



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

Eesti elektrisüsteemi laiseiresüsteemi arendamine ja analüüs (WAMPAC)

Uurimistöö 1.1-4/13/232 / Lep13118 III etapi lõpparuanne

Tallinn 2015

Uurimistöö täitjad:

Ivo Palu	dotsent, tellimustöö vastutav täitja, TTÜ elektroenergeetika instituut
Kaur Tuttelberg	doktorant, nooremteadur, TTÜ elektroenergeetika instituut
Tanel Sarnet	doktorant, nooremteadur, TTÜ elektroenergeetika instituut
Innar Liiv	dotsent, TTÜ informaatikainstituut



Jako Kilter	PhD, elektrisüsteemi ekspert, „Eesti elektrisüsteemi laiseire-süsteemi arendamine ja analüüs (WAMPAC)“ R&D projekti juht, Elering AS
Eero Ülavere	püsitalitluse ekspert, Elering AS
Andrus Reinson	automaatika ja releekaitse talitluse juhataja, Elering AS

Sisukord

Sissejuhatus	5
1 Ülekandeliinide jälgimine faasimõõtmistega	7
1.1 Ülekandeliini soojusliku talitluse jälgimine meteoroloogiliste mõõtmistega	8
1.1.1 Lähteandmed	9
1.1.2 Arvutuslikud näited	9
1.1.3 Analüüs ja järeldused	11
1.2 Mõõtetrafode mõõtmisvigade kompenseerimine	12
1.2.1 Mõõtmisvigade interpoleerimine ja lähendamine	13
1.3 Ülekandeliini parameetrite määratlemine	15
1.3.1 Kahejuhilise ülekandeliini võrrandid	16
1.3.2 Mitmejuhilise ülekandeliini parameetrid	17
1.3.3 Mitmejuhilise ülekandeliini võrrandid	20
1.3.4 Modaalanalüüs	21
1.3.5 Modaalteisendusmaatriksite muutlikkus	24
1.3.6 Liinijuhi aktiivtakistuse määramine	28
1.3.7 Arvutuslikud näited	30
1.3.8 Järeldused ja kokkuvõte	33
1.4 Ülekandekadude määramine	34
1.4.1 Ülekandekaod kahejuhilisel liinil	34
1.4.2 Mitmejuhilise liini kaod faasisuurustes	35
1.4.3 Mitmejuhilise liini kaod sümmeetrilistes komponentides	37
1.4.4 Arvutuslikud näited	40
1.4.5 Analüüs ja järeldused	44
1.5 Kokkuvõte	45
1.6 Kirjandus	46
2 Laiseirerakendused praktikas	49
2.1 Faasimõõtmiste rakendamine süsteemi oleku estimateerimisel	49
2.2 Süsteemi oleku jälgimine faasimõõtmistega	51
2.2.1 Koostatud rakendus	52
2.2.2 Laiseiresüsteemi ja estimaatori mõõtetulemuste võrdlus	52
2.3 Ülekandeliinide jälgimine	55
2.4 Kokkuvõte	59

2.5 Kirjandus	60
3 Elektrisüsteemi reaalajasimulaatorid ja nende võimalused elektrisüsteemi talitluse analüüsil	61
3.1 Üldist	61
3.2 Reaalajasimulaatorid	61
3.3 Reaalajasimulaatori RTDS võimalused	64
3.4 Reaalajasimulaatori kasutusvaldkonnad elektrisüsteemi jälgimisel, kaitsmisel ja juhtimisel	78
3.5 Kokkuvõte	82
3.6 Kirjandus	82
Kokkuvõte	83
Lisa 1 WAMPAC webi rakenduse tehniline arhitektuur	85
Lisa 2 Uurimistöö tulemusel avaldatud aruanded ja teaduslikud artiklid	89

Sissejuhatus

Tänapäeva elektrisüsteemid on pidevas arengus. Peamisteks mõjuteguriteks on taastuvenergeetika ja elektriturgu areng ning uute tehnoloogiate kasutuselevõtt. See kõik tingib vajaduse koordineerituma elektrisüsteemi analüüsi ja juhtimise järele, kuna kitsendused süsteemi juhtimisele on suuremad ja järjest tähtsamaks muutub tarbijatele kõrgema varustuskindluse tagamine. Selle tagamiseks on tänapäeva elektrisüsteemides järjest tähtsamaks muutumas laimõõtmistel põhinevad lahendused ja reaajasimulatsioonid.

Elering AS koostöös Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituudiga on viimased kolm aastat uurinud laimõõtmiste ja reaajasimulatsioonide võimalusi lähtudes Eesti elektrisüsteemi olemusest ja eripäradest. Eesmärk on olnud vaadelda laimõõtmisi ja nende kasutatavust teaduslikust vaatenurgast ja saadud tulemusi rakendada otseselt Eesti elektrisüsteemi analüüsil ja juhtimisel. See aruanne on uurimistöö kolmanda etapi lõpparuanne, milles on kokkuvõtvalt esitatud uurimistöö tulemused ja välja toodud mõned võimalikud uurimissuunad tulevikus.

Teadustöö kolmanda etapi raames on edasi uuritud laimõõtmiste baasil välja töötatud rakenduste (kadude mõõtmine, liiniparameetrite määramine) kasutatavust ja optimeeritud neid lähtuvalt täiendavatest saadaval olevatest mõõteandmetest (estimaatori andmed, ilmaandmed) ning arvestades arvutuskiirust ja meetodi sobilikkust. Teadustöö üks oluliseks osaks oli ettevalmistavad tööd reaajasimulatsioonide ja nende kasutamine süsteemiautomaatika raamistikus. Selle tegevuse raames on TTÜ elektroenergeetika instituudi elektrivõrkude laborisse paigaldatud reaajasimulaator ja tehtud ettevalmistusi Eesti elektrisüsteemi süsteemiautomaatika edasiarendamiseks arvestades võimalikke arenguid tulevikus ja juba olemasolevat alalisvooluühenduste ja tuuleelektrijaamade mõju.

Selles aruandes vaadeldakse edasi ja täpsustatakse ülekandeliini soojusliku talitluse hindamist arvestades täiendavaid meteoroloogilisi mõõtmisi. Olulisel kohal on mõõtetrafode mõõtevigade kompenseerimise täiendavad analüüsid ja meetodid, millede tulemusena määratletakse ülekandeliini parameetreid ja kadusid. Võrreldes eelmiste etappide tulemustega on meetodite matemaatilist poolt edasi arendatud ning samuti on täpsustatud tulemusi ja tehtud üldised kokkuvõtted ja soovitusel edasiseks. Laiseirerakenduste valdkonnas on uurimistöö raames välja töötatud kolm rakendust, milledest kaks (talituse estimateerimine ja liini parameetrite määramine) on kasutatavad otseselt olemasolevas laimõõtmiste süsteemis ja kolmas võimaldab laimõõtmiste tulemusi näidata interneti vahendusel. Viimase kohta on käesolevas aruandes esitatud põhimõtteline lahendus (vt lisa 1). Eraldi osa on aruandes pühendatud reaajasimulatsioonidele ja nende võimalikele rakendustele tulevikus. Samuti on kokkuvõtvalt esitatud ülevaade reaala-

jasimulaatorist ja selle võimalustest ning välja on toodud modelleerimistulemused Eesti 330 kV elektrivõrgu näitel.

Teostatud uurimistöo baasil on koostatud mitmeid aruandeid ja teaduslikke artikleid. On oluline, et teadustöö tulemused on leidnud avaldamist rahvusvaheliselt tunnustatud eriala konverentsidel ja ajakirjades. Kokkuvõtvalt on koostatud aruanded ja artiklid esitatud lisas 2.

Käesolevat aruannet on soovituslik lugeda koos uurimistöo eelmiste etappide aruannetega, kuna temaatikad on omavahel tugevalt seotud ning nii mõnigi teoreetiline taust ja selgitus on esitatud eelnevalt. Sellest tulenevalt on käesolevas aruandes lisatud viited eelmiste aruannete punktidele, mis on olulised mõistmaks selles aruandes teostatud teadustööd ning arvutusi, mis näitlikustavad teooriate rakendamist reaalses elektrisüsteemis.

1. Ülekandeliinide jälgimine faasimõõtmistega

Käesolev peatükk võtab kokku projekti teise ja kolmanda etapi käigus tehtud edasimineku ülekandeliinide jälgimises faasimõõtmiste põhjal. Kolmas etapp jätkas mitmeid teise etapi tegevusi ja seetõttu on aruandes lisaks viimase etapi tulemustele ka mõned kokkuvõtted eelneva etapi tööst. Edasi on arendatud liinide jälgimist mitmejuhilise liini mudeli põhjal, eriti ülekandekadude estimateerimise osas. Mõõdetud faasoritest kadude arvutamist on analüüsitud arvestades liinijuhtide omavahelist sidestatust. Lisaks on uuritud mõõtetrafode mõõtevigade kompenseerimise võimalusi.

Uurimistöö esimeses etapis uuriti teoreetiliselt ülekandeliinide soojusliku läbilaskevõime määramise meetodikaid ning rakendusi, mis põhinesid erinevatel mudelitel ja välistel mõõtmistel [1]. Töö teises etapis täiendati esimeses etapis kirjeldatud liini soojusbilansi modelleerimist praktilise näitega, milles kasutati sisendina reaalseid meteoroloogilisi mõõtmisi ja koormuse andmeid faasimõõtmistest [2]. Reaalsete ilmamõõtmiste ja liini koormuse alusel mudeldati selle soojusbilanssi, et leida liini temperatuur ja soojuslik läbilaskevõime. Käesoleva etapi jaoks on saadud meteoroloogilised mõõtmised tihedama sammuga, s.o iga 10 minuti tagant, mille põhjal on meetoodika kasutatavust täiendavalt analüüsitud.

Töö teises etapis uuriti ka ülekandeliinide läbilaskevõime otsest määramist ainult faasimõõtmiste andmete põhjal. Faasimõõtmistest on võimalik arvutada liini parameetrid, s.o aktiivtakistust, millest saab teoreetiliselt leida liinijuhtme temperatuuri, ning reaktiivtakistust, ja mõõta pingetevahelist nurka, mis kombineerituna määravad liini läbilaskevõime. Takistuse muutust temperatuuri muutuse määramiseks on vaja väga täpselt määrata takistuse väärtus. Eelmises etapis tehtud analüüs näitas, et praeguse mõõtetäpsuse juures ei ole võimalik faasimõõtmistest liinijuhi temperatuuri arvestatava täpsusega määrata. Käesolevas aruandes on vaadeldud mõõtetrafode mõõtevigade kompenseerimist, mis võiks potentsiaalselt võimaldada mõõtetäpsust piisavalt suurendada, et määrata ka liinijuhtme temperatuuri ja sellest sõltuvat läbilaskevõimet.

Eelmise etapi käigus vaadeldi muuhulgas ka faasimõõtmiste mõõtetäpsuse küsimusi, eriti seoses mõõtetrafode mõõtevigadega. Käesolevas aruandes on välja toodud mõõtetrafode mõõtevigade kompenseerimise esialgsed tulemused. Praeguseks kokku kogutud andmete põhjal on tehtud lähendused määramaks mõõtetrafode mõõtevead vastavalt nende talitlusele. Lahendus on lihtsustatud ja vajab täiendamist, kuid esialgsed tulemused näitavad, et mõõtevigade kompenseerimine on võimalik ja erinevate hinnatud suuruste täpsused paranevad tänu sellele. Kuigi siinkohal on küsimust vaadeldud liinide jälgimise seisukohast, mõjutab mõõtetrafode vigade kompenseerimine kõiki laimõõtmiste tulemusi.

Töö eelmises etapis uuriti põhjalikult liini parameetrite määramise võimalusi erinevate liinimudelite põhjal ning hinnati saadud tulemuste kasutatavust. Vähemal määral uuriti ülekandekadude komponentide arvutamist määratud liiniparameetritest. Käesoleva etapi käigus on põhjalikumalt uuritud ülekandekadude arvutamise teoreetilist külge, mille põhjal on eelmise etapi vastavat osa jätkatud.

Üks lahendus, kuidas kasutada faasimõõtmisi ülekandekadude täpsemaks analüüsiks, on kadude vaatlemine liinimudelil. Antud juhul arvutatakse ülekandekaod liinimudeli elementides esinevate kadude summana. Sellise lähenemise puhul on liiniparameetrite ja kadude estimateerimine omavahel väga lähedalt seotud: esialgu leitakse parameetrid ning seejärel erinevat tüüpi ülekandekaod. Seetõttu on ka nende küsimuste teoreetiline käsitus omavahel väga tihedalt seotud. Käesolevas aruandes välja töötatud täpsem kadude analüütiline käsitus aitab selgitada eelmises etapis lahtiseks jäänud küsimusi.

Alapeatükkide lõpus on toodud näited ilmestamiseks erinevaid liinide jälgimise meetodeid ning arvutusi. Arvutuslikud näited on tehtud Aruküla ja Balti EJ alajaamu ühendava liini 511 ning Tartu ja Balti EJ alajaamu ühendava liini 300 faasimõõtmiste andmete alusel. Meteoroloogiliste mõõtmiste andmed on saadud Keskkonnaagentuurilt.

1.1. Ülekandeliini soojusliku talitluse jälgimine meteoroloogiliste mõõtmistega

Ülekandeliini temperatuuri ja lubatavat termilist läbilaskevõimet on võimalik hinnata liini soojusbilansist meteoroloogiliste mõõtmiste ja koormuse alusel. Liini soojuslik talitus sõltub seda läbivast voolust ning konvektiivsest ja kiirguslikust soojusülekandest. Liin jahtub nii konvektiivse kui ka kiirgusliku ülekande teel ning soojeneb liini läbiva voolu ja päiksekiirguse toimel. Lisaks mõjutavad protsessi liini enda omadused.

Ülekandeliinide soojuslikku talitlust kirjeldavad mudelid on välja töötanud nii IEEE kui ka Cigre töögrupid [3, 4]. Viidatud juhendites on toodud rakenduslikud arvutuskäigud, millest saab arvutada kas teatud temperatuurile vastava suurima lubatava voolu või teatud voolule vastava liinijuhhi keskmise temperatuuri. Lahenduse jaoks on vajalik määrata kas suurim lubatud temperatuur või liini koormus antud hetkel, ümbritseva keskkonna temperatuur, tuule kiirus ja suund ning võimalusel teavet päiksekiirguse kohta. Loetletud mõõteandmete ja liini andmete alusel on võimalik lahendada ülekandeliini soojusbilanss.

R&D projekti esimeses osas vaadeldi antud mudeleid lähemalt ja kirjeldati soojusbilansi arvutusi detailselt [1]. Teises etapis viidi läbi näitearvutused, mis hindasid meteoroloogiliste mõõt-

miste andmete alusel ülekandeliini koormusele vastavat soojusbilanssi [2]. Nende mõõtmiste ja arvutuste alusel hinnati liini töötemperatuuri ja termilist läbilaskevõimet. Vaadeldud arvutustes jäi üheks piiranguks asjaolu, et meteoroloogilised mõõtmised olid saadavad ainult tunnikesk-
mistena.

Käesoleva etapi käigus on Keskkonnaagentuurilt saadud mõõtmised 10-minutiliste ajavahemike tagant, mille põhjal on arvutusi korratud. Selline mõõtesagedus vastab küllaltki hästi ülekandeliini soojuslike protsesside ajakonstandile ning võimaldab paremini jälgida soojusliku talitluse ajas muutumist. Arvutusmudelites ei ole sisulisi muudatusi tehtud, erinevad on ainult nendes kasutatavad andmed.

1.1.1. Lähteandmed

Liini soojusliku talitluse mudeldamisel on kombineeritud meteoroloogilised mõõtmised ja faasimõõtmised. Kuna liini soojenemise ja jahtumise ajakonstant on tavaliselt minutite suurusjärgus [3], on antud näites voolu mõõtmise andmed võetud 5-minutilise sammuga. Meteoroloogiliste mõõtmiste andmed on saadud 10-minutilise sammuga. Andmed on saadud neljast vaatluspunktist: Tallinn-Harku, Jõhvi, Narva ja Väike-Maarja.

Liini andmetena eeldavad mõlemad mudelid juhi läbimõõtu, takistust teatud temperatuuril, kiirgusliku soojusülekanne neelduvustegurit (ingl k *absorptivity*) ja kiirgamistegurit (ingl k *emissivity*) ning Cigre mudel eeldab lisaks veel juhtme alumiiniumikihtide arvu, ristlõike pindala ning pinnakihi juhi läbimõõtu. Lisaks juhi omadustele määratakse ära liini paiknemine keskmise asimuudi, laiuskraadi ning kõrgusena merepinnast. Arvutustes on lähtutud juhtmetüübi andmetest, neelduvus- ja kiirgamistegurid on võetud vastavalt 0,8 ja 0,7 ning liini paiknemine on ligikaudselt paika pandud asimuudiga 90°, laiusga 59° ja keskmise kõrgusega merepinnast 75 m.

1.1.2. Arvutuslikud näited

Joonistel 1.1 ja 1.2 on näidatud liini temperatuuri ning joonistel 1.3 ja 1.4 läbilaskevõime estimateerimise tulemused mõlemat mudelit kasutades. Sealjuures joonistel 1.1 ja 1.3 on arvutused 10-minutilise sammuga mõõtmiste ning joonistel 1.2 ja 1.4 tunnikeskiste andmete alusel. Liini temperatuur on leitud iga ilmamõõtmiste vaatluskoha jaoks eraldi ning voolu väärtus on võetud vastavalt vaatluskoha paiknemisele liini suhtes. Läbilaskevõime leidmisel on juhi lubatud maksimaalseks temperatuuriks võetud 60 °C. Graafikul on eraldi välja toodud suurim lubatav läbilaskevõime arvestades kõigi nelja vaatluskoha alusel leitud piiri. Kogu liini läbilaskevõimeks on võetud neljast väärtusest vähim.

1.1.3. Analüüs ja järeldused

Eelmise etapi tulemasid näitasid, et meteoroloogiliste mõõtmiste ja faasimõõtmiste kombineerimisel on võimalik liini soojuslikku talitlust mudeldada. Tulemustest oli näha, et nelja erineva ilmavaatlusjaama andmete alusel hinnatud liinijuhi temperatuur muutub ajas küllaltki sarnaselt. Samuti annavad mõlemad mudelid sarnaseid tulemusi. Käesolevas etapis on vaadeldud samu arvutusi mõõteandmete põhjal, mis on mõõdetud 10-minutilise sammuga, ning üldpildis on saadud väga sarnased tulemused.

Arvutused lühema sammuga mõõdetud andmete põhjal näitavad ajas veidi suuremaid muutusi, kuid interpoleeritud tunnipõhised andmed annavad küllaltki sarnaseid tulemusi. Arvestades paratamatuid määramatusi sellises soojusliku talitluse mudeldamise meetodikas, võib eeldada, et nähtud alla 2-kraadised temperatuuri erinevused on ka mõõtemääramatuse piires. Loomulikult ilmestavad lühema sammuga mõõtmised soojusliku talitluse dünaamikat paremini, kuid ei anna põhjust tunnipõhiste andmete interpoleerimist ebasobivaks lahenduseks pidada.

Liini soojusliku talitluse mudeldamise eesmärgiks ei ole üldjuhul ajalooliste andmete analüüsimine. Kui keskenduda liini temperatuuri määramisele meteoroloogilistest mõõtmistest selleks, et määrata liini hetkelist soojuslikku läbilaskevõimet, on tarvis soojuslikku talitlust mudeldada reaajas. Sellise rakenduse jaoks saab tulemuste põhjal teha kaks järeldust. Kui on saadaval ilmamõõtmiste andmed liini lähedalt mõneminutilise sammuga, on nende põhjal võimalik teatud täpsusega hinnata ülekanaliini hetkelist läbilaskevõimet. Kui lühikese sammuga mõõteandmed ei ole kättesaadavad, aga on olemas tunnipõhised mõõtmised ja lühiajaline tunnipõhine prognoos, saab kasutada eelneva tunni mõõtmiste ja järgneva tunni prognoosi andmete interpoleerimist.

