispunktist Kehtna alajaamas, kus käsitleti N-1 juhtumit ülekandevõrgu liini 025 välja lülitamisega. Lisaks vaadeldi täiendavat juhtumit, kus täiendavalt liini 025 välja lülitamisele on elektriraudtee kontaktvõrk lühisetalitluses.

Saadud tulemustest selgub, et nii STATCOM kui *Scott*-trafol ja RPC seadmel põhinev hübriidlahendus suudavad elektriraudtee koormusest tingitud pingeasümmeetriat edukalt vähendada, saavutades ülekandevõrgu alajaamades väiksema väärtuse kui 0,05%.

Täiendava kontaktvõrgu lühistalitluse analüüsist selgub, et STATCOM võimaldab ülekandevõrgu toetamist kontaktvõrgu lühistalitluses, mistõttu väheneb lühisest tingitud mõju ülekandevõrgus ja ülekandevõrgu teistel tarbijatel. *Scott*-trafo ja RPC hübriidlahenduses korral on inverteri talitus lühise ajal blokeeritud ja seetõttu kandub kogu lühisest tingitud mõju edasi ülekandevõrku.

Mõlemad vaadeldud seadmed on sobivad elektriraudtee liitumisest tingitud pingeasümmeetria täielikuks kompenseerimiseks ning Kehtna liitumispunkti näitel saadud tulemusi on võimalik üle kanda ka teistele elektriraudtee liitumispunktile. Ülekandevõrgu seisukohast osutub mõnevõrra paremaks lahenduseks STATCOM-i rakendamine elektriraudtee mõjude kompenseerimiseks, kuna omab täiendavat pinge reguleerimise võimalust ja võimaldab siirdeprotsessidel elektrisüsteemi stabiilsuse suurendamist. Elektriraudtee seisukohast on efektiivsem aga *Scott*-trafol ja RPC-l põhinev hübriidlahendus, kuna võimaldab kontaktvõrgu pinge reguleerimist. Tänu millele on võimalik vähendada või täielikult loobuda reaktiivvõimsuse kompenseerimisest kondensaatoritega.

11. Soovitused

Käesolevas peatükis võetakse kokku uurimistööst tehtud olulisemad järeldused ja antakse elektriraudtee koormuse liitumiseks ülekandevõrku üldistatud soovitusi.

11.1 Elektriraudtee liitumispunktid

Elektriraudtee liitumispunktide analüüsides järeldub, et Rail Balticu projektis ettenähtud liitumispunktide Järveküla, Kehtna, Sindi ja Häädemeeste/Nepste alajaamade korral ei ole ülekandevõrgu elektriline tugevus selle praeguse konfiguratsiooni juures piisav elektriraudtee liitumisel soovitud võimsuse juures.

Võttes arvesse Elering AS kõiki kohustusi teiste tarbijate ja perspektiivsete liitujate ees [3], tekib Järveküla alajaama praeguse konfiguratsiooni korral (arvestades liinide läbilaskevõimet suveperioodil ja N-1 juhtumeid) oht liinide üle koormumiseks. Seega pole olemasoleva konfiguratsiooni juures elektriraudtee koormuse liitumine soovitud võimsusel Järveküla alajaama võimalik. Arvestades [3] esitatud võimalikke perspektiivseid plaane Järveküla alajaamas elektrivõrgu tugevdamisel, kus alajaam viiakse üle 330 kV pingestmele, osutub elektriraudtee liitumisest tingitud mõjusid vähendada vajalikule tasemele. Teistel juhtumitel osutub tarvilikuks parendavate meetmete rakendamine elektriraudtee mõjude kompenseerimiseks.

Kehtna, Sindi ja Häädemeeste/Nepste liitumispunkti alajaamade elektrilist tugevust ei ole võimalik suurendada ilma ulatuslike ülekandevõrgu konfiguratsiooni (võrgu tugevdused) muutusteta. Elektriraudtee liitumine soovitud võimsuse juures antud alajaamades saab võimalikuks teiste parendavate meetmete rakendamisel.