1.2. Mõõtetrafode mõõtmisvigade kompenseerimine

Ülekandevõrku paigaldatud faasimõõturid mõõdavad jälgitavaid suurusid läbi mõõtetrafode. Nii pinge- kui ka volutrafodel on mõõtmisvead, mis mõjutavad mõõdetud väärtuste täpsust. Need vead on süstemaatilised, seadmele omased ja seadme koormusest sõltuvad, mis muudab üldjuhul nende kompenseerimise keeruliseks. Teisalt on need vead pigem ajas püsivad ja nende suurust on võimalik kindlaks teha. Kui iga üksiku mõõtetrafo mõõtmisvead ja koormus (ingl *k burden*) on teada, on võimalik vastavaid faasimõõtmisi nende vigade suhtes korrigeerida.

Mõõtetrafode tootjad viivad läbi seadmete kontrollmõõtmised, mille käigus kontrollitakse teatud partii vastavaust esitatud nõuetele. Taoliste mõõtmiste tulemuste põhjal on võimalik mõõtetrafode erinevatele töörežiimidele vastavaid mõõtevigade hinnata. Taoliselt hinnatud vead sisaldavad omakorda teatud vigu, kuid võimaldavad siiski üldist mõõtmistäpsust suurendada. Mida rohkem andmeid seadmete täpsuse kohta saadaval on, seda parema täpsusega saab mõõtevigasid hinnata ja kompenseerida.

Mõõtetrafode vead on erinevate karakteristikutega, mis sõltuvad tehnoloogilistest erinevustest. Käesolevas aruandes on vaadeldud mõõtevigade kompenseerimist arvestades kõiki olemasolevaid andmeid mõõtetrafode ja nende koormuste kohta. Kuna aruande kirjutamise hetkeks ei olnud kõik andmed saadaval, on tehtud mõningaid lähendusi mõõtetrafode koormuste osas, mis

mõjutavad tulemuste täpsust. Töörežiimile vastavad hinnangulised mõõtevead on leitud neid andmeid lineaarselt interpoleerides või ekstrapoleerides. Voolutrafo sekundaarpoole koormuses on arvestatud primaarpoole koormuse muutumist, kuid ei ole arvesse võetud magneetimisvoolu.

1.2.1. Mõõtmisvigade interpoleerimine ja lähendamine

Mõõtmisvigade kompenseerimist on vaadeldud ülekandeliini jälgimise näitel, mis tähendab, et käsitletud on ühe liini mõlema otsa voolu- ja pingetrafosid. Antud näites on vaatluse all liini 511 mõõtetrafod Aruküla ja Balti alajaamades. See tähendab, et käsitletud on nelja erinevat tüüpi trafosid, millest igäihte on kolm eksemplari. Kõigi mõõtetrafode kohta on saadaval katsemõõtmiste andmed, kuid nendes aruannetes on erinevate sama tüüpi seadmete kohta saadaval erinev kogus andmeid. Üldjuhul on ühest partiiist mõõdetud ühte seadet põhjalikumalt ja ülejäänusid pealiskaudsemalt.

Esimese lähendusena on töödeldud katsemõõtmiste andmeid, nii et ühe põhjalikumalt mõõdetud seadme mõõtevigade kõverat on laiendatud ülejäänud sama partii sama tüüpi seadmetele. See tähendab, et kui näiteks partii esimese seadme mõõtevead on määratud viie erineva primaarahela mõõteväärtusel (0,01, 0,05, 0,2, 1,0 ja 1,2 nimisuurust), siis selle kõvera kuju võetakse antud tüüpi seadmele vastavaks. Kui ülejäänud sama partii seadmete kohta on mõõdetud ainult kaks mõõtepunkti (näiteks 0,05 ja 1,0 nimisuurust), siis skaleeritakse esimese seadme kõverat ülejäänud seadmete vastavate mõõtepunktide alusel.

Katsemõõtmised on üldjuhul tehtud kahe erineva koormuse (*burden*) kohta. Kõigi vaadeldud pingetrafo vead on antud koormustel 25 VA ja 100 VA, ühtede voolutrafo vead koormustel 1 VA ja 5 VA ning teiste voolutrafo vead koormustel 5 VA ja 20 VA. Aruküla alajaamas olevate reaalsete mõõteahelate kohta saadud mittetäieliku informatsiooni põhjal on eeldatavateks voolutrafo koormusteks võetud 1,74 VA ja pingetrafo del 1,35 VA. Balti alajaama mõõteahelate koormuste kohta ei leidunud sellist informatsiooni ning teiste alajaamade sarnaste ahelate põhjal on eeldatavateks koormusteks valitud 1,5 VA voolutrafo del ja 2,0 VA pingetrafo del.

Tegelikule oludele vastavate mõõtevigade leidmise teise sammuna on lähendatud mõõtevigade vastavust mõõteahelate koormustele. Voolutrafo del, mille mõõtevead on määratud koormustel 1 VA ja 5 VA on antud vahemikus interpoleerides leitud mõõtevead, mis vastavad tegelikule ahelate koormusele. Kuna ülejäänud mõõtetrafode tegelikud koormused jäävad mõõdetud koormustevahemikest välja, on saadaolevaid andmeid vastavalt ekstrapoleeritud. Selle põhjal on leitud mõõteahelate koormustele vastavad mõõtmisvigade kõverad, mis annavad mõõtevead sõltuvana primaarpoole mõõtesuurustest.

Näitena on vaadeldud kahe erinevat tüüpi voolutrafo ja ühe pingetrafo kolmiku mõõtevigade kõverate leidmist. Joonisel 1.5 on toodud primaarahela voolust sõltuva vooluamplituudi mõõtevea mõõdetud kõverad koormustel 1 VA ja 5 VA ning interpoleeritud väärtused koormusel $S_b = 1,74$ VA. Sarnaselt on joonisel 1.6 teise voolutrafo mõõtevigade kõverad, kuid koormusele $S_b = 1,5$ VA vastav kõver on koormustel 5 VA ja 20 VA tehtud mõõtmiste andmete põhjal ekstrapoleeritud.

1.3. Ülekandeliini parameetrite määratlemine

Käesolevas alapeatükis on jätkatud eelmises etapis vaadeldud lahendust ülekandeliini parameetrite määramiseks faasimõõtmistest. Selle etapi käigus on üldpõhimõtte samaks jäänud: ülekandeliini vaadeldakse mitmejuhilise liinina arvestades faasijuhtide omavahelist sidestatust. Teoreetiline osa on täpsustunud ning saanud terviklikuma kuju.

Faasorite mõõtmistest liini parameetrite arvutamiseks on olemas erinevatel mudelitel põhinevaid lahendusi. Enamik lähenemisi põhineb sellel, et liine modelleeritakse kui üksikuid sõltumatuid juhte [5, 6, 7], mis on teoreetiliselt väga lihtsalt rakendatav lahendus. Taoline lihtsus eeldab, et juhtide omavahelise sidestatuse saab arvestamata jätta. Aruandes on faasimõõtmistest liiniparameetrite leidmist lähemalt uuritud, nii et juhtide omavahelise sidestatuse mõjud on arvesse võetud.

Mitmejuhilise liini mudelis on liinijuhtide omavaheline sidestatus mudeldatud vastastikustes takistustes ja juhtivuses. See aga suurendab tundmatute parameetrite arvu ning muudab faasimõõtmiste tulemustest liini parameetrite arvutamise keerulisemaks. Selle probleemi lahendamiseks vaadeldi ja arendati eelmises etapis modaalteisendustel põhinevat lahendust [8, 9].

Antud juhul eemaldatakse suuruste omavaheline sidestatus lineaarse teisendusega, mis viib faasisuurused üle modaalsuurusteks. Kui liinivõrrandid on modaalsuuruste suhtes lahendatud, leitakse pöördteisenduse abil lahendused faasisuurustele.

Modaalteisenduses kasutatav teisendusmaatriks on üldjuhul tundmatu suurus, kuna see sõltub ise liini parameetritest. Eelmises etapis näidati numbrilise tundlikkusanalüüsi abil, et teisendusmaatrikseid mõjutavad keskkonnamuutustest tingitud liiniparameetrite muutused piisavalt nõrgalt, et need võib konkreetse liini jaoks konstantseteks lugeda. Käesolevas aruandes on selle järelduse kinnitamiseks toodud üldisem analüütiline tõestus. Antud lähenemise korral saab arvutada teisendusmaatriksid liinile projekteeritud parameetrite alusel ühekordselt. Sõltumata väikestest muutustest liini talitluse käigus, on antud teisendusmaatriksite abil võimalik leida mitmejuhilise ülekandeliini parameetrid.

Esitletud meetodi abil saab leida ülekandeliini takistuste ja juhtivuste vähendatud maatriksid. Need maatriksid aga ei anna teatud otsitud suurusi (nagu juhi aktiivtakistus) ilmutatud kujul, vaid on vaja vähendatud maatriksitest eraldada. Näiteks on ülekandeliini läbilaskevõime jälgimiseks vaja suure täpsusega määrata just liinijuhi enda aktiivtakistus. Selleks on tuletatud võrrandid vähendatud takistuste ja juhtivuste maatriksitest otsitavate suuruste eraldamiseks. Näidisarvutused vaatlevadki ainult juhi aktiivtakistuse määramist.

1.3.1. Kahejuhilise ülekandeliini võrrandid

Käesolev alapeatükk võtab lühidalt kokku jaotatud parameetritega kahejuhilise ülekandeliini mudeldamise. Jaotatud parameetritega liini vaadeldakse kui jada lõputult lühikestest neliklemmidest. Iga segmenti sellest võib vaadata kui teatud jadatakistuse ja põikjuhtivusega Γ -aseskeemi. Iga sellise segmenti parameetrid antakse kujul $\underline{z}dl$ ja $\underline{y}dl$, kus $\underline{z} = r + jx$ on takistus ja $\underline{y} = g + jb$ juhtivus pikkusühiku kohta ning dl tähistab lõpmata lühikest liinilõigu pikkust.

Pinged ja voolud sellise liini otstes (vool ühes juhis ja pinge juhtide vahel) on omavahel järgnevas sõltuvuses

$$\underline{U}(l) = \cosh(\underline{\gamma}l)\underline{U}(0) + \underline{z}_c \sinh(\underline{\gamma}l)\underline{I}(0), \quad (1.1)$$

$$\underline{I}(l) = \frac{1}{\underline{z}_c} \sinh(\underline{\gamma}l)\underline{U}(0) + \cosh(\underline{\gamma}l)\underline{I}(0), \quad (1.2)$$

kus $\underline{U}(l)$ ja $\underline{I}(l)$ on pinge- ja voolufaasorid kaugusel l liini lõpust selle alguse poole ($\underline{U}(0)$ ja $\underline{I}(0)$ on faasorid liini lõpus). Ühikulisel liiniparameetrid – takistus ja juhtivus – sisalduvad leviteguris ja lainetakistuses kujul $\underline{\gamma} = (\underline{z}\underline{y})^{1/2}$ ja $\underline{z}_c = (\underline{z}/\underline{y})^{1/2}$.

Teades pinget ja voolu vaid ühes liini otsas ning liini parameetreid, saab eelnevad võrrandid lahendada. Kui aga on teada pinged ja voolud liini mõlemas otsas, on võimalik arvutada liini parameetrid. Kirjutades eraldi välja võrrandite (1.1) ja (1.2) summa ning vahe saame

$$\begin{aligned}\underline{U}(l) + z_c \underline{I}(l) &= [\underline{U}(0) + z_c \underline{I}(0)] e^{\gamma l}, \\ \underline{U}(l) - z_c \underline{I}(l) &= [\underline{U}(0) - z_c \underline{I}(0)] e^{-\gamma l}.\end{aligned}$$

Esimesest võrrandist saab avaldada lainetakistuse

$$z_c = \frac{\underline{U}(0)e^{\gamma l} - \underline{U}(l)}{\underline{I}(l) - \underline{I}(0)e^{\gamma l}},$$

mille sisestamisel teise võrrandisse avaldub

$$\underline{U}(l) - \underline{I}(l) \frac{\underline{U}(0)e^{\gamma l} - \underline{U}(l)}{\underline{I}(l) - \underline{I}(0)e^{\gamma l}} = e^{-\gamma l} \left(\underline{U}(0) - \underline{I}(0) \frac{\underline{U}(0)e^{\gamma l} - \underline{U}(l)}{\underline{I}(l) - \underline{I}(0)e^{\gamma l}} \right).$$

Kui korrutada võrrand läbi murru nimetajaga saame

$$2\underline{U}(l)\underline{I}(l) + 2\underline{U}(0)\underline{I}(0) = (\underline{U}(0)\underline{I}(l) + \underline{U}(l)\underline{I}(0)) (e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}),$$

millest avalduvad [8]

(1.3)

(1.4)

1.3.2. Mitmejuhilise ülekandeliini parameetrid

Ülekandeliini parameetrid sõltuvad liinijuhtide omadustest, liini geometriast ja maapinna eritakistusest [10]. Juhtide takistus ja riipe sõltuvad lisaks ka temperatuurist. Käesolevas tekstis mudeldatakse maapinna juhtivuse mõju liini takistustele Dubantoni lahendusega [11]. Selleks defineeritakse kõigepealt fiktiivne maapinna juhtivust arvestav tasand kompleksarvulisel sügavusel \underline{p}

$$\underline{p} = \sqrt{\frac{\rho}{j\omega\mu_0}}, \quad (1.5)$$

kus $\omega = 2\pi f$ on nurksagedus ja f süsteemi sagedus, μ_0 on vaakumi magnetiline läbitavus ja ρ on maa eritakistus [11].

Liinijuhtide paiknemine määratakse ära kõrgusega maapinnast ja juhtide maapinnaprojektsioonide omavaheliste kaugustega, kujutatud joonisel 1.8 [12]. Juhi i keskmine kõrgus (arvestades ripet) tähistatakse kui h_i ja juhtide i ja j projektsioonide vaheline kaugus maapinnal kui d_{ij} . Sedasi on juhtide i ja j vaheliseks kauguseks $D_{ij} = [(h_i - h_j)^2 + d_{ij}^2]^{1/2}$. Suurus D_{ii} on juhi raadius või keskmine geomeetriline raadius, kui on tegemist lõhisfaasidega liiniga [12, 13].

Juhi kujutis (ingl k *image*) on kujuteldav juht, mis paikneb samal sügavusel maa all kui on tegeliku juhi keskmine kõrgus maapinna kohal. Juhi i ja kujutise j vaheline kaugus on $H_{ij} = [(h_i + h_j)^2 + d_{ij}^2]^{1/2}$. Lisaks arvestatakse kaugust $\underline{F}_{ij} = [(h_i + h_j + 2p)^2 + d_{ij}^2]^{1/2}$, kus $h_i + p$ on juhi kõrgus fiktiivsest maapinna juhtivuse tasandist [11].

Kirjeldatud suuruste alusel defineeritakse maatriksid \mathbf{A} ja \mathbf{P} järgnevate elementidega [10, 11]

$$\mathbf{A}_{ij} = \ln \frac{F_{ij}}{D_{ij}}, \quad (1.6)$$

$$\mathbf{P}_{ij} = \ln \frac{H_{ij}}{D_{ij}}, \quad (1.7)$$

nii et \mathbf{A} määratleb liikmed Dubantoni võrrandites ja \mathbf{P} potentsiaalikoefitsientide maatriksi elemendid [11, 12]. Maatriksite järgu määrab ära liini moodustavate juhtide koguarv, mille hulka kuuluvad nii faasi- kui ka neutraaljuhgid.

Liinijuhtide oma- ja vastastikusi takistusi ja juhtivusi sisaldavad maatriksid avalduvad järgmiselt

$$(1.8)$$

$$(1.9)$$

kus $\langle z_i \rangle$ on juhtide endi pikitakistusi sisaldav diagonaalne maatriks ja ε_0 on vaakumi dielektriline läbitavus [10, 11]. Kõik aktiivjuhtivused maatriksis Y_0 võrdsustatakse üldjuhul nulliga.

Kuna üldjuhul arvutustes neutraalijuhtide pingeid ega voole ei arvestata, vähendatakse ka takistuste ja juhtivuste maatriksi järku, nii et see on võrdne faasijuhtide arvuga. Näiteks kirjeldaksid üheaheelalist kahe neutraalijuhiga kolmefaasilist liini järgmised takistused

(1.10)

kus a, b, c tähistavad faasi- ning u, w neutraalijuhte. Maatriks on sümmeetriline, nii et $z_{ab} = z_{ba}$ jne. Vähendatud takistuste maatriks järguga kolm leitakse Kroni teisenduse abil [12]

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_1 - \mathbf{Z}_2 \mathbf{Z}_4^{-1} \mathbf{Z}_3. \quad (1.11)$$

Sama rakendatakse potentsiaalikoefitsientide maatriksil, millest avaldub vähendatud juhtivuste maatriks

(1.12)

kus maatriks \mathbf{P} on sama struktuuriga kui \mathbf{Z}_0 võrrandis (1.10). Vähendatud takistuste ja juhtivuste maatriksid \mathbf{Z} ja \mathbf{Y} säilitavad sümmeetria ja omandavad samasuguse struktuuri kui maatriks \mathbf{Z}_1 võrrandis (1.10). Lahenduskäik on laiendatav ka mitmeaheelalistele liinidele.

Üheaheelalise liini transponeerimise korral avalduvad selle vähendatud takistuste maatriksi elemendid järgnevalt [12]

(1.13)

kus L on liini kogupikkus ja l_1, l_2, l_3 on lõikude pikkused, mille järel on transponeeringud. Sarnaselt avaldub ka vähendatud juhtivuste maatriks \mathbf{Y}_T .

1.3.3. Mitmejuhilise ülekandeliini võrrandid

Näitena vaadeldaval üheahelalisel kolmefaasilisel liinil antakse faasipinged ja -voolud liini suvalises punktis järgmiselt [14, 15, 12]

$$\mathbf{u}(l) = \begin{bmatrix} \underline{U}_a(l) \\ \underline{U}_b(l) \\ \underline{U}_c(l) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}(l) = \begin{bmatrix} \underline{I}_a(l) \\ \underline{I}_b(l) \\ \underline{I}_c(l) \end{bmatrix}, \quad (1.14)$$

kus l on vahemaa liini lõpust selle alguse suunas ning $\underline{U}_i(l)$ ja $\underline{I}_i(l)$ on pinge ja vool faasis i .

Võrrandites (1.11), (1.12) ja (1.14) antud suurustega kirjeldatud ahela jaoks saab Kirchhoffi seadustest kirjutada [14]

$$\frac{d\mathbf{u}(l)}{dl} = \mathbf{Z}\mathbf{i}(l), \quad (1.15)$$

$$\frac{d\mathbf{i}(l)}{dl} = \mathbf{Y}\mathbf{u}(l), \quad (1.16)$$

mille saab edasi diferentseerida kujule

$$\frac{d^2\mathbf{u}(l)}{dl^2} = \mathbf{Z}\mathbf{Y}\mathbf{u}(l), \quad (1.17)$$

$$\frac{d^2\mathbf{i}(l)}{dl^2} = \mathbf{Y}\mathbf{Z}\mathbf{i}(l). \quad (1.18)$$

Siinkohal on näha, et ei leidu üheseid lahendusi faasisuuruste suhtes

$$\frac{d\underline{U}_a(l)}{dl} : \quad (1.19)$$

$$\frac{d^2\underline{U}_a(l)}{dl^2} : \quad (1.20)$$

kus $\mathbf{\Gamma}^2 = \mathbf{Z}\mathbf{Y}$. See-eest leidub formaalne lahend võrranditele (1.17) ja (1.18) maatriksite \mathbf{Z} ja \mathbf{Y} suhtes.