Lähtudes kehtestatud pingesümmeetria 1% piirmäärast ja N-1 kriteeriumist, on Järveküla alajaamas 10 aasta perspektiivis ette nähtud parendustööde rakendamisel elektriraudtee koormusel võimalik Järveküla alajaama liituda võimsusel 23,3 MVA. Kehtna alajaama on elektriraudtee koormusel võimalik liituda võimsusel 2,1 MVA, Sindi alajaama võimsusel 7,1 MVA ja planeeritud Häädemeeste/Nepste alajaama võimsusel 5,1 MVA. Väiksema elektriraudteest tingitud pingesümmeetria piirmäära kehtestamisel vähenevad ka maksimaalsed liitumisvõimsused proportsionaalselt. Rakendades peatükis 10 käsitletud parendavaid meetmeid liitumispunkti alajaamades saab elektriraudtee liitumine soovitud võimsusel võimalikuks nii Kehtna, Sindi kui ka Häädemeeste/Nepste alajaamades.

Liitumispunktide analüüsides selgub, et kõigi välja pakutud liitumispunkti alajaamade korral on elektriraudtee liitumine võimalik vaid läbi parendatavate meetmete rakendamise.

11.2 Pingeasümmeetria piirmäärad

Käesolevas projektis on pingeasümmeetria tasemete analüüsimisel lähtutud ülekandevõrgu alajaamas lubatud maksimaalseks pingeasümmeetria 1% piirmäärast. Samaväärsest pingeasümmeetria piirmäärast soovitatakse lähtuda ka allikas [35] vastavalt tabelile 11.1.

Tabel 11.1. Elektriraudtee liitumise planeerimisel pingeasümmeetria piirmäärad vastavalt [35]

Kriteerium	Maksimaalne pinge vastujärgnevuskomponendi väärtus	Talitluskriteerium
1	2%, perioodiga 1 minut	Halvim N-1 või N-2 kriteerium
2	1% keskmine, perioodiga 0,5h	Normaalkonfiguratsioon
3	1% keskmine, perioodiga üle 24h	Halvim N-1 kriteerium

Näiteks on Suurbritannias elektriraudtee poolt põhjustatud pingeasümmeetria lubatud piirmäärasid käsitletud dokumendis [36], kus Inglismaal ja Walesis on pingestmel üle 150 kV lubatud pingeasümmeetria 1,5%, Šotimaal aga 2%. Madalamatel pingestmetel on üle Suurbritannia lubatud pingeasümmeetria 2%. Prantsusmaal on lubatud pingeasümmeetria väärtused aga järgmised: 1% perioodiga 15 minutit või enam ja 1,5% perioodiga alla 15 minuti [37].

Generaatorite seisukohast on peatükis 4 käsitletud Metsakombinaadi alajaama ühendatud generaatorile avalduvaid mõjusid kui generaatorile lattidel tekib pingeasümmeetria 0,85% ning Sindi liitumispunkti 1,5%. Tehtud analüüsist järeldub, et vastav pingeasümmeetria põhjustab generaatori elektrilise jõumomendi võnkumist. Tekitades seeläbi generaatori vibratsiooni ja auruturbiini mehaanilisi võnkumist, mis mitmete koosmõjude tulemusena võib vähendada turbiini eluiga. Pingeasümmeetria mõjude analüüsist generaatori elektrisüsteemi stabilisaatorile ning üle- ja alaergutus piirajatele selgub, et elektriraudtee koormusest tingitud Iru alajaamas tekkiv 0,8%-ne pingesümmeetria põhjustas Iru alajaama ühendatud Vao generaatori G2 maksimaalse võimsusega üleergutusrežiimis talitlemisel generaatori üle koormumist. Samas kui Vao generaatori G1 puhul on üle koormumise oht alaergutusrežiimis talitlusel. Seega põhjustab 0,8%-ne Iru alajaama lattidel tekkiv pingeasümmeetria generaatorite üle kuumenemist ning generaatorite väljundvõimsuseid tuleks selle vältimiseks piirata.

Elektriraudtee liitumise planeerimisel on oluline arvestada, et elektriraudtee koormuse lisandumisel ei ületataks 1% piirmäära kogu liitumispunkti summaarse (elektriraudtee ning võimalikud teised allikad) pingeasümmeetria ja alajaama minimaalse lühisvõimsusega N-1 stsenaariumi juures. Tulenevalt ülekandevõrgu hooldustöödest võivad N-1 olukorrad osutada pikemaajalisteks, seega tuleks elektriraudtee pingeasümmeetria lubatud maksimaalse piirmäära

kehtestamisel lähtuda halvimast võimalikust stsenaariumist, et vältida negatiivsete mõjude teket ülekandevõrgu teistele tarbijatele.