Maatriksit $\mathbf{\Gamma} = (\mathbf{Z}\mathbf{Y})^{1/2}$ nimetatakse ka levimaatriksiks ning maatriksnotatsiooni ekvivalent lainetakistusele on $\mathbf{Z}_C = \mathbf{\Gamma}^{-1}\mathbf{Z}$. Võrrandid (1.17) ja (1.18) lahenduvad järgmiselt [15]

$$(1.21)$$

$$(1.22)$$

kus $\cosh \mathbf{M} = [\exp(\mathbf{M}) + \exp(-\mathbf{M})]/2$ ja $\sinh \mathbf{M} = [\exp(\mathbf{M}) - \exp(-\mathbf{M})]/2$.

Pinge ühes faasis asukohas l avaldub sellest järgmiselt

$$\underline{U}_a(l) \tag{1.23}$$

mis näitab veelgi selgemalt faaside vastasikust sidestatust. Võrrandist (1.23) on näha, et mitmejuhilist liini ei õnnestu väga täpselt kahejuhilise liini võrranditega mudeldada. Kui seda siiski teha, peab arvestama mudeli parameetrite füüsilise sisu muutustega.

1.3.4. Modaalanalüüs

Üldjuhul arvutatakse takistuse ja juhtivuse vähendatud maatriksid \mathbf{Z} ja \mathbf{Y} liini andmete põhjal, et nende alusel liini talitlust (nt pingete ja voolude väärtusi) arvutada. Need arvutused sisaldavad alati teatud lihtsustusi ja ei saa lõpuni arvestada kõikvõimalikke muutusi tulevikus. Kui aga liini pingete ja voolude faasorid liini mõlemas otsas on teada, on võimalik pöördlahendus ehk liini parameetrite arvutamine mõõtmistest. Selliselt leitud liiniparameetritest oleks võimalik leida juba nendega seotud suurusi, nagu võimsuskaod või liini temperatuur.

Modaalanalüüs põhineb voolu- ja pingefaasorite lineaarteisendusel, mis viib sidestatud faasisuurused üle lahtisidestatud modaalsuurusteks [16]. Modaalsuurusi tähistatakse

$$\mathbf{u}^m(l) = \begin{bmatrix} \underline{U}_0(l) \\ \underline{U}_1(l) \\ \underline{U}_2(l) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}^m(l) = \begin{bmatrix} \underline{I}_0(l) \\ \underline{I}_1(l) \\ \underline{I}_2(l) \end{bmatrix}, \tag{1.24}$$

kus indeksid 0, 1 ja 2 tähistavad moode.

Faasi- ja modaalsuurusi seob omavahel teisendusmaatriks, nii et [14]

$$\mathbf{u}(l) = \mathbf{T}_u \mathbf{u}^m(l), \tag{1.25}$$

$$\mathbf{i}(l) = \mathbf{T}_i \mathbf{i}^m(l). \tag{1.26}$$

Asendades need võrranditesse (1.17) ja (1.18) ning eeldades, et teisendusmaatriks on asukohast l sõltumatu, võib kirjutada

$$\tag{1.27}$$

$$\tag{1.28}$$

Modaalanalüüs põhineb maatriksite \mathbf{ZY} ja \mathbf{YZ} diagonaliseerimisel. See tähendab, et teisendusmaatriksid \mathbf{T}_u ja \mathbf{T}_i valitakse selliselt, et tagada [14, 16]

$$(1.29)$$

$$(1.30)$$

kus $\langle \boldsymbol{\lambda}_u \rangle$ ja $\langle \boldsymbol{\lambda}_i \rangle$ on diagonaalmaatriksid, mille elementideks on vastavalt maatriksite \mathbf{ZY} ja \mathbf{YZ} omaväärtused. On teada, et maatriksid \mathbf{Z} ja \mathbf{Y} on mõlemad sümmeetrilised, nii et $\mathbf{ZY} = (\mathbf{YZ})^\top$ ja

$$\langle \boldsymbol{\lambda}_u \rangle = \langle \boldsymbol{\lambda}_i \rangle = \langle \boldsymbol{\lambda} \rangle = \begin{bmatrix} \lambda_0 & & \\ & \lambda_1 & \\ & & \lambda_2 \end{bmatrix}. \quad (1.31)$$

Seejärel defineeritakse levimaatriks

$$\boldsymbol{\Gamma} = (\mathbf{ZY})^{1/2}, \quad (1.32)$$

mille omaväärtused on modaalsed levitegurid γ_0 , γ_1 ja γ_2 [14]. Omaväärtuste omaduste põhjal ilmneb, et $\langle \boldsymbol{\gamma}^2 \rangle = \langle \boldsymbol{\lambda}_u \rangle = \langle \boldsymbol{\lambda}_i \rangle$. Modaalne lainetakistusmaatriks defineeritakse kujul [14]

$$(1.33)$$

Maatriksi $\langle \mathbf{z}_c \rangle$ diagonaalsus on kontrollitav eelnevate definitsioonide alusel.

Seejärel saab võrrandid (1.27) ja (1.28) kirjutada kujul

$$\frac{d^2 \mathbf{u}^m(l)}{dl^2} = \langle \boldsymbol{\gamma}^2 \rangle \mathbf{u}^m(l), \quad (1.34)$$

$$\frac{d^2 \mathbf{i}^m(l)}{dl^2} = \langle \boldsymbol{\gamma}^2 \rangle \mathbf{i}^m(l). \quad (1.35)$$

Nende diferentsiaalvõrrandite lahendamine annab võrrandid kolmefaasilise jaotatud parameetritega liini modaalsuurustele, mille saab maatrikskujul kirja panna järgmiselt [14]

$$\mathbf{u}^m(l) = \cosh \langle \boldsymbol{\gamma} l \rangle \mathbf{u}^m(0) + \langle \mathbf{z}_c \rangle \sinh \langle \boldsymbol{\gamma} l \rangle \mathbf{i}^m(0), \quad (1.36)$$

$$\mathbf{i}^m(l) = \langle \mathbf{z}_c \rangle^{-1} \sinh \langle \boldsymbol{\gamma} l \rangle \mathbf{u}^m(0) + \cosh \langle \boldsymbol{\gamma} l \rangle \mathbf{i}^m(0), \quad (1.37)$$

kus

$$\cosh\langle\gamma l\rangle = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_0 l) & & \\ & \cosh(\gamma_1 l) & \\ & & \cosh(\gamma_2 l) \end{bmatrix} \text{jne.} \quad (1.38)$$

Need võrrandid saab omakorda modaalsuuruste jaoks lahti kirjutada

$$\underline{U}_m(l) = \quad (1.39)$$

$$\underline{I}_m(l) = \quad (1.40)$$

Teades modaalpingeid ja -voole liini otstes, saab kogu liini pikkuse jaoks suurused γ_m ja z_{cm} (ja vastavalt $\langle\gamma\rangle$ ning $\langle z_c\rangle$) avaldada järgmiselt [8]

$$(1.41)$$

$$(1.42)$$

kus L on liini pikkus ja m tähistab moodi (0, 1 või 2).

Faasisuuruste jaoks saab takistuse ja juhtivuse vähendatud maatriksid leida pöördteisendustest [14]

$$(1.43)$$

$$(1.44)$$

Faasimõõtmistel põhinevates liiniparameetrite leidmise meetodites jäetakse transponeeritud liinide puhul tihti faasipingete ja -voolude vastastikune sidestatus arvestamata ja faasijuhte käsitletakse sarnaselt lahtisidestatud modaalsuurustega. Sellisel juhul võib kirjutada $\mathbf{u}^m(l) = \mathbf{u}(l)$ ning $\mathbf{i}^m(l) = \mathbf{i}(l)$ ja leida liini parameetrid võrranditest (1.41) ja (1.42). Samuti tehakse selliseid eelduseid sümmeetriliste komponentide kohta, mis puhul võib nende alusel sarnaselt liini parameetreid arvutada. Sellises lahenduses avalduvad juhi pikitakistus ja põikjuhtivus faasis i (või sümmeetrilises komponendis) järgmiselt

$$z_i = \gamma_i z_{ci} = r_i + jx_i, \quad (1.45)$$

$$y_i = \frac{\gamma_i}{z_{ci}} = g_i + jb_i. \quad (1.46)$$

1.3.5. Modaalteisendusmaatriksite muutlikkus

Muutlikes oludes, kui välisõhu temperatuur ja voolu toimel soojenemine varieeruvad ajas, muutub ka juhtide temperatuur. Muutused juhi temperatuuris mõjutavad aktiivtakistust ning ripet, mis omakorda muudab liini geometriat maa suhtes ja sellest sõltuvaid parameetreid.

Kui arvutada liini parameetreid alampeatükis 1.3.2 kirjeldatud põhimõtetel, tuleb määrata maapinna eritakistuse väärtus. See tähendab, et eeldatakse, et kogu liinikoridoris on maapinna eritakistus ühtlane. Nii see eeldus kui ka antud väärtuse määramine on tõenäoliselt ühed suuremad lähendused, mida liiniparameetreid arvutades tehakse.

Nii talitluse käigus muutuvad olud kui ka maapinna eritakistuse määramise vead mõjutavad liiniparameetrite maatriksitele arvutatud väärtusi. Küll aga võib eeldada, et sellised muutused mõjutavad kõigi faasijuhtidega seotud suurusi ühtmoodi, ja püstitada hüpoteesi, et muutuste mõju modaalteisendusmaatriksitele on tühine. Eelmises etapis analüüsiti seda hüpoteesi numbriliselt, uurides teisendusmaatriksite tundlikkust nimetatud muutustele [2, 17]. Käesolevas aruandes on hüpoteesi tõesust kontrollitud analüütiliselt.

Iga realistliku ülekandeliini puhul võib eeldada, et $|p| \gg h_i, d_{ij}$ ning lähendada maatriksi \mathbf{A} elemente järgmiselt [11]

$$\mathbf{A}_{ij} \cong \ln \frac{p}{D_{ij}}. \quad (1.47)$$

Muutused maapinna juhtivuses määratakse suhtelise muutusega δ_ρ , nii et \mathbf{A} elemendid muutuvad vastavalt

$$(1.48)$$

mida võib vaadelda kui skalaari liitmist maatriksile ehk $\mathbf{A}' = \mathbf{A} + \Delta A_\rho$.

Temperatuurimuutused mõjutavad aktiivtakistusi faaside sisemistes takistuses, nii et

$$(1.49)$$

kus $\text{Re}\{\langle \mathbf{z}_i \rangle\}$ on sisemise takistuse aktiivkomponent ja δ_r on suhteline temperatuurist sõltuv muutus juhi aktiivtakistuses. Suhtelise muutuse võib avaldada kui $\delta_r = \alpha \Delta T$, kus ΔT on juhi temperatuuri muutus ning α aktiivtakistuse temperatuurikoefitsient.

Nagu ilmneb lähendusest võrrandis (1.47), võib temperatuurisõltuvuse maatriksis \mathbf{A} arvestamata jätta. Küll aga on sellised muutused olulised maatriksis \mathbf{P} . Faasijuhtide ja nende kujutiste

vahelistes kaugustes $(h_i + h_j)^2 \gg d_{ij}^2$, nii et võib teha lähenduse

(1.50)

kus δ_h on suhteline temperatuurist sõltuv muutus juhi kõrguses. Temperatuurimuutuste mõjusid analüüsisid tehakse eeldus, et suhteline muutus on kõigis juhtides võrdne. Ka siin avaldub muutus maatriksile skalaari liitmisena kujul $\mathbf{P}' = \mathbf{P} + \Delta P_h$.

Temperatuurist sõltuvat muutust ülekandeliini juhtide keskmises kõrguses h_i või lihtsustatult hinnata järgmiselt

kus σ on keskmine vahemaa kahe masti vahel, φ on liini andmetest arvutatud keskmine riipe teatud temperatuuril ning ξ on termilise pikenemise tegur [18].

Jätkates eelnevalt vaadeldud näitega liini mudeldamisest avaldub liini takistuste vähendatud maatriks järgmiselt

(1.51)

kus $\underline{k} = j\omega\mu_0(2\pi)^{-1}$, $\langle \mathbf{z}_p \rangle$ on faasijuhtide sisemisi takistusi sisaldav diagonaalmaatriks, $\langle \mathbf{z}_n \rangle$ neutraalijuhtide sisemiste takistuste diagonaalmaatriks ja maatriks \mathbf{A} on jaotatud blokkideks samamoodi kui \mathbf{Z}_0 võrrandis (1.10).

Kui eeldada, et neutraalijuhtide sisemised takistused on võrdsed (ehk $\langle \mathbf{z}_n \rangle = z_n \mathbf{I}$) ja arvestada, et \mathbf{A}_4 on 2×2 maatriks, võib pöörmaatriksi võrrandis (1.51) avaldada kujul [19]

(1.52)

kus $a_1 = z_n/\underline{k} + \text{tr} \mathbf{A}_4$ ja $a_2 = \underline{k}/(2z_n)[(\text{tr} \mathbf{A}_4)^2 - \text{tr}(\mathbf{A}_4^2)]$. Seejärel avaldub vähendatud takis-

tuste maatriks järgmiselt

$$\mathbf{Z} = \langle \mathbf{z}_p \rangle + \underline{k} \mathbf{A}_1 - \underline{k} c_1 \mathbf{A}_2 \mathbf{A}_3 + \underline{k} c_2 \mathbf{A}_2 \mathbf{A}_4 \mathbf{A}_3. \quad (1.53)$$

Arvestades kõrgeimat järku muutusi temperatuurimuutustest ja maapinna erikatistuse ebatäpsusest avaldub vähendatud takistuste maatriks kujul

$$(1.54)$$

kus \mathbf{E}_{mn} on $m \times n$ maatriks, mille iga element on üks ning c'_1, c'_2 on c_1, c_2 korrigeeritud vastavalt muutustele maatriksis \mathbf{A}_4 ja neutraali takistuses z_n . Kõrgemat järku muutused suurustes $\Delta A_\rho = \ln \sqrt{1 + \delta_\rho}$ võib jätta arvestamata iga realistliku δ_ρ väärtuse korral.

Defineerides maatriksi

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{au} + \mathbf{A}_{aw} & \mathbf{A}_{au} + \mathbf{A}_{aw} & \mathbf{A}_{au} + \mathbf{A}_{aw} \\ \mathbf{A}_{bu} + \mathbf{A}_{bw} & \mathbf{A}_{bu} + \mathbf{A}_{bw} & \mathbf{A}_{bu} + \mathbf{A}_{bw} \\ \mathbf{A}_{cu} + \mathbf{A}_{cw} & \mathbf{A}_{cu} + \mathbf{A}_{cw} & \mathbf{A}_{cu} + \mathbf{A}_{cw} \end{bmatrix}, \quad (1.55)$$

saab võrrandis (1.54) ilmnenud korrutised avaldada järgmiselt $\mathbf{A}_2 \mathbf{E}_{23} = \mathbf{W}$, $\mathbf{A}_2 \mathbf{A}_4 \mathbf{E}_{23} = (\mathbf{A}_{uu} + \mathbf{A}_{uw}) \mathbf{W}$, $\mathbf{E}_{32} \mathbf{A}_3 = \mathbf{W}^T$, $\mathbf{E}_{32} \mathbf{A}_4 \mathbf{A}_3 = (\mathbf{A}_{uu} + \mathbf{A}_{uw}) \mathbf{W}^T$ ja $\mathbf{A}_2 \mathbf{E}_{22} \mathbf{A}_3 = \mathbf{W} \mathbf{W}^T / 3$.

Vähendatud juhtivuste maatriks on

$$(1.56)$$

kus $\underline{m} = (j\omega 2\pi \varepsilon_0)^{-1}$. Selle pöördväärtuse saab kirjutada kujul

$$(1.57)$$

kus $\underline{d}_2 = 2[(\text{tr} \mathbf{P}_4)^2 - \text{tr}(\mathbf{P}_4^2)]^{-1}$ ja $\underline{d}_1 = \underline{d}_2 \text{tr} \mathbf{P}_4$.

Viies sisse temperatuurist sõltuvad muutused avaldub

(1.58)

kus $\underline{d}'_1, \underline{d}'_2$ on $\underline{d}_1, \underline{d}_2$ korrigeeritud vastavalt muutustele maatriksis \mathbf{P}_4 . Sarnaselt maatriksiga \mathbf{W} võib defineerida samasuguse struktuuriga maatriksi \mathbf{Q} , milles elemendid \mathbf{A}_{ij} on asendatud vastavate väärtustega \mathbf{P}_{ij} . Selle põhjal saab kirjutada $\mathbf{P}_2 \mathbf{E}_{23} = \mathbf{Q}$ jne.

Varasemalt selgus, et

$$\mathbf{T}_U^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{Y} \mathbf{T}_U = \mathbf{T}_I^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{Z} \mathbf{T}_I = \langle \gamma^2 \rangle. \quad (1.59)$$

Selle võrrandi saab kirjutada kujul

$$\mathbf{T}_U^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{T}_I \mathbf{T}_I^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{T}_U = \mathbf{T}_I^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{T}_U \mathbf{T}_U^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{T}_I = \langle \gamma \rangle^2, \quad (1.60)$$

kus kommutatiivsus kehtib, kui $\mathbf{T}_U^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{T}_I$ ja $\mathbf{T}_I^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{T}_U$ on diagonaalsed. Samal ajal

(1.61)

nii et $\mathbf{T}_U^{-1} \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{T}_I$ ja $\mathbf{T}_I^{-1} \mathbf{Z}^{-1} \mathbf{T}_U$ on samuti diagonaalsed.

Modaalteisendusmaatriksite funktsiooniks on maatriksite diagonaliseerimine, mistõttu võib nende täpsuse ühe mõõduna käsitleda seda, kui suured on diagonaliseeritavate maatriksite kõrval-
elemendid. Selle põhjal võib analüüsida, kui palju muutused maatriksites \mathbf{Z}' ja \mathbf{Y}' mõjutavad seda, kui hästi sobivad maatriksite $\mathbf{Z} \mathbf{Y}$ ja $\mathbf{Y} \mathbf{Z}$ põhjal leitud modaalteisendusmaatriksid \mathbf{T}_U ja \mathbf{T}_I maatriksite $\mathbf{Z}' \mathbf{Y}'$ ja $\mathbf{Y}' \mathbf{Z}'$ diagonaliseerimiseks.

Temperatuurimuutuste ja maapinna eritakistuse ebatäpsuse mõjud avalduvad põhiliselt läbi maatriksite \mathbf{I} , \mathbf{E}_{33} , \mathbf{W} , \mathbf{W}^\top , $\mathbf{W} \mathbf{W}^\top$, \mathbf{Q} , \mathbf{Q}^\top ja $\mathbf{Q} \mathbf{Q}^\top$ diagonaliseeruvuse ning ΔA_ρ , ΔZ_r , ja ΔP_h suuruse. Väiksemad mõjud tulenevad ka muutustest suurustes c_1 , c_2 , \underline{d}_1 ja \underline{d}_2 .

Eelnimetatud diagonaliseerimised ei ole pärast muutusi enam ideaalsed, kuid resulteerivate maatriksite kõrvalelemendid on piisavalt väiksed. Isegi väga suured vead maapinna eritakistuse määramises (kuni sadades protsentides) ja temperatuurimuutused kümnetes kraadides (mõlemas suunas) tähendavad, et muutused ΔA_ρ , ΔZ_r ja ΔP_h on suhteliselt oluliselt väiksemad kui

maatriksite \mathbf{A} , \mathbf{Z}_i ja \mathbf{P} vastavad elemendid. Kuna vaadeldav täpsuse mõõt sõltub veel nende kahe teguri mõjude korrutisest, võib eeldada, et antud muutuste mõjud on tühised.

Kokkuvõttes tähendab see, et teatud ülekandeliinile võib arvutada modaalteisendusmaatriksid \mathbf{T}_U ja \mathbf{T}_I selle parameetrite maatriksite korrutistest \mathbf{ZY} ja \mathbf{YZ} ning eeldada, et need teisendusmaatriksid ei sõltu temperatuurimuutustest ega vigadest maapinna eritakistuse määramisel. Sama järelalus eelmises etapis tehtud numbrilise analüüsist ühe liinimudeli näitel [2, 17].

1.3.6. Liinijuhhi aktiivtakistuse määramine

Ülekandeliini takistused sümmeetriliste komponentide teisenduses avalduvad järgmiselt

$$\mathbf{Z}_S = \mathbf{T}_S^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{T}_S, \quad (1.62)$$

kus

$$\mathbf{T}_S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j4\pi/3} & e^{j2\pi/3} \\ 1 & e^{j2\pi/3} & e^{j4\pi/3} \end{bmatrix}. \quad (1.63)$$

Maatriksid $\mathbf{Z}_S = \mathbf{T}_S^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{T}_S$ ja $\mathbf{Y}_S = \mathbf{T}_S^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{T}_S$ sisaldavad ülekandeliini päri-, vastu- ja nulljärgnevustakistusi ja -juhtivusi ning on otse arvutatavad vähendatud takistuste ja juhtivuste maatriksitest \mathbf{Z} ja \mathbf{Y} [10]. Päri- ja vastujärgnevustakistus avalduvad järgmiselt

$$\underline{z}_S = (\mathbf{Z}_S)_{22} = (\mathbf{Z}_S)_{33} = (\mathbf{Z}_{aa} + \mathbf{Z}_{bb} + \mathbf{Z}_{cc} - \mathbf{Z}_{ab} - \mathbf{Z}_{bc} - \mathbf{Z}_{ac})/3, \quad (1.64)$$

ja nulljärgnevustakistus on

$$\underline{z}_0 = (\mathbf{Z}_S)_{11} = (\mathbf{Z}_{aa} + \mathbf{Z}_{bb} + \mathbf{Z}_{cc} + 2\mathbf{Z}_{ab} + 2\mathbf{Z}_{bc} + 2\mathbf{Z}_{ac})/3, \quad (1.65)$$

kus 11 jne on maatriksi elementide rea ja veeru indeksid. Ülejäänud takistused ja juhtivused sümmeetriliste komponentide teisenduses leiduvad vastavates maatriksite \mathbf{Z}_S ja \mathbf{Y}_S elementides.

Elementi \underline{z}_S defineerivas avaldises esinevad vahed, nagu näiteks $\mathbf{Z}_{aa} - \mathbf{Z}_{ab}$, saab lahti kirjutada kujul

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_{aa} - \mathbf{Z}_{ab} &= [(\mathbf{Z}_1)_{aa} - (\mathbf{Z}_K)_{aa}] - [(\mathbf{Z}_1)_{ab} - (\mathbf{Z}_K)_{ab}] \\ &= (\mathbf{Z}_1)_{aa} - (\mathbf{Z}_1)_{ab} + (\mathbf{Z}_K)_{ab} - (\mathbf{Z}_K)_{aa}, \end{aligned} \quad (1.66)$$

kus vähendatud takistuste maatriks on avaldatud kujul $\mathbf{Z} = \langle \mathbf{z}_p \rangle + \underline{k}[\mathbf{A}_1 - \mathbf{A}_2(1/\underline{k}\langle \mathbf{z}_n \rangle) +$

$\mathbf{A}_4)^{-1}\mathbf{A}_3]$, arvestades et $\underline{k} = j\omega\mu_0(2\pi)^{-1}$, $\langle \mathbf{z}_p \rangle$ ja $\langle \mathbf{z}_n \rangle$ on vastavalt faasi- ja neutraaljuhtide sisemisi takistusi sisaldavad diagonaalmaatriksid ning maatriks \mathbf{A} on sama struktuuriga kui \mathbf{Z}_0 võrrandis (1.10). Antud juhul $\mathbf{Z}_1 = \langle \mathbf{z}_p \rangle + k\mathbf{A}_1$ ja $\mathbf{Z}_K = k\mathbf{A}_2 (\langle \mathbf{z}_n \rangle / k + \mathbf{A}_4)^{-1}\mathbf{A}_3$.

Ümberjärjestatud summas esimesena ilmutuva vahe saab lahti kirjutada järgmiselt

$$(1.67)$$

kus \underline{z}_{ia} on faasi a liinijuhi sisemine takistus ning $x_a + x_{dab}$ on liini geometriast tulenev reaktiivtakistus [12]. Iga realistliku liini kohta kehtib $(\mathbf{Z}_K)_{ab} - (\mathbf{Z}_K)_{aa} = \underline{z}_{kab} \neq 0$ ja

$$\mathbf{Z}_{aa} - \mathbf{Z}_{ab} = \underline{z}_a + \underline{z}_{kab}, \quad (1.68)$$

seega $\text{Re}[\mathbf{Z}_{aa} - \mathbf{Z}_{ab}] \neq r_{ia}$ ja $\text{Re}[(\mathbf{Z}_S)_{22}] \neq (r_{ia} + r_{ib} + r_{ic})/3$, mis tähendab, et pärijärgnevustakistus ei sisalda ainult liinijuhi aktiivtakistust ja ei ole seega teoreetiliselt täpne hinnang sellele suurusele. Valdavalt on \underline{z}_{kab} väärtus väike, aga temperatuuri määramine on ka väga väikeste aktiivtakistuse hindamise vigade suhtes väga tundlik.

Keskmist faasijuhtide takistust oleks võimalik määrata \mathbf{Z}_1 maatriksist, aga see ei ole faasimõõtmistest otseselt leitav. Rakendades sümmeetriliste komponentide teisendust kõnealusele maatriksile, avaldub

$$(1.69)$$

mille järgnev element sisaldab endas keskmist faasijuhtide takistust

$$(1.70)$$

kuna

$$(\mathbf{Z}_{KS})_{22} = (\underline{z}_{kab} + \underline{z}_{kbc} + \underline{z}_{kac})/3. \quad (1.71)$$

Selles avaldises on takistus samal kujul kui võrrandis (1.67).

Igal ülekandeliinil on eelduste kohaselt liinijuhtide sisemine takistus võrdne ($\langle \mathbf{z}_p \rangle = \underline{z}_p \mathbf{I}$) ning on võimalik kirjutada järgmine avaldis

$$(1.72)$$

kus

$$\mathbf{T}_C = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{6} & 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{3} & -2/\sqrt{6} & 0 \\ 1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{6} & -1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (1.73)$$

on Clarke'i teisendusmaatriks [20, 21]. Ei korrutis $\mathbf{T}_C^{-1}\mathbf{Z}\mathbf{T}_C$ ega ka eelneva avaldise teine liige ei pea olema diagonaalmaatriksid: nende summas on kõik elemendid väljaspool peadiagonaali nullid.

Nii võrrand (1.69) kui ka (1.72) viitavad, et liinijuhtme keskmist takistust saaks vähendatud takistuste maatriksist \mathbf{Z} estimateerida, kui lineaarsed teisendused maatriksil \mathbf{Z}_K (samuti maatriksil \mathbf{A}_1) võiks lugeda konstantseks sarnaselt modaalteisendusmaatriksitega. Kuna ükski vastastikutakistuste komponent ei sõltu väliskeskkonna parameetritest, võib sellise eelduse ka teha.

On võimalik püstitada lahendus, milles kõigepealt mudeldatakse liini võrranditega (1.5)–(1.12) keskmise temperatuuri ja maapinna juhtivuse hinnangute põhjal ning leitakse maatriksid \mathbf{Z} , \mathbf{Y} (või \mathbf{Z}_T , \mathbf{Y}_T) ja \mathbf{Z}_1 . Leitud liiniparameetrite alusel arvutatakse modaalteisendusmaatriksid võrranditest (1.29) ja (1.30). Seejärel kasutatakse teisendusmaatrikseid, et leida modaalsuurused $\bar{\mathbf{u}}^m(l) = \mathbf{T}_U^{-1}\bar{\mathbf{u}}(l)$ jne, kus ülakriips tähistab mõõdetud väärtusi. Viimaseks leitakse mõõdetud suurustest hinnangud liiniparameetritele, mis vastavad tegelikele tingimustele antud ajahetkel $\bar{\mathbf{Z}} = \mathbf{T}_U\langle\bar{\gamma}\rangle\langle\bar{\mathbf{z}}_c\rangle\mathbf{T}_I^{-1}$.

Edasi on võimalik leida näiteks null-, päri- ja vastujärgnevustakistused või keskmine liinijuhi aktiivtakistus, mille jaoks lahendatakse võrrand (1.69) või (1.72) suuruste $(\bar{\mathbf{Z}}_{1S})_{22} = (\bar{\mathbf{Z}}_{1S})_{33}$ või $\langle\bar{\mathbf{z}}_p\rangle$ suhtes, kasutades eelnevalt arvutatud väärtusi \mathbf{Z} , \mathbf{Z}_1 ja \bar{z}_p

$$(1.74)$$

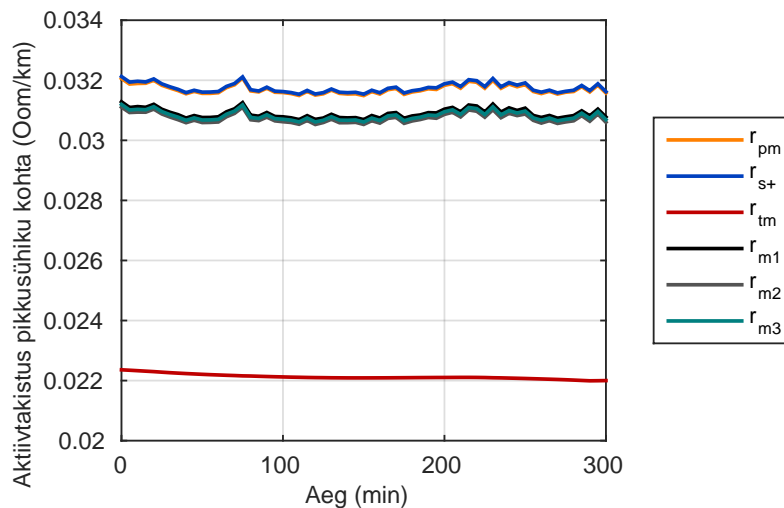
$$(1.75)$$

1.3.7. Arvutuslikud näited

Arvutuslikud näited keskenduvad ülekandeliini juhtmete aktiivtakistuse määramise küsimustele, sest see on liini ülekandevõime määramise aluseks. Piisava täpsusega määratud aktiivtakistusest on võimalik määrata liinijuhtide keskmine temperatuur ja hinnata ülekandevõimet. Eelmise etapi käigus selgus, et mõõtetrafode vigade tõttu ei ole võimalik praeguse mõõtetäpsuse juures aktiivtakistust piisavalt täpselt määrata. Seetõttu on siinkohal vaadeldud tulemusi, mida annab mõõtetrafode vigade kompenseerimine. Mõõtevigade kompenseerimist on lähemalt kirjeldatud alapeatükis 1.2.

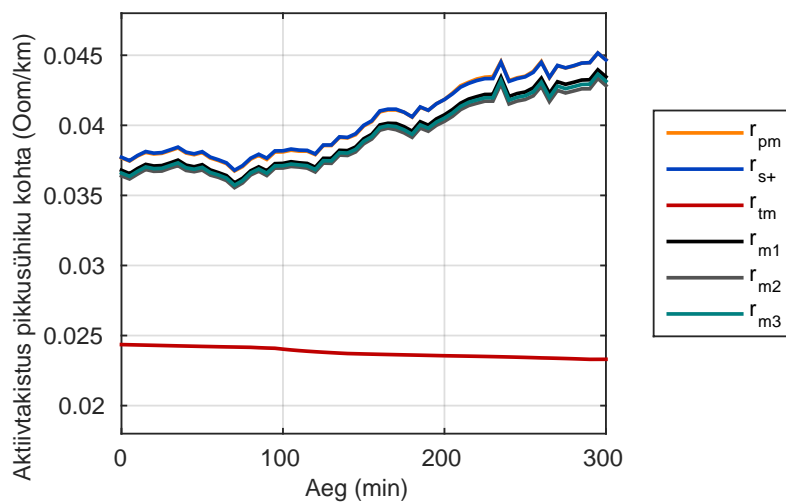
Järgnevalt on esitletud faasimõõtmisi liinilt 300 kahe erineva ajaperioodi jooksul. Mõõdetud faasisuurustest on arvatud keskmine faasijuhtide takistus (tähistatud r_{pm}) ja pärijärgnevussuurustest pärijärgnevustakistuse aktiivkomponent (tähistatud r_{s+}) võrrandite (1.3) ja (1.4) alusel. Modaalteisenduste ja liini andmete alusel on võrranditest (1.74) ja (1.75) leitud keskmise liini juhtide aktiivtakistuse hinnang (tähistatud r_{m1}, r_{m2}, r_{m3}). Võrdluseks on toodud eelmises etapis vaadeldud ilmamõõtmiste põhjal lahendatud soojusbilansist leitud aktiivtakistuse hinnang (tähistatud r_{tm}).

Joonistel 1.9 ja 1.10 on toodud kahe perioodi mõõtmiste alusel estimeeritud keskmised liini juhtide aktiivtakistused, ilma et oleks tulemusi korrigeeritud mõõtetrafode vigade osas. Sarnaseid tulemusi esitleti eelmises etapis ning on näha, et nende alusel ei ole võimalik liini soojuslikku talitlust jälgida. Aktiivtakistus erineb oluliselt oodatud väärtustest ning muutused ei vasta temperatuurimuutustele.

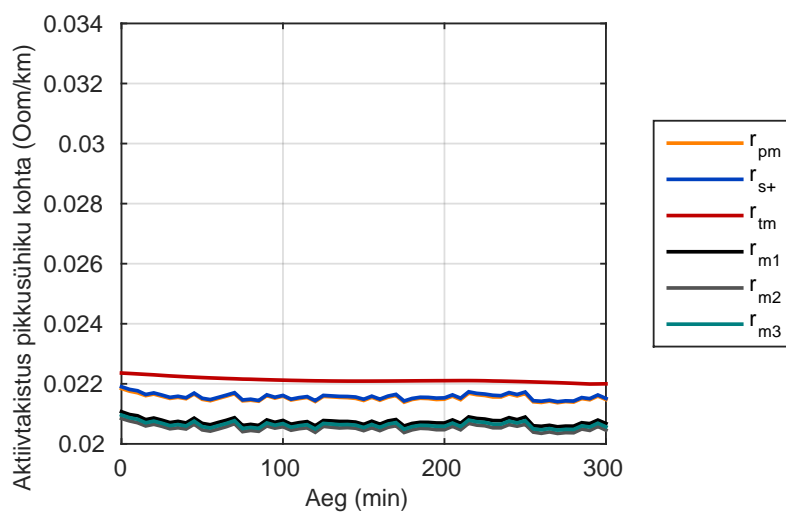


Joonis 1.9 Esimese perioodi korrigeerimata mõõtmistest leitud erinevad hinnangud keskmisele liinijuhi aktiivtakistusele.

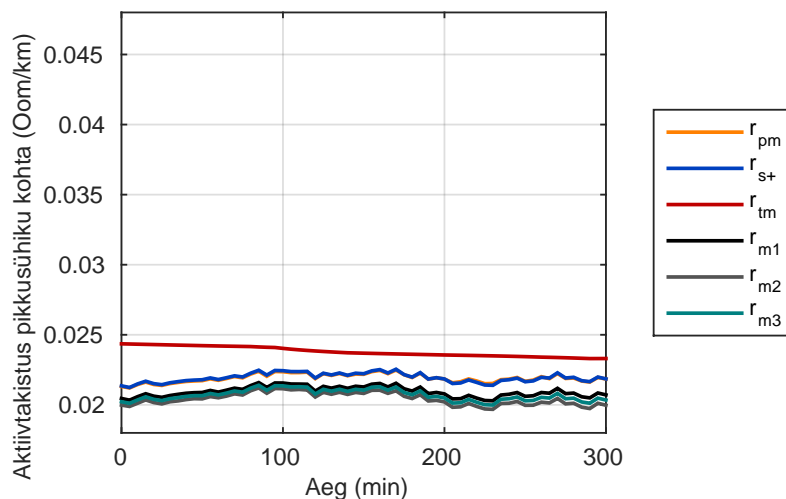
Joonistel 1.11 ja 1.12 on toodud samade ajaperioodide mõõtmistest leitud aktiivtakistuse väärtused, kuid siinkohal on mõõtmisi korrigeeritud mõõtetrafode mõõtevigu kompenseerides. Võrdluseks on graafikutele jäetud sama skaala kui korrigeerimata mõõtmiste korral ning on selgelt näha, et hinnatud suuruste täpsus paranes. Lisaks on näha, et muutused hinnatud temperatuuris vastavad paremini oodatud muutustele liini soojuslikkus talitluses. See-eest ilmneb ka teatud ülekompenseerimine, sest teoreetiliselt peaks suuruste r_{m1}, r_{m2}, r_{m3} väärtused vastama suuruse r_{tm} väärtustele. Siinkohal tuleb arvestada, et käesoleval hetkel ei ole saadaval kõik vajalikud andmed mõõtetrafode mõõtmisvigade kompenseerimiseks.



Joonis 1.10 Teise perioodi korrigeerimata mõõtmistest leitud erinevad hinnangud keskmisele liinijuhi aktiivakistusele.



Joonis 1.11 Esimese perioodi mõõtevigate suhtes korrigeeritud mõõtmistest leitud erinevad hinnangud keskmisele liinijuhi aktiivakistusele.



Joonis 1.12 Teise perioodi mõõtevigade suhtes korrigeeritud mõõtmistest leitud erinevad hinnangud keskmisele liinijuhi aktiivakistusele.

1.3.8. Järeldused ja kokkuvõte

Käesoleva etapi käigus on jätkatud faasimõõtmistest ülekandeliinide parameetrite määramise teoreetiliste aluste välja töötamist. Täiendusena eelmisele etapile on analüütiliselt näidatud, et ülekandeliinile vastavad modaalteisendusmaatriksid on ajalistest muutustest ja ebatäpsustest maapinna eritakistuse määramises piisavalt sõltumatud, et need võib konkreetse liini jaoks välja arvutada ja konstantseks lugeda. Faasimõõtmistest liinijuhi aktiivtakistuse määramiseks on pakutud välja lahendus, mis peaks teoreetiliselt andma füüsikaliselt kõige korrektsema väärtuse juhi enda sisemisele aktiivtakistusele. Praeguse mõõtetäpsuse juures ei ole võimalik antud tulemusi analüüsida.

Lisaks lahenduse teoreetilisele täpsustamisele on vaadeldud ka mõõtetrafode mõõtevigade kompenseerimise mõjusid mõõtetulemuste täpsuse suurendamisele. Aruandes on tulemustena välja toodud mõõtetrafode mõõtevigade suhtes kompenseerimata ja kompenseeritud mõõtetulemuste võrdlus. Tulemustest on näha, et mõõtevigade kompenseerimises on potentsiaali suurendada mõõtetäpsust piisavalt, et oleks võimalik määrata liinijuhtide keskmist aktiivtakistust piisava täpsusega, et hinnata liini soojuslikku talitlust. Siiski on vaja mõõtetrafode mõõtevigade määramist edasi uurida ja täpsustada. Hetkel on puudu osad vajalikud andmed ning mõõtevigade korrigeerimise teoreetiline lahendus ei ole lõpuni välja töötatud.