Lõpliku pingesümmeetria taseme määramiseks on välja valitud liitumispunktides vaja teha täiendavaid elektri kvaliteedinäitajate mõõtmisi, et kaardistada ülekandevõrgu pingesümmeetria tase enne elektriraudtee liitumist. Lähtudes mõõtetulemustest ja kehtestatud 1% piirmäärast kujuneb välja elektriraudtee talitlusest maksimaalselt lubatud pingesümmeetria, arvestades võrgu minimaalset lühisvõimsust ja N-1 kriteeriumit.

11.3 Uurimistöö edasised mahud

Rail Balticu projektis trassilahenduse kujunemisel välja valitud liitumispunktides on tarvis läbi viia elektri kvaliteedimõõtmised. Mõõtmiste alusel hinnatakse alajaamade toitele ühendatud tarbijate elektri kvaliteeti, mille tulemusel saab täpsemalt määrata lähtuvalt elektri kvaliteedinäitajatest lubatavat pingesümmeetria taset elektriraudtee liitumispunkti alajaamades.

Elektriraudtee liitumisel on projekti mahus vajalik koostada elektriraudtee ja ülekandevõrgu koostöö aruanne, mis hõlmab projekti raames koostatud mudeleid ning annab lõpliku hinnangu ülekandevõrgus tekkivatest mõjudest ja elektri kvaliteedinormide täitmisest.

Kompenseerimisseadmete rakendamisel on vajalik seadme tarnija poolne stabiilsushinnang, mis hõlmab juhtimissüsteemi stabiilsust erinevat ülekandevõrgu häiringute korral. Stabiilsushinnang peab sisaldama kompenseerimisseadme võimalikke talituslikke kitsendusi erinevate häiringute korral. Vajalik osutub ka kompenseerimisseadme testide ja testimise põhimõtete koostamine, mida liitumisprotsessis läbi viia.

Edasine uurimistöö peaks andma hinnangu ka elektriraudtee kontaktvõrgu lahenduse juures nulljärgnevusvoolude tekkimise kohta ja nende võimalikest mõjudest teistele raudteeliiniga ristuvatele taristutele (sh gaasitrassid). Vajalik on kontaktvõrgu nulljärgnevusvoolude koordineerimine ristuvate taristutega.

11.4 Mudelid ning nende koostamise mahud

Elektriraudtee projekti raames on vajalik liituja poolt üle anda *PSCAD* tarkvaras koostatud täielikud elektriraudtee kontaktvõrgu mudelid. Mudelite koostamisel tuleb lähtuda elektriraudtee kontaktvõrgu lõplikust geomeetrisest paigutusest ning modelleerimisel kasutada *Frequency Dependent (Phase)* mudelit. Kontaktvõrgu mudelid on vajalikud elektriraudtee võrgus tekkivate harmoonikute taseme ja nende võimalike edasi kandumise hindamiseks ja analüüsimiseks. *Frequency Dependent (Phase)* mudeli kasutamine võimaldab hilisemat ma-

dalmale täpsusastmele konverteerimist ja seeläbi arvutuslike protsesside kiirendamist modelleerimisel.

Lisaks kontaktvõrgu mudelitele on vajalikud ka elektriraudteel kasutusele tulevate vedurite mudelid, vedurite konkreetse tüübi ja ehituse selgumisel. Iga elektriraudtee liinil sõitva veduri tüübi kohta on vajalik *PSCAD* tarkvaras koostatud mudel. Koostatud mudelid peaksid minimaalselt kajastama võrgupoolset muundurit alates alalisvoolu kondensaatorist. Vajalik on võrgupoolse muunduri kõigi juhtimissüsteemide sisaldumine veduri mudelis, seal hulgas kaitserakendused. Veduri mudelid peavad võimaldama veduri ja elektrivõrgu koostalitluse analüüsimist ning veduri poolt põhjustatud harmoonikute emissiooni.

Elektriraudtee koormuse liitumisel elektri kvaliteedinäitajate parendamiseks kompenseerimis-seadmete rakendamisel peaks liituja esitama rakendamisele tulevate kompenseerimis-seadmete detailsed ja täis mahus *PSCAD* tarkvaras koostatud mudelid. Mudelid peavad sisaldama nii kompenseerimis-seadet kui ka selle juhtimissüsteeme ja kaitserakendusi. Kompenseerimis-seadmetele vastavad mudelid peavad võimaldama kompensaatori ja ülekandevõrgu koostalitluse analüüside teostamist ning kompenseerimis-seadme poolt elektri kvaliteedinäitajate mõju-de vaatlemist. Kompenseerimis-seadme paigaldamisel 110 kV ülekandevõrku on tarvis esitada vastavad mudelid ka *PSS/E* tarkvaras. *PSS/E* tarkvara ei võimalda ühefaasiliste seadmete ar-vesse võtmist (*Scott* -trafo ja RPC lahendus), mistõttu kompenseerimis-seadmete paigaldami-sel ühefaasiliselt talitlevasse elektriraudtee kontaktvõrku ei võimalda mudelite koostamist *PSS/E* tarkvaras.