1.4. Ülekandekadude määramine

Projekti eelmises etapis vaadeldi ülekandekadusid lihtsustatud liinimudeli põhjal, mis ei arvestanud liinijuhtide omavahelist sidestatust. Käesolevas etapis on töötatud välja teoreetiline alus määramaks faasimõõtmistest ülekandekadusid mitmejuhilisel liinil, nii et vastastikune sidestatust on arvesse võetud. See on oluline selleks, et analüüsida kadude määramist eraldi faasides ning erinevate kaokomponentidena.

Ülekandekadude määramise teoreetiline käsitlus keskendub kahele teemale. Esiteks analüüsitakse faasikadude leidmist ja kuidas seda mõjutab faaside omavaheline sidestatust. Selleks on tuletatud kadude leidmiseks võrrandid, kus kadusid ei leita mitte lihtsalt kahe liini otsa võimsuste vahena, vaid arvutatakse liinimudeli elementides eralduvate kadude summana. Sellist kadude määramist erinevates elementides esinevate kadude summana laiendatakse edasi, et määrata ülekandekaod eraldi komponentidena, mille põhjal saaks eraldi määrata näiteks soojuslikud kaod liinijuhtmetes ja koroonakaod.

1.4.1. Ülekandekaod kahejuhilisel liinil

Kui liini mõlema otsa pinge- ja voolufaasorid on teada, on võimalik liini otste võimsusvoogude vahest leida ülekandekaod. Antud juhul saab seda kirjeldada avaldisega

$$\underline{\Delta S}_L = \underline{S}_L - \underline{S}_0 = \underline{U}(L)\underline{I}^*(L) - \underline{U}(0)\underline{I}^*(0), \quad (1.76)$$

kus $*$ tähistab kaaskompleksarvu ja L on liini kogupikkus.

Teisalt on asukohal l jaotatud elementides eralduvad kaod $|\underline{I}(l)|^2 z dl$ ja $|\underline{U}(l)|^2 y dl$. Kui kaod lõpmata lühikestes elementides integreerida üle liini pikkuse, avalduvad ülekandekaod kujul $\underline{\Delta S}_L = \Delta P + j\Delta Q$, milles

$$(1.77)$$

$$(1.78)$$

kus r , g , x ja b on takistuse ja juhtivuse z ja y komponendid ning mahtuvuslik reaktiivvõimsus on negatiivne. Need võrrandid on lahendatavad avaldise (1.1) ja (1.2) numbriliselt integreerides [22].

Kui aga on teada pinged ja voolud liini mõlemas otsas, on võimalik esialgu arvutada liini parameetrid ning seejärel leida kaod komponentidena. Iga kaokomponent on lähedaselt seotud

sellele vastava liinimudeli parameetriga. See aga tähendab, et erinevaid kaokomponente on võimalik eraldiseisvalt arvutada. Aktiivkadude puhul saab eraldi määrata kaod pikitakistuses ja põikjuhtivuses, samal ajal saab eraldi leida ka liini induktiivsuses tarbitava ja mahtuvuses genereeritava reaktiivvõimsuse.

1.4.2. Mitmejuhilise liini kaod faasisuurustes

Vaadeldavas mitmejuhilise liini maatriksite-vektorite põhises notatsioonis avaldub liini ühest otsast sisenev võimsus järgmiselt

(1.79)

kus \dagger tähistab kaasmaatrikst. Liini teisest otsast väljuv võimsus avaldub sarnaselt.

Selle põhjal võib avaldada kaod ülekandeliini ulatuses

$$\underline{\Delta S}_L = \mathbf{i}_1^\dagger \mathbf{u}_1 - \mathbf{i}_2^\dagger \mathbf{u}_2 = \mathbf{i}^\dagger(L) \mathbf{u}(L) - \mathbf{i}^\dagger(0) \mathbf{u}(0), \quad (1.80)$$

kus kolme faasi pinge- ning voluafaasorid on faasimõõturitega mõõdetavad suurused.

Liinil pikkusega L võib kaod avaldada järgmiselt (arvestades et $(\cosh \mathbf{M})^\dagger = \cosh(\mathbf{M}^\dagger)$)

(1.81)

Hüperboolsed funktsioonid võib arendada Tayloriga järgmiselt

(1.82)

(1.83)

kus \mathbf{I} on ühikmaatriks.

Piisavalt lühikesel liinilõigul pikkusega Δl võib eeldada, et $(\Gamma \Delta l)^2$ ja $(\Gamma \Delta l)^3$ on marginaalsed võrreldes \mathbf{I} ja $\Gamma \Delta l$ väärtustega. Kui hüperboolseid funktsioone lihtsustada, nii et need võrduvad oma rittaarenduse esimeste liikmetega, võib lühikese liinilõigu kaod lihtsustatult avaldada

järgmiselt

(1.84)

Seega on kaugusel l lõpmata lühikesel liinilõigul eralduvad kaod

(1.85)

mille saab integreerida üle kogu liini pikkuse, et leida kogukaod

(1.86)

Saadud tulemus on väga sarnane kahejuhilise liini kadude avaldisega, eriti arvestades et $\mathbf{Y}^\dagger = \mathbf{G} - j\mathbf{B}$ (kuna \mathbf{Y} on sümmeetriline) ja $|a|^2 = \underline{a}^* \underline{a}$. Samamoodi saab kaod liinil avaldada nelja komponendi summana ehk

(1.87)

Selles summas vastab liige ΔP_J aktiivkadudele, mis eralduvad ülekanaliini mudeli jadatakistustes ning ΔP_C aktiivkadudele põikjuhtivustes. Reaktiivvõimsuste bilansi määravad ära reaktiivtakistustes tarbitav võimsus ΔQ_I ning mahtuvustes genereeritav ΔQ_C . Kompnendid avalduvad kujul

(1.88)

(1.89)

(1.90)

(1.91)

Selliste hinnangute füüsikalise sisu tõlgendamisel tuleb meeles pidada erinevaid tehteid, mida liiniparameetrite maatriksitel rakendati, nagu kirjeldatud alapeatükis 1.3.2.

Üks komponent kadude tuletisest $d\underline{\Delta S}(l)/dl$ avaldub skalaarkujul järgmiselt

(1.92)

mis annab kadude summa liini kõigis põikjuhtivustes. Sarnased avaldised leiduvad ka ülejäänud kaokomponentidele.

Kaod ühes faasis saaks defineerida kui pinge ja voolu korrutise vahe liini kummaski otsas ehk $\underline{U}_a(L)\underline{I}_a^*(L) - \underline{U}_a(0)\underline{I}_a^*(0)$. Eelneva põhjal saab selle avaldise lahti kirjutada kujule

(1.93)

mis on üks liige summast (1.80) või (1.86). See avaldis sisaldab aga suursi kõigist kolmest faasis ning nende omavahelisi takistusi ja juhtivusi, mistõttu ei saa seda vaadelda kui faasisuurst.

1.4.3. Mitmejuhilise liini kaod sümmeetrilistes komponentides

Üheaahelalise kolmefaasilise ülekandeliini null-, päri- ja vastujärgnevuspinge ning -vool asuko-
has l tähistatakse

(1.94)

(1.95)

ning saadakse faasisuurstest lineaarsete teisendustega $\mathbf{u}_S(l) = \mathbf{T}_S^{-1}\mathbf{u}(l)$ ja $\mathbf{i}_S(l) = \mathbf{T}_S^{-1}\mathbf{i}(l)$, kus

(1.96)

Olgu ära märgitud, et $\mathbf{T}_S^{-1} = \mathbf{T}_S^\dagger/3$.

Faasisuurustest avaldatud ülekandekaod $\underline{\Delta S}_L$ saab kirjutada kujul [23]

(1.97)

ja

(1.98)

Tulemuseks on avaldis ülekandekadudele sümmeetrilistes komponentides

(1.99)

Maatriksid $\mathbf{Z}_S = \mathbf{T}_S^{-1}\mathbf{Z}\mathbf{T}_S$ ja $\mathbf{Y}_S = \mathbf{T}_S^{-1}\mathbf{Y}\mathbf{T}_S$ sisaldavad järgnevustakistusi ja -juhtivusi ning on otse arvutatavad vähendatud takistuste ja juhtivuste maatriksitest \mathbf{Z} ja \mathbf{Y} [10]. Päri-, vastu- ja nulljärgnevustakistuste avaldised olid toodud eelmises alapeatükis.

Enamikes ülekandeliinides on nende maatriksite kõrvalelemendid diagonaalelementidest oluliselt väiksemad, näiteks

(1.100)

Ideaalselt transponeeritud liinide puhul on need elemendid nullid, nii et maatriksid \mathbf{Z}_S ja \mathbf{Y}_S on diagonaalsed.

Sellest järeldub, et sümmeetriliste komponentide teisendusmaatriks \mathbf{T}_S sobib ideaalselt transponeeritud liini mõlemaks modaalteisendusmaatriksiks. Sellisel juhul võib päri-, vastu- ja nulljärgnevussuurusi vaadelda üksteisest täielikult sõltumatutena ning mudeldada kahejuhiliste liinidena. See omakorda tähendab, et faasimõõtmistest saab lihtsustatult arvutada liiniparameetrid vastavalt võrranditele (1.3) ja (1.4).

Võrrand (1.99) lihtsustub oluliselt ka olukorras, kus liini koormus on täielikult sümmeetriline.

Sel juhul on vastu- ja nulljärgnevuspinged ja -voolud marginaalsed ning kogukaod liinil avalduvad järgmiselt

$$(1.101)$$

Isegi kui liini geomeetria ja koormus on mõlemad ebasümmeetrilised, on maatriksite \mathbf{Z}_S ja \mathbf{Y}_S kõrvalelemendid väiksed ning korrutised, mis neid sisaldavad (nagu $\underline{I}_+(l)\underline{I}_0^*(l)\mathbf{Z}_{12}$ jne võrrandis (1.99)) on väiksed ning ei mõjuta kogukaadude suurust arvestatavalt.

Lihtsustusena võib defineerida diagonaalsed järgnevustakistuste ja -juhtivuste maatriksid

$$\langle \mathbf{z}_S \rangle = \langle \mathbf{r}_S \rangle + j\langle \mathbf{x}_S \rangle = \begin{bmatrix} \underline{z}_0 & & \\ & \underline{z}_S & \\ & & \underline{z}_S \end{bmatrix} \quad (1.102)$$

ja $\langle \mathbf{y}_S \rangle = \langle \mathbf{g}_S \rangle + j\langle \mathbf{b}_S \rangle$, kus järgnevustakistused ja -juhtivused on arvutatud mõõdetud pingetest ja vooludest vastavalt võrranditele (1.3) and (1.4). Kogukaod saab seejärel arvutada ligikaudselt

$$(1.103)$$

See võimaldab arvutada ülekandekaod nelja eraldi komponendina nagu võrrandis (1.87), ilma et peaks estimateerima vähendatud takistuste ja juhtivuste maatrikseid \mathbf{Z} ja \mathbf{Y} . Ligikaudsed kaokomponendid on

$$(1.104)$$

$$(1.105)$$

$$(1.106)$$

$$(1.107)$$

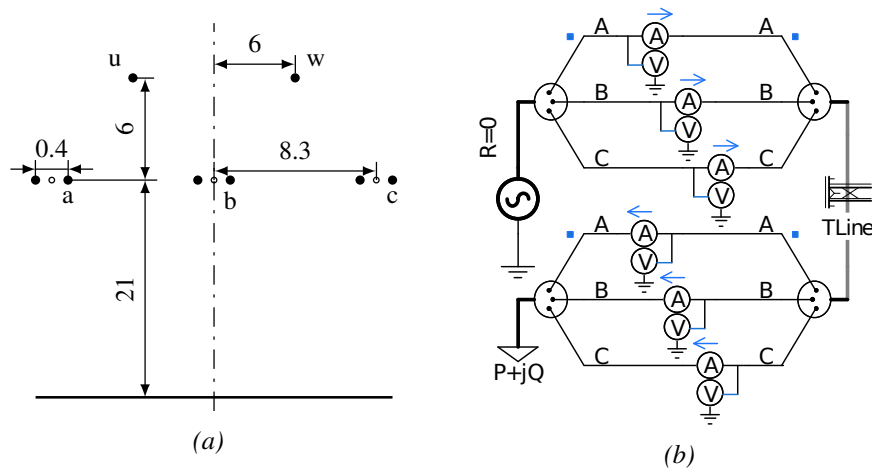
kus järgnevuspinged ja -voolud on arvutatud võrrandite (1.1) ja (1.2) alusel ning numbriliselt integreeritud.

Võib teha eelduse, et kaod ΔP_J on ligikaudu võrdsed soojuslike kadudega liinijuhtides ja komponent ΔP_C tuleneb põhiliselt koroonakadudest. Sarnased avaldised kirjeldavad reaktiivkaidusid liinijuhtmete induktiivsustes komponendi ΔQ_I kujul ja liini mahtuvustes genereeritavat reaktiivvõimsust komponendina ΔQ_C .

1.4.4. Arvutuslikud näited

Faasikadude määramine

Faasikadude määramise analüüsiks on vaadeldud nii faasimõõtmiste andmeid liinidelt 300 ja 511 kui ka tehtud PSCAD simulatsioon liinimudelil. Simulatsioonis kasutatud mudel on lihtsustatud variant liinist 300, mille erinevate mastikonfiguratsioonide põhjal on valitud iseloomulik geomeetria, mis on kujutatud joonisel 1.13a. Liini pikkus on 170 km, ripe on kõigil juhtmetel 9 m, faasijuhtmete diameeter on 2.8 cm ja neutraalijuhtmetel 1.1 cm. Takistused 20 °C juures on vastavalt 0.0746 Ω/km ja 0.412 Ω/km faasi- ja neutraalijuhtmetel ning maapinna eritakistuseks on võetud 1000 Ω·m.



Joonis 1.13 (a) Simulatsioonis kasutatud liinigeomeetria. Kõik mõõddud on antud meetrites. (b) PSCAD simulatsiooni elektriskeem.

PSCAD mudeli elektriahela skeem on toodud joonisel 1.13b. Elektriskeem sisaldas universaalset liinimudelit, sümmeetrilist koormust ja ideaalset pingesallikat. Allika ja liini ning koormuse ja liini vahel simuleeriti kõigi kolme faasi pingeid ja voole ning teisendati need faasoriteks. Simuleeritud suurustest leiti igasse faasi antud ja sealt tarbitud võimsuste vahe erinevate sümmeetrilise koormuse ($\cos \varphi = 0.97$) väärtuste korral; tulemused on toodud joonisel 1.14. Võrdluseks arvutati kaod ka võrrandist (1.93) ning keskmised aktiivkaod leiti suurusena $\text{Re}[\Delta S_L]/3$ võrranditest (1.80) ja (1.86) kasutades PSCAD mudeli takistuse ja juhtivuse matrikseid.

Selliselt leitud aktiivkaod käituvad koormusest sõltuvalt erinevates faasides erinevalt. Sümmeetrilise koormuse ja identsete faasijuhtide korral ei ole see oodatav tulemus. Lisaks muutuvad madalatel koormustel ühe faasi aktiivkaod negatiivseks, mis ei ole füüsikaliselt ootuspärane. Ühe faasi negatiivseid väärtusi kompenseerivad teise faasi oodatust suuremad kaod. Summaarsed kaod või keskmised faasikaod on siiski eeldatavalt korrektsed. Jaotatud parameetrite kadude summana leitud kogukaod olid ekvivalentsed liini kahe otsa võimsuste vahega.

Joonis 1.14 Simulatsiooni tulemused, milles faasikaod ja keskmised kaod faasi kohta on arvatatud otsese võimsuste vahena kahe liini otsa vahel ja integraalidena võrranditest (1.86) ja (1.93).

Reaalsed faasimõõtmised ülekandeliinidelt on võetud erinevatest ja erineva pikkusega ajaperioodidest ning neid ei ole kuidagi korrigeeritud. Vaadeldud aja jooksul langes liini 300 koormus umbes 450 MW juurest 340 MW-ni ning liini 511 koormus kasvas 25 MW-lt 200 MW tasemele. Ei aktiiv- ega ka reaktiivkoormuses ei esinenud märgatavat asümmeetriat kummalgi liinil. Mõlema liini mõõtmistest leiti faasikaod kummagi otsa pingele ja voolu korrutiste vahena ning on kujutatud graafikutel 1.15 ja 1.16.

Joonis 1.15 Faasimõõtmiste tulemused, kus faasikaod on leitud liini otste võimsuste vahena liinil 300.

Tegelikud faasimõõtmised ülekandeliinidelt käituvad sarnaselt simulatsiooni tulemustega. Leitud vahe liinide faasivõimsustes muutus koormuse muutudes faasides erinevalt. Esimese liini mõõtmistest on näha, kuidas kadude muutumise kiirus oli faasides erinev ning kui C-faasi väärtused olid alguses madalaimad, tõusid need lõpuks kõrgeimaks. Teise liini mõõtmistest on näha, kuidas väikesel koormusel muutusid ühe faasi kaod negatiivseteks.

Faasikadude hinnangute sellise käitumise põhjuseks peavad autorid faaside omavahelist sides-

Joonis 1.16 Faasimõõtmiste tulemused, kus faasikaod on leitud liini otste võimsuste vahena liinil 511.

tatust. Reaalsed liinid on alati teatud määral asümmeetrilised ning suurused, mille kaudu on kaod avaldatud võrrandis (1.93) sõltuvad vastastikest takistustest ja juhtivustest faaside vahel, mis ei ole ideaalselt sümmeetrilised.

Kadude estimeerimine komponentidena

Samu mõõteandmeid kasutati kadude komponentide estimeerimise analüüsiks. Kõigepealt on vaadeldud liini 300 näitel aktiivkadude määramist võrrandi (1.80) reaalosana ning liikmetena ΔP_J ja ΔP_C võrranditest (1.104) ja (1.105). Tulemused on toodud joonisel 1.17, kus on võrdluseks esitatud ka ΔP_J ja ΔP_C väärtuste summa võrranditest (1.104) ja (1.105) ning ΔP_J ja ΔP_C võrranditest (1.86)–(1.88). Kahe viimase suuruse leidmiseks kasutati liini andmetest arvutatud modaalteisendusmaatrikseid.

Joonis 1.17 Faasimõõtmiste tulemused liinilt 300, kus kogukaod on leitud liini otste võimsuste vahena ning komponentidena, mis vastavad jaotatud parameetrites eralduvate kadude summale.

Liini L511 mõõteandmetest leiti aktiivkaod võrrandi (1.80) reaalosana ning ΔP_J ja ΔP_C võrranditest (1.104) ja (1.105). Tulemused on toodud joonisel 1.18. Reaktiivvõimsuste bilanss on toodud joonisel 1.19, kus tarbitav võimsus ΔQ_I ja toodetav võimsus ΔQ_C on leitud sarnaselt aktiivkadude komponentidega vastavate parameetrite x_S , x_0 , b_S ja b_0 põhjal ning tarbitud ja toodetud reaktiivvõimsuste summa on leitud võrrandi (1.80) imaginaarosana. Kõik mõõtmised on selge ja pigem sooja ilmaga perioodist (10–20 °C õhutemperatuur, keskmine tuulisus, sademetevaba).

Joonis 1.18 Faasimõõtmiste tulemused liinilt 511, kus kogukaod on leitud liini otste võimsuste vahena ning komponentidena, mis vastavad jaotatud parameetrites eralduvate kadude summale.

Joonis 1.19 Faasimõõtmiste tulemused liinilt 511, kus kogureaktiivkaod on leitud liini otste võimsuste vahena ning komponentidena, mis vastavad jaotatud parameetrites eralduvate kadude ja toodetud reaktiivvõimsuse summale.

Tulemused graafikutel 1.17 ja 1.18 näitavad sarnast käitumist kahe liini mõõtmistes. Mõlemal juhul olid ΔP_C väärtused nullilähedased ja ei muutunud ülekantava võimsusega, kuid mõlemal juhul oli väärtus negatiivne. Suurus ΔP_J oli koguaktiivkadude lähedase väärtusega ning erines sellest ΔP_C võrra. Samade suuruste erinevad hinnangud graafikul 1.17 on eristamatuseni sarnased. Graafikul 1.19 toodud reaktiivvõimsuste bilanss käitus ootuspäraselt. Joonistel 1.18 ja

1.19 kasutatud suurem andmehulk iseloomustab ka mõõtemüra ulatust ja muutumist ajas.

Liinilt L511 on võetud faasimõõtmiste andmed ka teisest ajaperioodist, kui ilm oli külm ja lund sadas. On määratud samad suurused: reaalosa kogukadudest ning ΔP_J ja ΔP_C võrranditest (1.104) ja (1.105). Tulemused on toodud joonisel 1.20. Kui võrrelda kadusid andmetega graafikul 1.18, on näha, et sarnase koormuse juures on ΔP_C väärtused oluliselt erinevad: varasemate väikeste negatiivsete väärtuste juurest on teise perioodi ajal väärtused tõusnud ligi 0.5 MW võrra.

Joonis 1.20 Külma ja lumesajuse ilmaga ajaperioodist saadud faasimõõtmiste tulemused liinilt 511, kus kogukaod on leitud liini otste võimsuste vahena ning komponentidena, mis vastavad jaotatud parameetrites eralduvate kadude summale.

Käesolevate arvutuste tegemise ja andmete töötlemise ajal ei olnud veel mõõtetrafode mõõtevigade kompenseerimisega tegeletud. Võib eeldada, et ilusa ilma korral leitud negatiivsed hinnangud koroonakadudele on vähemalt osaliselt põhjustatud mõõtetrafode mõõtmisvigadest ning et mõõtevigade kompenseerimine parandab ka kadude hindamise täpsust.

1.4.5. Analüüs ja järeldused

Käesoleva etapi käigus on oluliselt edasi arendatud faasimõõtmistest ülekandekadude määramise teoreetilist tausta. Selle põhjal on olnud võimalik analüüsida mitmejuhilise liini ülekandekadude määramise probleeme ja võimalusi. On uuritud võimalusi, kuidas faasimõõtmistest saadavat infot on võimalik ära kasutada, et saada rohkem teavet kadude kohta. Põhiliselt on analüüsitud kadude määramist faasides ning kogukadude leidmist erinevate kaakomponentidena.

Simulatsioonid ja faasimõõtmised on näidanud, et mitmejuhilisel liinil ei toimi faasikadude arvutamine intuiitselt: kuigi faasimõõturid mõõdavad faasisuursusi, ei saa otsese liini otste faasivõimsuste vahena leida kadusid üksikutes faasides. See tähendab, et kuigi WAMS-tarkvara võib

välja arvutada võimsused faaside kaupa, saab liini ülekandekadusid estimateerida ainult kogu liini kohta, mitte faaside kaupa eraldi.

Mõõdetud faasoritest ülekandekadude määramise teoreetilises käsitluses on uuritud võimalusi seostada liinimudeli parameetrid kadude komponentidega. Ülekandeliini mudel koosneb jaotatud parameetritest, milles eralduvad kaod on võimalik eraldi arvutada ja kokku liita, et leida kogukaod. Kui teha eeldus, et jadatakistustes tarbitavad aktiivkaod vastavad soojuslikele kadudele liinijuhis ning põikjuhtivuses eralduv aktiivvõimsus vastab koroonakadudele, on võimalik faasimõõtmistest neid komponente määrata. Koroonakadusid vähem ja rohkem soodustava ilmaga perioodide mõõtmisi võrreldes võib teha esialgseid järeldusi, et teatud täpsusega on võimalik ülekandekadusid faasimõõtmiste abil jälgida. Tegelik täpsuse selgitamiseks on vaja kavandada ja teostada täiendavaid mõõtmisi, et saada võrdlusandmeid.

1.5. Kokkuvõte

Käesolev peatükk tegi kokkuvõtte edasiarendustest ülekandeliinide jälgimises faasimõõtmiste abil. Võrreldes eelmise etapiga on edasi arendatud faasimõõtmiste tulemuste tõlgendamist ja analüüsimist mitmejuhilise liini mudeli põhjal. Korrektne teoreetiline põhi faasimõõtmiste analüüsimisel on oluline potentsiaalsete liini jälgimise rakenduste usaldusvääruse tagamiseks. See on oluline nii liini läbilaskevõime kui ka kadude täpsemaks analüüsimiseks.

Lisaks sellele on täiendavalt analüüsitud meteoroloogiliste mõõtmiste kasutamist ülekandeliini soojusliku talitluse jälgimisel. Kui varasem analüüs põhines tunnikeskistel mõõteandmetel, siis käesolevas aruandes on võrdluseks samad arvutused teostatud mõõtmistest, mis on kogutud 10-minutilise sammuga. Saadud tulemused ilmestasid ajalisi muutusi veidi täpsemalt, kuid üldiselt andsid tunnipõhised mõõteandmed sarnase ülevaate, mis tähendab, et tunnisised minutitepõhiselt interpoleeritud andmed ei sisalda väga suuri vigu.

Eelmises etapis ilmnas, et praeguse mõõtetäpsuse juures ei ole ainult faasimõõtmiste põhjal liini soojusliku talitluse jälgimine teostatav. Põhiliseks takistuseks oli sealjuures mõõtetrafode mõõtetäpsus, mistõttu uuriti selle etapi käigus ka mõõtevigade kompenseerimise võimalusi. Esimese lähendusena on koostatud lihtsustatud lahendus, et määrata mõõtetrafode mõõtevead vastavalt konkreetsele talitlusele. Esialgsete tulemuste põhjal on näha, et mõõtevigade kompenseerimine võib mõõtetäpsust piisavalt suurendada, et liini läbilaskevõime määramine muutuks võimalikuks. Selliste võimaluste täpsemaks väljaselgitamiseks on vaja täiendavaid andmeid mõõteseadmestiku kohta ja täpsemalt uurida mõõtetrafode mõõtevigade teoreetilist külge.

Kolmas alapeatükk käsitles ülekandeliini parameetrite määramist faasimõõtmistest ja selle põh-

jal läbilaskevõime hindamist. Mitmejuhilise ülekandeliini parameetrite määramiseks konstantsete liini andmetest arvatud modaalteisendusmaatriksite kasutamist on põhjalikumalt põhjendatud. On toodud täpsemad võrrandid ülekandeliini faasijuhtide sisemise aktiivtakistuse määramiseks, mis on liinimudelil tegelik temperatuurist sõltuv suurus.

Neljandas alapeatükis töötati välja mõõdetud faasoritest mitmejuhilise liini ülekandekadude arvutamise teoreetilised alused. Analüüs keskendus faasikadude arvutamise probleemidele ja erinevate kaakomponentide määramise võimalustele. Erinevat tüüpi kadusid analüüsiti põhimõttel, et erinevad kaod seostuvad teatud liiniparameetritega ning määratud parameetrites eralduvad kaod saab välja arvutada. Esialgsed tulemused lubavad eeldada, et on võimalik eraldi määrata soojuslikud kaod liinijuhi aktiivtakistuses ning koroonaakaod, kuid tulemuste kontrollimiseks on vaja teha täiendavaid katseid, et saada võrdlusandmeid.

1.6. Kirjandus

- [1] “Eesti elektrisüsteemi laiseiresüsteemi arendamine ja analüüs (WAMPAC),” TTÜ elektroenergeetika instituudi uurimustöö 1.1-4/13/232 / Lep13118 I etapi aruanne, 2014.
- [2] “Eesti elektrisüsteemi laiseiresüsteemi arendamine ja analüüs (WAMPAC),” TTÜ elektroenergeetika instituudi uurimustöö 1.1-4/13/232 / Lep13118 II etapi aruanne, 2015.
- [3] “IEEE standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors,” *IEEE Std 738-2012 (Revision of IEEE Std 738-2006 - Incorporates IEEE Std 738-2012 Cor 1-2013)*, pp. 1–72, Dec 2013.
- [4] “Thermal behaviour of overhead conductors,” CIGRE working group 22.12 report, August 2002.
- [5] C. Indulkar and K. Ramalingam, “Estimation of transmission line parameters from measurements,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 30, no. 5, pp. 337–342, 2008.
- [6] Y. Du and Y. Liao, “On-line estimation of transmission line parameters, temperature and sag using PMU measurements,” *Electric Power Systems Research*, vol. 93, pp. 39–45, 2012.
- [7] T. Bi, J. Chen, J. Wu, and Q. Yang, “Synchronized phasor based on-line parameter identification of overhead transmission line,” in *Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008.*, April 2008, pp. 1657–1662.

- [8] S. Kurokawa, G. A. Asti, E. C. M. Costa, and J. Pissolato, "Simplified procedure to estimate the resistance parameters of transmission lines," *Electrical Engineering*, vol. 95, no. 3, pp. 221–227, 2013.
- [9] G. Asti, S. Kurokawa, E. C. M. Costa, and J. Pissolato, "Real-time estimation of transmission line impedance based on modal analysis theory," in *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, July 2011, pp. 1–7.
- [10] R. Galloway, W. Šhorrocks, and L. Wedepohl, "Calculation of electrical parameters for short and long polyphase transmission lines," *Proceedings of the IEE*, vol. 111, no. 12, pp. 2051–2059, December 1964.
- [11] A. Déri and G. Tevan, "Mathematical verification of Dubanton's simplified calculation of overhead transmission line parameters and its physical interpretation," *Archiv für Elektrotechnik*, vol. 63, no. 4-5, pp. 191–198, 1981.
- [12] J. B. Anderson, Ed., *Analysis of Faulted Power Systems*. IEEE-Wiley, 1973.
- [13] M. Farzaneh, S. Farokhi, and W. Chisholm, *Electrical Design of Overhead Power Transmission Lines*. McGraw-Hill, 2012.
- [14] L. M. Wedepohl, "Application of matrix methods to the solution of travelling-wave phenomena in polyphase systems," *Proceedings of the IEE*, vol. 110, no. 12, pp. 2200–2212, 1963.
- [15] J.-C. Li and Y.-P. Wu, "A distributed circuit model for three-phase transposed and untransposed transmission lines," *Electric Power Systems Research*, vol. 19, pp. 187–194, 1990.
- [16] D. E. Hedman, "Propagation on overhead transmission lines I—theory of modal analysis," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. 84, no. 3, pp. 200–205, March 1965.
- [17] K. Tuttelberg and J. Kilter, "Modal transformation matrices for phasor measurement based line parameter estimations," in *Proceedings of International Power Systems Transients Conference 2015*, Cavtat, Croatia, June 2015.
- [18] "Increased power flow guidebook," Electric Power Research Institute, Tech. Rep. 1010627, 2005.
- [19] K. Miller, "On the inverse of the sum of matrices," *Mathematics Magazine*, vol. 54, no. 2, pp. 67–72, 1981.

- [20] E. Clarke, *Circuit analysis of A-C power systems*. General Electric, 1943.
- [21] J. B. Faria, “Application of Clarke’s transformation to the modal analysis of asymmetrical single-circuit three-phase line configurations,” *European Transactions on Electrical Power*, vol. 10, no. 4, pp. 225–231, 2000.
- [22] K. Tuttelberg and J. Kilter, “Real-time estimation of transmission losses from PMU measurements,” in *Proceedings of PowerTech 2015*, Eindhoven, Netherlands, June 2015.
- [23] C. L. Fortescue, “Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks,” *Proceedings of the AIEE*, vol. 37, no. 6, pp. 629–716, 1918.

2. Laiseirerakendused praktikas

Faasimõõtmiste üheks oluliseks rakenduseks on muuhulgas ka täiendada elektrisüsteemi oleku estimaatori sisendite hulka. Faasimõõturid määravad küllaltki täpselt olekuparameetreid, mida SCADA-mõõtmistest otse saada ei ole võimalik, nagu näiteks pingefaasorite nurgad. Sealjuures on aga oluliseks küsimuseks, millise tehnilise lahenduse põhjal faasimõõtmisi tavapärasesse olekuestimaatorisse integreerida. Järgnevalt on antud lühike ülevaade probleemist ja selle võimalikest lahendustest.

Projekti käesoleva etapi käigus on koostatud kaks laiseirerakendust Eleringi laiseiresüsteemi põhjal. Tegemist on näidisrakendustega, mille abil saab hinnata hetkel olemasoleva süsteemi abil rakenduste koostamise võimalusi ja süsteemi reaalselt kasutatavust, võrrelda laiseiremõõtmisi tavapäraste SCADA-mõõtmistega ning hinnata käesoleva projekti jooksul väljatöötatud ülekandeliinide jälgimise metoodika kasutatavust.

Eleringis kasutusel olevas WAMS-tarkvaras on loodud kaks rakendust: faasimõõtmistel põhinev estimaator ja ühe ülekandeliini jälgimine. Süsteemi oleku estimeerimine on sarnane tavapärase estimaatoriga, ainult et põhineb faasimõõtmiste andmetel ning sarnaneb rohkem otsese mõõtmisega. Faasimõõturid mõõdavad olekuparameetreid otse ning neist on võimalik lihtsate, ilmutatud kujul võrrandite abil arvutada teisi olekuparameetreid. Piiratud mõõtepunktide arvu tõttu on jälgitav ainult osa 330 kV võrgust.

Ülekandeliini oleku jälgimise esialgses rakenduses on võimalik määrata pärijärgnevussuuste vastavad liiniparameetrid ja ülekandekadude komponendid. Praegusel hetkel ei ole veel sisse viidud mõõtetrafode mõõtevigade kompenseerimist, mille rakendamine eeldab täiendavat arendustööd.

2.1. Faasimõõtmiste rakendamine süsteemi oleku estimeerimisel

Tavapärane elektrisüsteemi oleku estimaator põhineb SCADA-mõõtmistel. Üldjuhul on mõõdetavateks suurusteks võimsusvood või voolud liinides, koormused või toodetavad võimsused sõlmedes ning sõlmede pinged. Mõõdetavate ja otsitavate suuruste ning süsteemi parameetrite põhjal koostatakse süsteemi olekut kirjeldavad võrrandid. Levinuim meetod nende võrrandite lahendamiseks on kaalutud vähimruutude meetod (*weighted least squares* ehk WLS) [1].

Estimaator on programmeeritud süsteemi olekut arvutama teatud mõõdetavatest sisendsuurustest, mille on ära määranud SCADA-mõõtmiste võimalused. Faasimõõtmiste integreerimisel estimaatorisse on põhiliseks probleemiks see, et faasimõõturitega on võimalik mõõta teistsu-

guseid suurusi kui on kättesaadavad SCADAst. Tavapärase estimaatori sisendite hulgas ei ole pingete- ja voolude faasoreid, nii et nende kasutamine eeldaks tarkvara muutmist [1].

Faasimõõtmisi integreeritakse estimaatorisse üldjuhul kahel põhimõttel. Esimesel juhul programmeeritakse niinimetatud hübriidestimaator, mis on võimeline sisenditena kasutama nii SCADA-kui ka faasimõõtmiste andmeid ning annab väljundina süsteemi oleku. Teisel juhul säilitatakse tavapärase mittelineaarne estimaator, mis töötleb SCADA-mõõtmisi, ning selle väljund kombineeritakse faasimõõtmiste andmetega lineaarses olekuestimaatoris [1]. See täiendav estimaatori aste kasutab faasimõõtmisi, et täpsustada tavapärase estimaatori tulemusi ning annab väljundina süsteemi oleku [2].

Kirjeldatud kaks lahendust on võimelised andma võrreldava täpsusega tulemusi ning nende põhiliseks erinevuseks on lahenduste tehnilised üksikasjad [3]. Teisena kirjeldatud lähenemist on lihtsam rakendada olemasoleva olekuestimaatori baasil, mida täiendatakse faasimõõtmistel põhineva järeltöötusega, mis täpsustab tavapärase estimaatori tulemusi [2]. Kui arendada uut estimaatori lahendust, on lihtsam koostada hübriidestimaator, mis kasutab samaaegselt SCADA- ja faasimõõtmiste tulemusi.

Järgnevalt on kirjeldatud mõõtemudelit, mis lisab olemasolevale SCADA-mõõtmistel põhinevale olekuestimaatorile faasimõõtmistel põhineva järeltöötuse kihi ehk kasutab eelnevalt kirjeldatud teist lahendust. Tavapärase estimaatori tulemusi täiendatakse faasimõõtmiste tulemustega järgmise lineaarse mõõtemudeli põhjal [1, 2]

$$\mathbf{M} = \mathbf{H}\hat{\mathbf{V}} + \mathcal{E}, \quad (2.1)$$

kus \mathbf{H} on mõõtmiste jakobiaan, $\hat{\mathbf{V}} = [\mathbf{V}_R \mathbf{V}_I]^T$ sõlmepingete reaali- ja imaginaarosi sisaldav olekuvektor (indeksid R ja I tähistavad vastavaid komponente) ning \mathcal{E} mõõtevigade vektor.

Mõõtevektor \mathbf{M} koosneb kolmest osast: tavapärase estimaatori leitud olek $[\mathbf{V}_R \mathbf{V}_I]_{SE}^T$, faasimõõturitega mõõdetud pinged $[\mathbf{V}_R \mathbf{V}_I]_{PMU}^T$ ning faasimõõturitega mõõdetud voolud $[\mathbf{I}_R \mathbf{I}_I]_{PMU}^T$ [2]. Seega avaldub võrrand (2.1) laiendatuna järgmiselt

(2.2)

Harude voolude mõõtmistele vastavad elemendid mõõtmiste jakobiaanis \mathbf{H} sõltuvad kasutatavast liini mudelist. Liini mudeldamisel Π -aseskeemiga avalduksid need järgmiselt

(2.3)

(2.4)

(2.5)

(2.6)

kui \mathbf{I}_1 ja \mathbf{V}_1 on vool ja pinge liini alguses ning \mathbf{V}_2 pinge liini lõpus ning $G_{sh} + jB_{sh}$ on põikjuhtivus ja $G_{sr} + jB_{sr} = 1/\underline{Z}_{sr}$ on pikitakistuse pöördväärtus. Sarnaselt avalduvad osatuletised liini lõpu voolu \mathbf{I}_2 kohta [2].

Võrrandi (2.1) võib lahendada otse, ilma iteratsioonideta, kaalutud vähimruutude ehk WLS meetodil järgmiselt [2]

$$\mathbf{G}\hat{\mathbf{V}} = \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1}, \quad (2.7)$$

kus \mathbf{R} on mõõtevigade kovariatsioonimaatriks ja \mathbf{G} on olekuvektori kovariatsioonimaatriksi pöördmaatriks. Süsteemi olekuvektor avaldub järgmiselt

(2.8)

2.2. Süsteemi oleku jälgimine faasimõõtmistega

Elektrisüsteemi oleku jälgimine laiseiresüsteemis toimib küllaltki sarnaselt oleku estimaatori tööga, kuid neil on ka olulised erinevused. Kuna laiseiresüsteem mõõdab ka suurustevahelisi nurki ning sünkroniseerib kõik mõõteandmed ajas, on piisava koguse andmete puhul võimalik sisuliselt reaajas süsteemi olekut jälgida. Eelmises etapis analüüsiti faasimõõturite paigutust

elektrisüsteemi oleku jälgitavuse seisukohast ning võrreldi ühe ajahetke estimaatori ja faasimõõtmiste tulemusi [4].