Kokkuvõte

Käesoleva uurimistöö eesmärgiks oli elektriraudtee liitumisel elektrivõrguga kaasnevate kitsaskohtade määramine ja analüüs. Põhirõhk on olnud elektrivõrgu dünaamilistel protsessidel ja elektriraudtee mõjudel teistele liitujatele, sh sünkroonmasinadele. Töö tulemusena on välja toodud soovitused võrguettevõtjale, elektriraudtee liitumise paremaks korraldamiseks ja tekkivate mõjude minimeerimiseks.

Kokkuvõtvalt on uurimistöö põhilised tulemused järgmised:

- Järveküla alajaama toiteliinid võivad elektriraudtee koormuse liitumisel soovitud mahus üle koormuda, mistõttu on elektriraudtee liitumisel vajalik rakendada parendavaid meetmeid. N-1 kriteeriumi arvestamisel on praeguse konfiguratsiooni juures maksimaalseks liitumisvõimsuseks 11,3 MVA;
- Elektriraudtee soovitud võimsusega liitumisel alajaama on vajalik rakendada parendavaid meetmeid. Praeguse konfiguratsiooni kohaselt on maksimaalseks liitumisvõimsuseks 2,3 MVA;
- Elektriraudtee soovitud võimsusega liitumisel Sindi alajaama on vajalik rakendada parendavaid meetmeid. Praeguse konfiguratsiooni kohaselt on maksimaalseks liitumisvõimsuseks 7,1 MVA;
- Elektriraudtee soovitud võimsusega liitumisel Häädemeeste/Nepste alajaama on vajalik rakendada parendavaid meetmeid. Sobivamaks uue alajaama toite konfiguratsiooniks on konfiguratsioon 1 (Kilingi-Nõmme-Nepste ja Kabli-Nepste toiteliinid), kus maksimaalseks liitumisvõimsuseks on 5,1 MVA;
- *PSS/E* tarkvara kasutamine elektriraudtee analüüsimiseks on piiratud tulenevalt tarkvaras kasutatavast pärijärgnevussüsteemist, mistõttu ei ole võimalik modelleerida ja hinnata asümmeetrilisi protsesse;
- *PSCAD* tarkvara on sobiv tarkvara platvorm, milles on võimalik teostada põhjalikke elektriraudtee mõjude analüüse;
- Pingeasümmeetria poolt põhjustatud generaatorite võimsuste hetkväärtuste võnkumiste neto energiavahetus ülekandevõrguga on null ning tegelikuks võimsusväärtuseks on võnkumise keskvärtus;
- Vastujärgnevuskomponendist tingitud võimsuse võnkumine põhjustab generaatoris kiirendav/pidurdavat jõumomenti. Tulenevalt generaatori konstantsest mehaanilisest momendist avaldub kiirendav/pidurdav jõumoment pöörlevas seadmes vibratsioonina;