Kui süsteemis ei ole nii palju faasimõõtureid, et kogu süsteemi olekut otseselt mõõta, on võimalik teatud puuduvaid suurusi arvutada olemasolevatest. Sarnaselt estimaatori põhimõttega võib eeldada, et liinide parameetrid on piisava täpsusega konstantsed. Sellisel juhul saab liini ühes otsas mõõdetud pinge- ja voolufaasorite põhjal välja arvutada pinge- ja voolufaasorid ning võimsusvoo liini teises otsas või teisel juhul, kui on teada pingefaasorid liini kummaski otsas, leida voolufaasorid ja võimsusvood liini otstes.

2.2.1. Koostatud rakendus

Koostatud rakendus põhineb pärijärgnevussuurustel ja näide sellest on toodud joonisel 2.1. Võrrandid (1.1) ja (1.2) vooludele ja pingetele liini otstes võib kirjutada kujul [5]

$$\underline{U}_1 = \underline{A}\underline{U}_2 \pm \underline{B}\underline{I}_2, \quad (2.9)$$

$$\underline{I}_1 = \pm \underline{C}\underline{U}_2 + \underline{D}\underline{I}_2, \quad (2.10)$$

kus \pm märk sõltub sellest, kumba pidi liini vaadelda ning mis on voolude arvestuslikud suunad.

$$(2.11)$$

$$(2.12)$$

$$(2.13)$$

kus z ja y on teadaolevad liiniparameetrid pikkusühiku kohta ja L liini pikkus. Antud tegurid on liinide andmete põhjal eelnevalt välja arvatud ja rakendusse konstantidena sisestatud.

Mõõdetud pingetest avaldub vool liini lõpus järgmiselt

$$\underline{I}_2 = \pm(\underline{U}_1 - \underline{A}\underline{U}_2)/\underline{B}, \quad (2.14)$$

mis koos võrrandiga (2.10) annavad mõõdetud pingetest voolud. Seejärel avalduvad võimsusvood liini otstes kujul $\underline{U}_1\underline{I}_1^*$ ja $\underline{U}_2\underline{I}_2^*$.

2.2.2. Laiseiresüsteemi ja estimaatori mõõtetulemuste võrdlus

Järgnevalt on esitletud ühest ajaperioodist estimaatori ja laiseiresüsteemi mõõteandmed teatud olekuparameetrite väärtustele. Vaadeldud on 23-minutilist ajavahemikku, millest estimaatori

Joonis 2.1 Programmilõik, mis arvutab liini ühes otsas mõõdetud pinge- ja voolufaasoritest vastavad suurused liini teise otsa jaoks.

tor väljastas kuus mõõtepunkti ning võrdluseks on võetud faasimõõtmiste andmed sekundilise sammuga. Siinkohal on välja toodud liinipinge ja selle nurk (pärijärgnevuskomponendi põhjal) Tartu ja Kiisa alajaamades. Pingenurga määramisel on referentssõlmeks valitud Eesti EJ alajaam, mille pingefaasori nurgaks on võetud null kraadi.

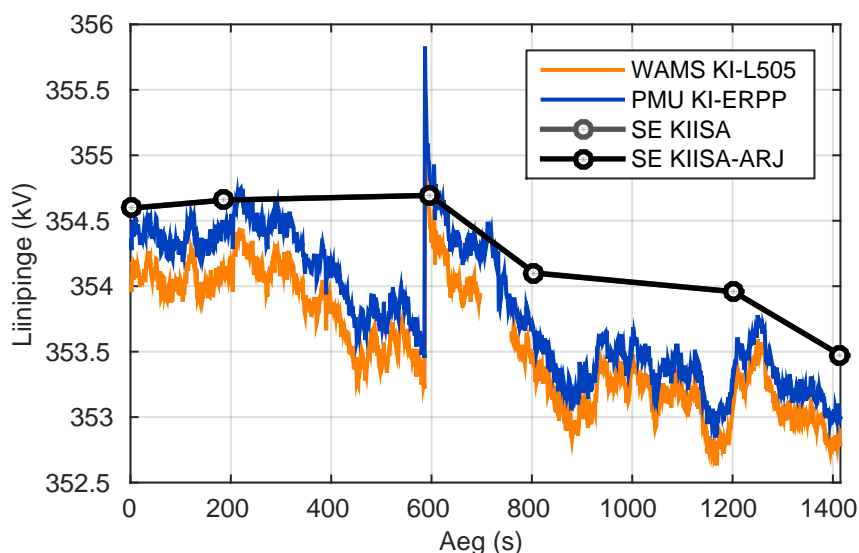
Joonistel 2.2 ja 2.3 on toodud Tartu alajaama pinge ja nurga väärtused vaadeldud ajaperioodis. Ühistel graafikutel on kujutatud estimaatori ja laiseiresüsteemi abil määratud suurused. Estimaatorist on võetud sõlme TARTU_330 pinge ja nurk. Laiseiresüsteemis on pinge ja nurk mõõdetud otse liinide 300 ja 301 faasimõõturitega ning määratud liini 300 Balti EJ alajaama poolse faasimõõturi mõõteandmetest.

Joonis 2.2 Liinipinge Tartu alajaamas estimaatori ja laiseiresüsteemi andmetel. Laiseiresüsteemis on pinge mõõdetud otse kahe liini faasimõõturitega ning määratud liini 300 Balti EJ alajaama poolse faasimõõturi mõõteandmetest.

Nii määratud pinge efektiivväärtuse kui ka nurga puhul on näha, et hetkedel, mil estimaator väljastas määratud suurused, on need küllaltki lähedased faasimõõtmiste tulemustega. Mõlema suuruse puhul võib ka täheldada, et mõningad protsessid jäävad estimaatori väljundis märkamatuks, aga on nähtavad laisresüsteemi abil. Balti alajaama faasimõõturiga Tartu alajaama kohta määratud väärtused on küllaltki lähedased kohapealsete faasimõõturite mõõtetulemustega.

Joonis 2.3 Pingenurk Tartu alajaamas estimaatori ja laiseiresüsteemi andmetel. Laiseiresüsteemis on nurk mõõdetud otse kahe liini faasimõõturitega ning määratud liini 300 Balti EJ alajaama poolse faasimõõturi mõõteandmetest.

Joonistel 2.4 ja 2.5 on toodud Kiisa alajaama pinge ja nurga väärtused vaadeldud ajaperioodis. Ühistel graafikutel on kujutatud estimaatori ja laiseiresüsteemi abil määratud suurused. Estimaatorist on võetud sõlmede KIISA_330 ja KIISA_ARJ330 pinged ja nurgad. Laiseiresüsteemis on pinge ja nurk mõõdetud otse avariireservelektrijaama faasimõõturiga ning määratud liini 505 Harku alajaama poolse faasimõõturi mõõteandmetest.



Joonis 2.4 Liinipinge Kiisa alajaamas estimaatori ja laiseiresüsteemi andmetel. Estimaatorist on välja toodud sõlmede KIISA-330 ja KIISA-ARJ330 pinged ning laiseiresüsteemis on pinge mõõdetud otse avariireservelektrijaama faasimõõturiga ning määratud liini 505 Harku alajaama poolse faasimõõturi mõõteandmetest.

Sarnaselt Tartu alajaama kohta saadud tulemustega, on ka siin estimaatori ja laiseiresüsteemi abil leitud pinge efektiivväärtused sarnased. Harku alajaama faasimõõturiga määratud pinge-

Joonis 2.5 Pingenurk Kiisa alajaamas estimaatori ja laiseiresüsteemi andmetel. Estimaatorist on välja toodud sõlme KIISA–330 ja KIISA–ARJ330 nurgad ning laiseiresüsteemis on nurk mõõdetud otse avariireservelektrijaama faasimõõturiga ning määratud liini 505 Harku alajaama poolse faasimõõturi mõõteandmetest.

nurk Kiisa alajaamas erineb otse faasimõõturiga ja esitmaatoriga määratud väärtustest ligi ühe kraadi võrra. Viga on vaadeldud perioodi jooksul püsiv ning tuleneb tõenäoliselt laiseirerakenduses kasutatud liiniparameetrite ebatäpsusest. Pinge efektiivväärtuses on laiseiresüsteemi vahendusel näha mitmed muutused, mida estimaatori abil ei oleks võimalik tuvastada.

Faasimõõtmiste ja estimaatori kõrvutamise on üldplaanis näha, et vaadeldud suurustele määratud väärtused on küllaltki sarnased. Samuti on saadud küllaltki täpsed tulemused liini ühe otsa mõõtmiste põhjal teise otsa suuruste määramisel. Vähemalt pingete ja nurkade mõõtmisel ei anna laiseiresüsteem tõenäoliselt olulist võitu täpsuses. Olulisem on, et laiseiresüsteem võimaldab näha kiiretoimelisi protsesse, mis estimaatori väljundis ei kajastu, nagu ilmnes ka toodud näidetest.

2.3. Ülekandeliinide jälgimine

Faasimõõtmistel põhinev ülekandeliini jälgimine on teostatud eelmise peatüki alapeatükkide 1.3 ja 1.4 alusel. Järgnevalt kirjeldatud esimene iteratsioon sellest rakendusest on lihtsustatuim ülekandekadude määramise lahendus, mis võimaldab kadusid hinnata nelja erineva komponendina.

Lahendus põhineb võrrandil (1.101), mis omakorda eeldab võrrandite (1.3) ja (1.4) lahendamist pärijärgnevussuuruste põhjal. Rakenduse sisenditeks on pärijärgnevuspinge ja -vool liini kummaski otsas, mis järgnevalt on tähistatud kui \underline{U}_1 , \underline{I}_1 , \underline{U}_2 ja \underline{I}_2 . Lisaks kasutab arvutusmudel ülekandeliini pikkust L .

Võrrandi (1.3) lahendamiseks on kõigepealt vaja lahendada tehe

$$\underline{R} = \frac{\underline{U}_1 \underline{I}_1 + \underline{U}_2 \underline{I}_2}{\underline{U}_2 \underline{I}_1 + \underline{U}_1 \underline{I}_2}, \quad (2.15)$$

mis koosneb omakorda seitsmest alamtehtest kompleksarvudega. Joonisel 2.6 on kujutatud esimene sektsioon koostatud programmist. Plokid kolmes vasakpoolses tulbas vastavad seitsmele tehele, et määrata suurus \underline{R} . Sellele järgnevad kaks tehet, et leida $\underline{S} = \underline{R}^2 - 1$. Sektsiooni viimase operatsioonina leitakse komplekssuuruse \underline{S} amplituud ja nurk.

Joonis 2.6 Programmilõik, mis lahendab võrrandid (2.15) ja $\underline{S} = \underline{R}^2 - 1$.

Programmi järgnev sektsioon, kujutatud joonisel 2.7, leiab suuruse \underline{S} amplituudi ruutjuure $\sqrt{|\underline{S}|}$. Selleks on kasutatud Babülioni meetodi kolme iteratsiooni algväärtusega 0,2, mis on valitud arvestades juuritava väärtuse suurusjärku [6]. See tähendab, et on kolm korda lahendatud tehe

$$r_n = \frac{1}{2} \left(r_{n-1} + \frac{|\underline{S}|}{r_{n-1}} \right), \quad (2.16)$$

nii et $r_0 = 0,2$.

Joonis 2.7 Programmilõik, mis leiab suuruse $\sqrt{|\underline{S}|}$.

Programmi kolmas sektsioon, kujutatud joonisel 2.8, lahendab tehet

$$(2.17)$$

kus viimane võrdus kehtib tingimuslikult suuruse \underline{R} füüsikaliselt korrektsete väärtuste korral. Naturaallogaritm on arvutatud rittaarenduse kolme esimese liikme põhjal

$$(2.18)$$

Järgnev sektsioon kasutab saadud tulemust, et määrata mõõdetud pärijärgnevussuurustest vastavad takistused ja juhtivused. Programmilõik on kujutatud joonisel 2.9. Võrrandis (1.4) ilmnevad

Joonis 2.8 Programmilõik, mis leiab $\text{arcosh} R$ väärtuse.

hüperboolsed funktsioonid on eelnevalt lahendatud, sest $R = \cosh(\gamma L)$ ja $\sqrt{S} = \sinh(\gamma L)$. Konstant 209 on liini pikkus L . Sektsioon annab ka eraldi väljunditena liini pärijärgnevusparameetrid.

Joonis 2.9 Programmilõik, mis arvutab liini pärijärgnevusparameetrid.

Programmi viies sektsioon lahendab osa numbrilisest integreerimisest võrrandis (1.101). Liin on jaotatud kolmeks sektsiooniks pikkustega $L/3$, mis tähendab, et integraal summeerib neli tegurit järgmiselt

(2.19)

kus $I(L) = I_1$ ja $I(0) = I_2$. Suurused $I(L/3)$ ja $I(2L/3)$ avalduvad liinivõrranditest

(2.20)

Varasemalt on määratud $q = \gamma L$.

Hüperboolsete funktsioonide väärtusi on lähendatud järgmiste rittaarenduste põhjal

$$\cosh q = 1 + \frac{q^2}{2!} + \frac{q^4}{4!} + \dots, \quad (2.21)$$

$$\sinh q = q + \frac{q^3}{3!} + \frac{q^5}{5!} + \dots, \quad (2.22)$$

milest on kasutatud kolme esimest tegurit, ning järgnevate võrduste alusel

(2.23)

(2.24)

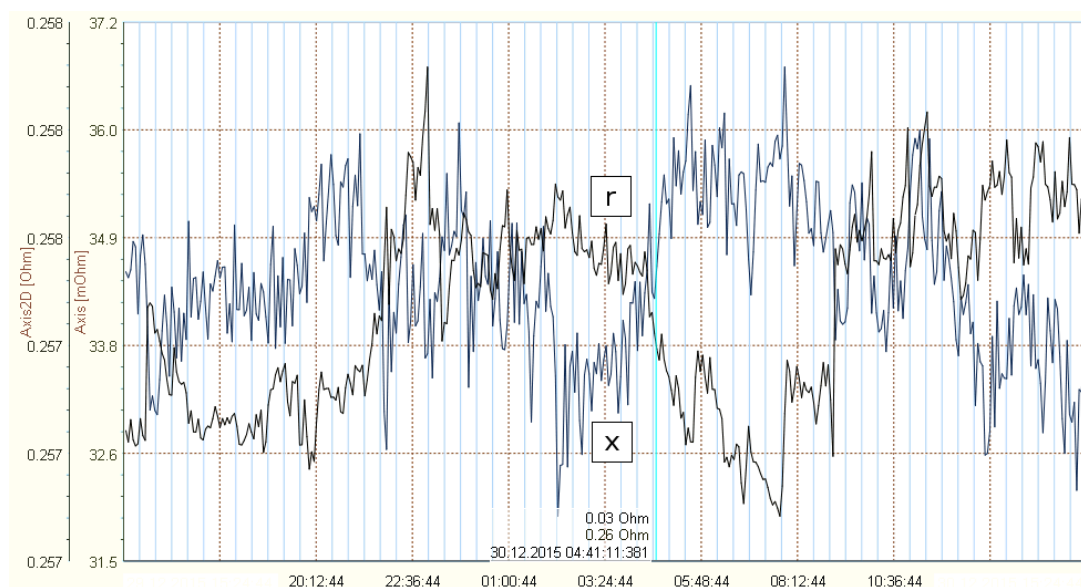
Programmi viimane sektsioon (joonis 2.11) kasutab eelnevalt leitud suurusi, et integraalid lõpuni lahendada. Viimase sektsiooni väljunditeks on kaod pärijärgnevustakistuse ning -juhtivuse

Joonis 2.10 Programmilõik, mis leiab $\cosh(\gamma L/3)$, $\sinh(\gamma L/3)$, $\cosh(\gamma 2L/3)$ ja $\sinh(\gamma 2L/3)$ väärtused.

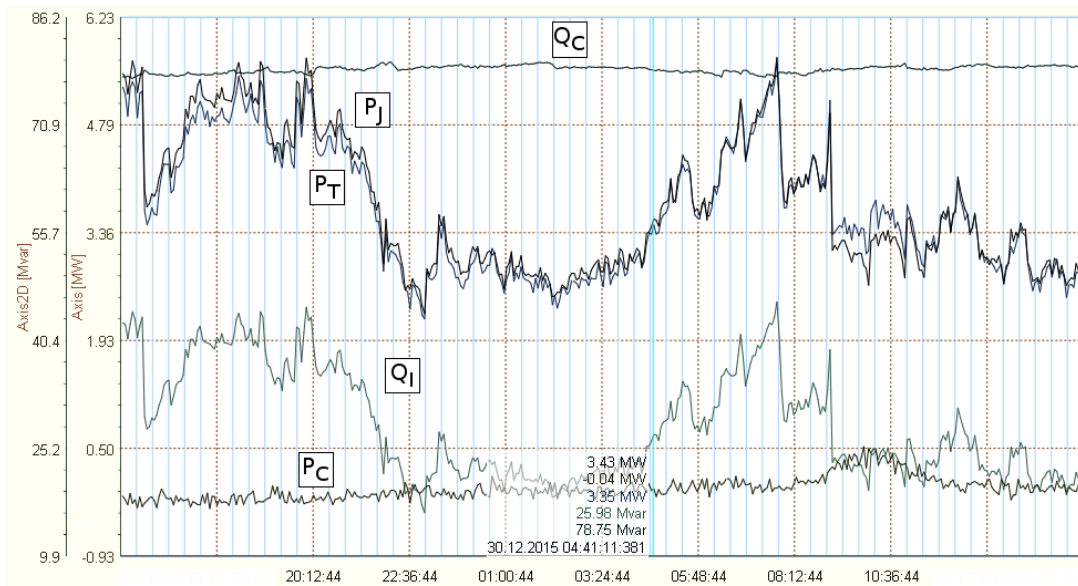
aktiiv- ja reaktiivkomponentides.

Joonis 2.11 Programmilõik, mis arvutab võrrandis (1.101) leiduva summa nelja teguri väärtused, mis vastavad kaokomponentidele.

WAMS-tarkvaras koostatud rakenduse reaalsete väljundite kohta on toodud näited joonistel 2.12 ja 2.13. Rakendus on liinil 300 jooksvalt arvanud liiniparameetrite ning kaokomponentide väärtusi. Graafikutel on toodud 24-tunnise perioodi tulemused.



Joonis 2.12 Ülekandeliini parameetrite jälgimine koostatud laiseirerakenduse abil. Välja on toodud pikitakistuse aktiiv- ja reaktiivkomponendid (vastavalt must ja sinine joon). Sisemisel teljel on aktiiv- ning välimisel reaktiivtakistuse väärtused.



Joonis 2.13 Ülekandeliini kadude jälgimine koostatud laiseirerakenduse abil. Välja on toodud koguaktiivkaod faasimõõturite mõõdetud võimsuste vahena (tumesinine joon) ning väljatõõtatud meetodi abil arvatud kaod soojuslike (must joon) ja koroonakadude (kõige alumine kõver) ning tarbitud (roheline joon) ja toodetud reaktiivvõimsuse (kõige ülemine kõver) komponentidena. Sisemisel teljel on aktiiv- ning välimisel reaktiivvõimsuse väärtused.