- Vastujärgnevuskomponendist põhjustatud generaatori vibratsioon võib kahjustada auruturbiini;
- Pingeasümmeetriast põhjustatud võnkeprotsessid avaldavad mõju generaatorite elektrisüsteemi stabilisaatoritele, mille väikese amplituudiga võnkumine ei põhjusta generaatorite võnkeprotsesse;
- Pingeasümmeetriast põhjustatud võnkeprotsessid ei mõjuta generaatorite elektrisüsteemi stabilisaatorite võimekust generaatoritele avalduvate võnkumiste summutamisel;
- Pingeasümmeetriast põhjustatud võnkeprotsessid ei mõjuta oluliselt generaatorite üle- ja alaergutus piirajate talitlust;
- Pingeasümmeetriast põhjustatud vooluasümmeetria tõttu koormub üle $G1$, kui generaator talitleb alaergutuspiirajas;
- Pingeasümmeetriast põhjustatud vooluasümmeetria tõttu koormub üle $G2$, kui generaator talitleb üleergutuspiirajas;
- Uurimistöö tulemusena on kirjeldatud ja uuritud konverteri vahendusel ühendatavate elektriraudtee olemust ja mõju elektrisüsteemile. Välja on toodud staatilise sagedusmuunduri rakendamise eelised ja puudused;
- Põhjaosas ülekandevõrgu normaalkonfiguratsiooni korral ei teki elektriraudtee liitumisel otseseid probleeme;
- Lõunaosas ülekandevõrgu normaalkonfiguratsiooni korral tekivad elektriraudtee liitumisel elektri kvaliteedi piirmäära ületavad pingeasümmeetriad;
- Uurimistöö tulemusel on määratletud vaadeldud liitumispunktide pingeasümmeetria seisukohast kõige halvemad N-1 juhtumid;
- Uurimistöö tulemusel on määratletud, et asümmeetrilise talitluse tingimustes on generaatoritele kõige halvemad lühise juhtumiks faasi A ja B ning maa vaheline lühis;
- Uurimistöö tulemusel on tehtud kindlaks kontaktvõrgus toimuvate lühiste mõju liitumispunktidele ja generaatoritele;
- Analüüsi tulemusel on selgunud, et elektriraudtee koormuse tõttu Kehtna alajaama lattelid tekib alapinge (pinge < 105 kV), kui lülitub välja liin 025;
- Ülekandevõrgu seisukohast on STATCOM kasulikum parendav meede kui *Scott*-trafo ja RPC hübriidlahendus;

- Uurimistöö raames on täiendatud eelnevates etappides koostatud ülekandevõrgu PSCAD mudelit;
- Mudelisse on lisatud Iru alajaamas liitunud generaatorite tegelikud mudelid;
- Uurimistöö raames on koostatud STATCOM ning *Scott*-trafo ja RPC hübriidlahenduse mudelid.

Kirjandus

- [1] Elektertransport ja selle mõju elektrisüsteemi talitlusele, III etapi aruanne. TTÜ elektroenergeetika instituut, 2015, 214 lk
- [2] Elektertransport ja selle mõju elektrisüsteemi talitlusele, II etapi aruanne. TTÜ elektroenergeetika instituut, 2014, 269 lk
- [3] R. Maripuu, Järveküla alajaama ülevaade, Aruanne. Elering AS, 2016, 14 lk
- [4] B. Bennett, Unbalanced Voltage Supply: The Damaging Effects of Three Phase Induction Motors and Rectifiers, ABB Ltd., New Zealand, 2015
- [5] R. Maripuu, Kehtna alajaama ülevaade, Aruanne. Elering AS, 2016, 7 lk
- [6] R. Maripuu, Sindi alajaama ülevaade, Aruanne. Elering AS, 2016, 4 lk
- [7] R. Maripuu, Häädemeeste/Nepste alajaama ülevaade, Aruanne. Elering AS, 2016, 3 lk
- [8] PSS/E Operation Guide. Siemens Power Technologies International, May 2016
- [9] Ü. Treufeldt. Lühised elektrisüsteemides. Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2012, 158 lk
- [10] EMTDC User Guide – A Comprehensive Resource for EMTDC. Manitoba HVDC Research Centre, v.4.7, February 2010
- [11] T. Sarnet, I. Palu, Tallinna Elektijaam power plant PSCAD and PSS/E models, Aruanne, versioon 5.2. TTÜ elektroenergeetika instituut, 2016, 102 lk
- [12] T. Sarnet, I. Palu, Tallinna Elektijaam OÜ and Auragen OÜ power plant (Väo) co-operation report, Aruanne. TTÜ elektroenergeetika instituut, 2016, 58 lk
- [13] D. Vandamme. Study of the WTE Power generator Tallinn CNIM, Aruanne rev. C. Capsim, 2012, 55 lk
- [14] IEEE Standard 421.5-2005, IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. IEEE, 2006, 85 lk
- [15] D. Vandamme. PSCAD model verification principles, Aruanne rev. C. Capsim, 2014, 24 lk
- [16] IEEE Standard C50.13/D1, IEEE Standard for Cylindrical-Rotor 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators Rated 10 MVA and Above. IEEE, 2013, 61 lk

- [17] ABB Automation Products AB. ABB RXIIK 4 and RAIK 400 negative sequence overcurrent relay and protection assemblies, 1999, 24 lk
- [18] M. Bayrak, Ö. Usta. Instantaneous Power in Unbalanced Three Phase Systems. International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ELECO'99, Bursa, 1999, pp. 4
- [19] M. Bayrak, Ö. Usta. A New Digital Relay for Generator Protection Against Asymmetrical Faults. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 1, 2002, pp. 6
- [20] T.P. Tsao, C.H. Lin. Long Term Effects of Power System Unbalance on The Corrosion Fatigue Life Expenditure of Low Pressure Turbine Boilers. IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology, Vol. 147, No. 5, 2000, pp. 8
- [21] J. Kilter, T. Kangro, T. Sarnet, I. Palu. Elektriraudtee ja selle mõjud elektrisüsteemi talitlusele. Elering, 2015, 64 lk.
- [22] C. Zhao, C. Banceanu, T. Sachaad, P. Maibach, S. Aubert. Static Frequency Converters – A Flexible and Cost Efficient Method to Supply Single Phase Railway Grids in Australia. ABB Switzerland Ltd, AusRAIL, Melbourne, 2015.
- [23] T. Bagnall, F. Silièzar. Power Electronics Based Traction Power Supply for 50 Hz Railways. Conference on Railway Excellence, CORE 2014, Adelaide, Australia, 5-7 May 2014.
- [24] ABB Australia news. Maintaining power for Queensland Rail, <http://www.abb.com/cawp/seitp202/205abf25f2495ef244257e6d002c1286.aspx> [Online] 02.08.2016
- [25] Aurecon Metros & Urban Rail, Traction Power Case Study: Integration of Static Frequency Converters into a metropolita network. <http://www.aurecongroup.com/en/thinking/insights/metros-and-urban-rail/integration-sfcs-into-metropolitan-network.aspx> [Online] 02.08.2016
- [26] Queensland Rail Projects. New Generation Rollingsrock – Wulkuraka Connection Works, <http://www.queenslandrail.com.au/Community/Projects/Pages/NewGenerationRollingstock-Wulkuraka.aspx> [Online] 02.08.2016

- [27] ABB Switzerland Ltd. Reference case study, World's most powerful rail frequency converter,
https://library.e.abb.com/public/73b472c827a640d8807627e22b1c1c61/ABB_ReferenRe_E.ON%20Datteln_EN.pdf [Online] 09.08.2016
- [28] ABB Press Releases. ABB's PCS 6000 static frequency converter binds public grid with the railway grid in Norway,
<http://www.abb.ee/cawp/seitp202/9e3e876a73ab334bc12579f200337597.aspx>
 [Online] 02.08.2016
- [29] ABB Switzerland Ltd. Static frequency converter for grid interconnection, Rail frequency converter – PCS 6000,
https://library.e.abb.com/public/f1a9d03f3c665d28c1257d4e0050189a/Leaflet_PCS%206000%20Rail_engl_RevA.pdf [Online] 04.08.2016
- [30] Siemens AG. Sitras SFC plus. Static frequency converter for AC traction power supply, 2012, <http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/en/interurban-mobility/rail-solutions/railway-electrification/ac-traction-power-supply/Documents/sitras-sfc-plus-en.pdf> [Online] 05.08.2016
- [31] G. Linhofer, P. Maibach, N. Umbricht. ABB. Static Converters, Dynamic Performance. Providing Railway Grids with the High Frequency. ABB review 2, 2010, 96 lk
- [32] U. Behmann, T. Schütte. Cost Effectiveness of Using Static Converters Compared with Autotransformer Supply Systems for 50 Hz Railways. Rail Technology Review, Vol. 52, No. 4, 2013, pp. 18-21
- [33] ABB Power Technologies AB. SVCs for load balancing and trackside voltage control. ABB review , 2005, 4 lk
- [34] ABB Power Technologies AB. SVC Light for railway load balancing. ABB review , 2005, 4 lk
- [35] B. Klerfors, T. Schütte. Improved Phase Balancing Concept for Railways Electrified with 50 or 60 Hz. INT Rail Power supply, 2014, 6 lk
- [36] Ofgem, Modification to the Grid Code: Voltage Unbalance (GC0088), January 2016 [Online] <https://www.ofgem.gov.uk/publications-and-updates/modification-grid-code-voltageunbalance-gc0088>

- [37] N. Golovanov, C. Lazaroiu, M. Roscia, D. Zaninelli. Voltage Unbalance Vulnerability Areas in Power Systems Supplying High Speed Railway, Power Engineering Society General Meeting, IEEE, 2005, pp. 2509-5214