2.4. Kokkuvõte

Käesolevas peatükis on antud lühiülevaade faasimõõtmiste integreerimisest elektrisüsteemi oleku estimaatorisse. Faasimõõtmistega on võimalik täiendada estimaatoris kasutatavate mõõteandmete hulka ja täpsust, aga selleks on vaja estimaatorit muuta. Faasimõõtmiste kasutamiseks olekuestimaatoris on kaks põhimõtteliselt erinevat lahendust, kuid nendega on võimalik saada samaväärseid tulemusi.

Projekti kolmandas etapis koostati esimesed laiseirerakendused Eleringi WAMS-tarkvaras: rakendus, millega jälgida 330 kV võrgu olekut ning rakendus, millega jälgida ühte ülekandeliini. Ülekandeliini jälgimise rakendus määrab pärijärgnevussuurustele vastavaid liiniparameetreid ning ülekandekadude komponente, s.o soojuslikud kaod, koroonakaod, induktiivsed kaod ning mahtvuslik genereerimine liinil.

Lõppenud etapi käigus on täiendavalt võrreldud estimaatori ja laiseiresüsteemi mõõtetulemusi. Eleringi WAMS-tarkvaras koostatud rakenduse abil jälgiti teatud perioodi jooksul süsteemi olekuparameetreid ja võrreldi neid estimaatori väljundandmetega. Tulemustest ilmnest, et kaks erinevat süsteemi annavad võrreldavaid tulemusi, kuid laiseiresüsteem võimaldab märgata ja jälgida oluliselt rohkemaid sündmusi ja ajalisi muutusi.

2.5. Kirjandus

- [1] M. Ahmad, *Power System State Estimation*. Norwood, MA: Artech House, 2013.
- [2] R. Nuqui and A. Phadke, “Hybrid linear state estimation utilizing synchronized phasor measurements,” in *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne*, July 2007, pp. 1665–1669.
- [3] J. Chen, “Power system state estimation using phasor measurement units,” in *Theses and Dissertations–Electrical and Computer Engineering*, paper 35.
- [4] “Eesti elektrisüsteemi laiseiresüsteemi arendamine ja analüüs (WAMPAC),” TTÜ elektroenergeetika instituudi uurimustöö 1.1-4/13/232 / Lep13118 II etapi aruanne, 2015.
- [5] M. Farzaneh, S. Farokhi, and W. Chisholm, *Electrical Design of Overhead Power Transmission Lines*. McGraw-Hill, 2012.
- [6] Wikipedia, “Methods of computing square roots — wikipedia, the free encyclopedia,” 2015, [Online; accessed 11-December-2015]. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Methods_of_computing_square_roots&oldid=687754822

3 Elektrisüsteemi reaalajasimulaatorid ja nende võimalused elektrisüsteemi talitluse analüüsil

3.1 Üldist

Elektrisüsteemide modelleerimisel ja analüüsimisel on tavapäraselt kasutatud vastavaid arvutustarkvarasid ning nende mudeleid. Sellisel viisil teostatavate analüüside tulemusel on sisulisel võimalik hinnata ainult ühte ajamomenti ja erinevate muutuste hindamiseks tuleb teostada uued arvutused. Tänapäeva moodsam suund on erinevate arvutuste teostamine reaalajasimulaatoritel, mis võimaldab reaalajas uurida erinevate komponentide käitumist ning mõju teistele seadmetele ja elektrisüsteemi talitlusele üldiselt. Vaatleme näitena reaalseid alalisvoolusüsteeme, kus hindamaks alalisvooluühenduse ja elektrisüsteemi vastastikuseid mõjusid on palju kergem ja otstarbekam kasutada elektrisüsteemi modelleerimiseks reaalajasimulaatorit. Seeläbi on võimalik hinnata ja modelleerida erinevaid sündmusi elektrisüsteemis ning vaadata kuidas reaalne alalisvoolu juhtimissüsteem nendele muutustele reageerib. Kuna tegemist on reaalse juhtimissüsteemiga, siis on võimalik muuta mistahes elementi või juhtimissüsteemi osa ja koheselt näha kuidas käitub elektrisüsteem ja selles olevad teised komponendid ning seeläbi hinnata alalisvooluühenduse talitlust. Samuti on reaalajasimulaatoreid võimalik kasutada mistahes releede, automaatikaseadmete ja muude füüsiliste elementide katsetamiseks ilma, et peaks selleks kasutama reaalselt elektrisüsteemi. Samuti on võimalik hinnata erinevate koostatud juhtimisalgoritmide mõju elektrisüsteemi talitlusele ning täpsemalt seadistada erinevaid juhtimisfunktsioone.

Siinkohal tekib küsimus, et mida mõistetakse reaalaja, kui mõiste all? Reaalajana käsitletakse siinkohal erinevate süsteemide üheaegset arvutamist, kestust mõõdetakse arvestades perioode, arvutused teostatakse kiiremini kui reaalsuses vaadeldav ajaühik, igal arvutussammul on sama kestus ning sisendeid ja väljundeid uuendatakse ajavahemikuga võrdse konstantse arvutussammu järel.

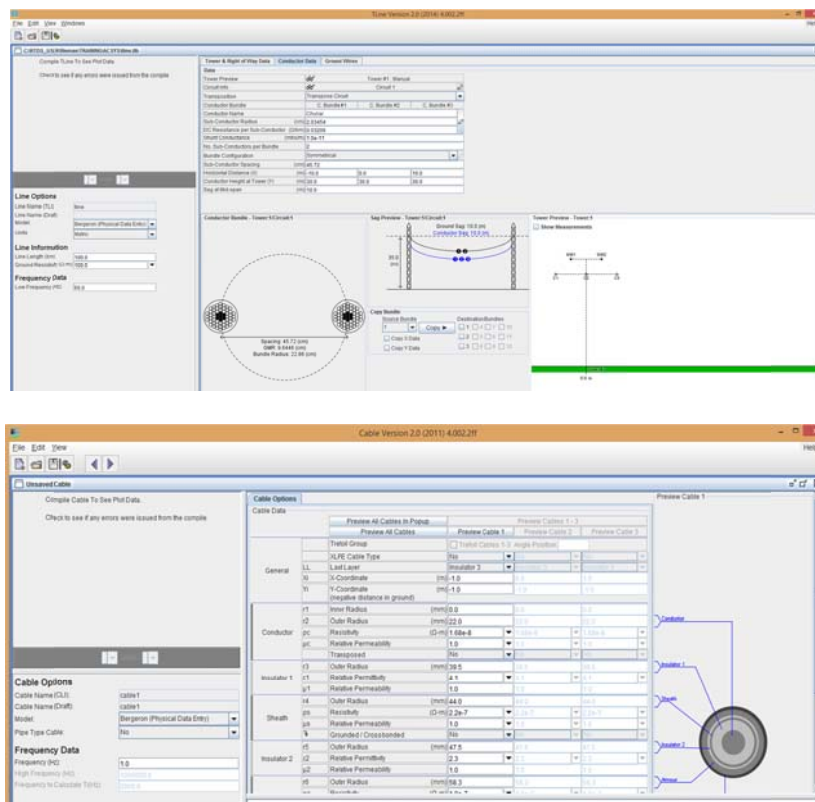
3.2 Reaalajasimulaatorid

Tänapäeval on maailmas kaks reaalajasimulaatorite tootjat – RTDS ja OPAL-RT. Hinnates kasutatavaid lahendusi ning kasutatavust teistes ülikoolides ja tootjate juures on eelistatumaks lahenduseks RTDS poolt tarnitav süsteem (joonis 3.1). Peamisteks eelisteks on täpsemad mudelid ja standardsete mudelite olemasolu. Välja võib tuua näidetena sünkroongeneraatori faasidomeeni mudel ning maailma täpsemad õhuliinide ja kaabelliinide mudelid (nt OPAL-RT

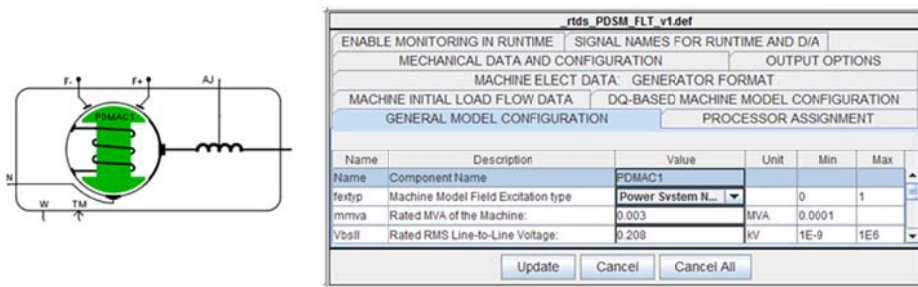
on õhuline võimalik modelleerida ainult Bergeron mudelitega) (joonis 3.2). Samuti on RTDS tarkvaras olemas mitmed inverteerite ja konverteerite mudelid. Mudelite poole pealt on veel oluline, et mudelitesse sisestavad andmed on RTDS puhul üldjuhul samad, mis on esitatud tootjate poolt esitatavatel andmelehtedel (joonis 3.3). OPAL-RT korral tuleb mudelitesse sisestavad parameetrid enne iseseisvalt arvutada ja alles seejärel saab neid mudelisse sisestada.



Joonis 3.1. RTDS reaalaajasimulaatori komponendid [1].

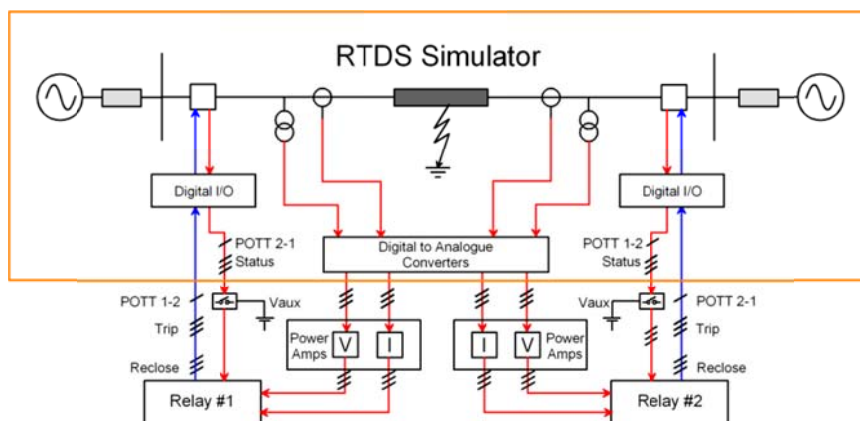


Joonis 3.2. Õhulini ja kaabelliini mudelid ja sisestavad andmed [2].



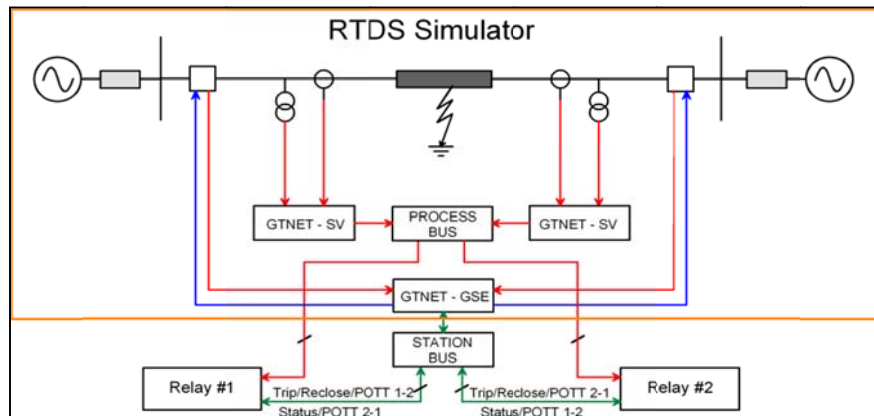
Joonis 3.3. Masina mudel ja väärtuste sisestamine [2].

Tähtsaimaks erinevuseks kahe lahenduse vahel on arvutussammu suurus – RTDS suudab kasutada arvutussammu 2,5 us, OPAL-RT seevastu standardseadmena 30us. Väiksema arvutussammu saavutamiseks on tarvilik kasutada täiendavat moodulit (FPGS). RTDS seadet on ise võimalik skaleerida vastavalt vajadustele, võimalik on lisada mooduleid ka hilisemalt peale seadme soetamist. OPAL-RT puhul on hilisem täiendamine keeruline seda just protsessori ja teiste peamiste komponentide raames. RTDSi süsteemiga on võimalik ühendada sisuliselt piiramatu arvu sisend-väljund porte. Samuti kuna kasutusel on kiiberoptiline sidestus siis seadmega on füüsiliselt võimalik ühendada ka suuremaid seadmeid, mis laborisse nt ei mahu aga neid saab kohale tulla ja paigaldada labori lähedusse (nt keldrisse, kuuri, lattu). OPAL-RT puhul on sisend-väljund portide arv piiratud ning ühendused seadme ja võimalike katsetatavate objektide vahel ei saa olla suured. PMU-de katsetamise ja rakendamise kohapealt on RTDS samuti eelised, kuna otseselt on võimalik testida PMU funktsioone ja neid ka digitaalselt modelleerida – OPAL-RT selline võimalus hetkel veel puudub. Seadmete ühendamist RTDS reaaliasimulaatoriga illustreerib joonis 3.4. Vastavalt joonisele modelleeritakse elektrisüsteem reaaliasimulaatoris ja uuritavad releed ühendatakse seadmega kasutades signaalide edastamiseks digitaalseid sisend ja väljund porte ning mõõtesuuruste edastamine toimub läbi digitaal-analoog konverterite ning läbi võimendite.



Joonis 3.4. Reaaliasimulaatori ja testitavate objektide ühendamine [1].

Täiendavalt on releede juhtimist ja katsetamist võimalik teostada kasutades uusi lähenemisviise. Üheks võimaluseks on IEC 61850 ühenduslüli kasutamine (joonis 3.5).



Joonis 3.5. Reaalajasimulaatori ja testitavate objektide ühendamise IEC 61850 abil [1].

Tähtsal kohal on reaalajasüsteemide juures ka tarkvara. RTDS juures kasutatav tarkvara RSCAD on oma olemuselt suhteliselt sarnane PSCAD tarkvaraga, mistõttu on selle kasutamine kasutajatele, kes tunnevad PSCAD-i lihtne. Samuti on mudelite ehitus ja modelleerimise põhimõtted suhteliselt sarnased RSCAD-i ja PSCAD-i vahel. Oluliseks on, et RTDS kasutamiseks on vajalik ainult üks tootja poolt tarnitav tarkvara. OPAL-RT seevastu baseerub Matlab tarkvarale ning samuti on kasutusel just OPAL-RT poolt välja töötatud oma tarkvara. See tähendab, et lisaks põhitarkvarale on vaja juurde muretseda ka teisi täiendavaid tarkvarasid.

3.3 Reaalajasimulaatori RTDS võimalused

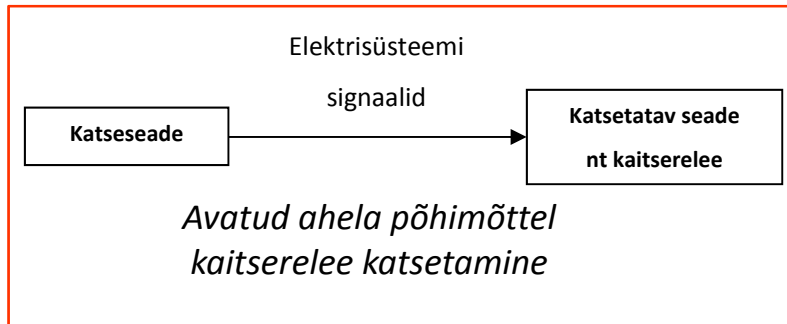
Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituudi elektrivõrkude labori täiendati 2015. aasta teises pooles RTDS elektrisüsteemi reaalajasimulaatoriga. Tegemist on maailma tipptasemel seadmega ja selle abil on võimalik uurida erinevaid tänapäeval aktuaalseid elektrivõrkude ja selle erinevate komponentide juhtimistega seotud teematuid. Ülevaatliku kokkuvõtte võimalustest annab joonis 3.6. RTDS on oma olemuselt elektromagnetiliste protsesside arvutamiseks mõeldud seade, mille arvutusalgorithm põhineb Dommeli algoritmil ja integreerimisest tuntud trapetsi reeglil. Arvutuste tulemusena arvutatakse igale ajahetkele uus lahend. Olulisemateks uurimisvaldkondadeks on laijuhtimise ja kaitsesüsteemidega, hajatootmise ja tarkade võrkude, releekaitse uute põhimõtete testimise (IEC 61850) ja suurte süsteemidega seotud teematuid. Lisaks on reaalajasimulaatoriga võimalik uurida erinevate seadmete ja juhtimiskontrollerite koostööd enne nende võrku ühendamist. Üldistatult võttes on võimalik uurida

ja seadistada mistahes elektrivõrkude ja süsteemidega seotud lahendusi enne nende kasutuselevõttu realses elektrisüsteemis.

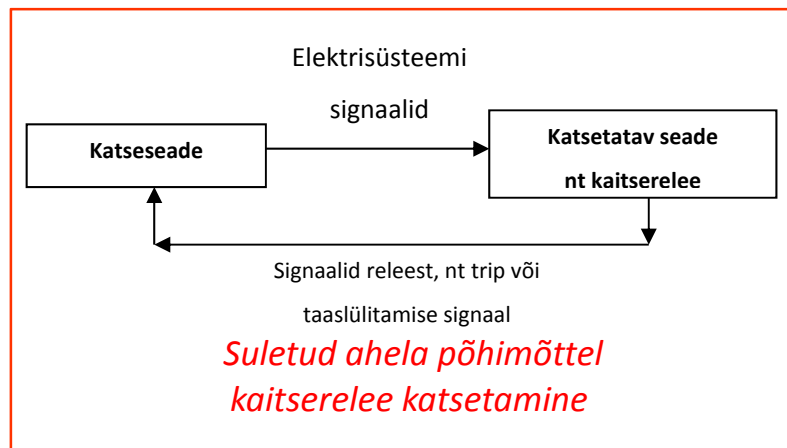


Joonis 3.6. Reaalajasimulaatori rakendusvaldkonnad elektrisüsteemi talitluse analüüsimisel [1].

Releekaitse testimise raamistikus on võimalik kasutada mitmeid lähenemisviise. Kõige lihtsamaks lahenduseks on katsesignaalide tekitamine ja nende alusel rele kätumise hindamine. Sellise lähenemist kasutatakse kontrollkatsete juures ja reaalseid elektrisüsteemi signaale ei kasutata. Üldjuhul on kasutatavad signaalid mitterealistlikud ja mõnedel juhtudel võivad anda vääri tulemusi releede kätumisest. Täpsemateks lähenemisviisideks on reaalsete mõõdetud või simuleeritud elektrisüsteemi signaalide kasutamine. Samas on selline lähenemine kasutatav kuni rele väljalülitumiskäsuni ja üheaegselt saab katsetada ainult ühte releed. Sellist lähenemist võib nimetada avatud ahela põhimõttel kaitserelee katsetamiseks (joonis 3.7a). Tänapäeval võib moodsaimaks lähenemisviisiks lugeda reaalajasimulaatori abil releede katsetamist. Sellist lähenemisviisi saab nimetada ka suletud ahela põhimõttel kaitserelee katsetamiseks (joonis 3.7b). Sel viisil on üheaegselt võimalik katsetada mitmeid releesid ja kontrolleleid ja hinnata nende kätumist sarnaselt juhtumile, kus need seadmed oleksid realselt elektrisüsteemis töös. Sellise lähenemisviisi puuduseks on tarvidus reaalajasimulaatori järele. Samas võimaldab see täpsemat tulemust ja sisulist arusaama rele kätumisest.



a)



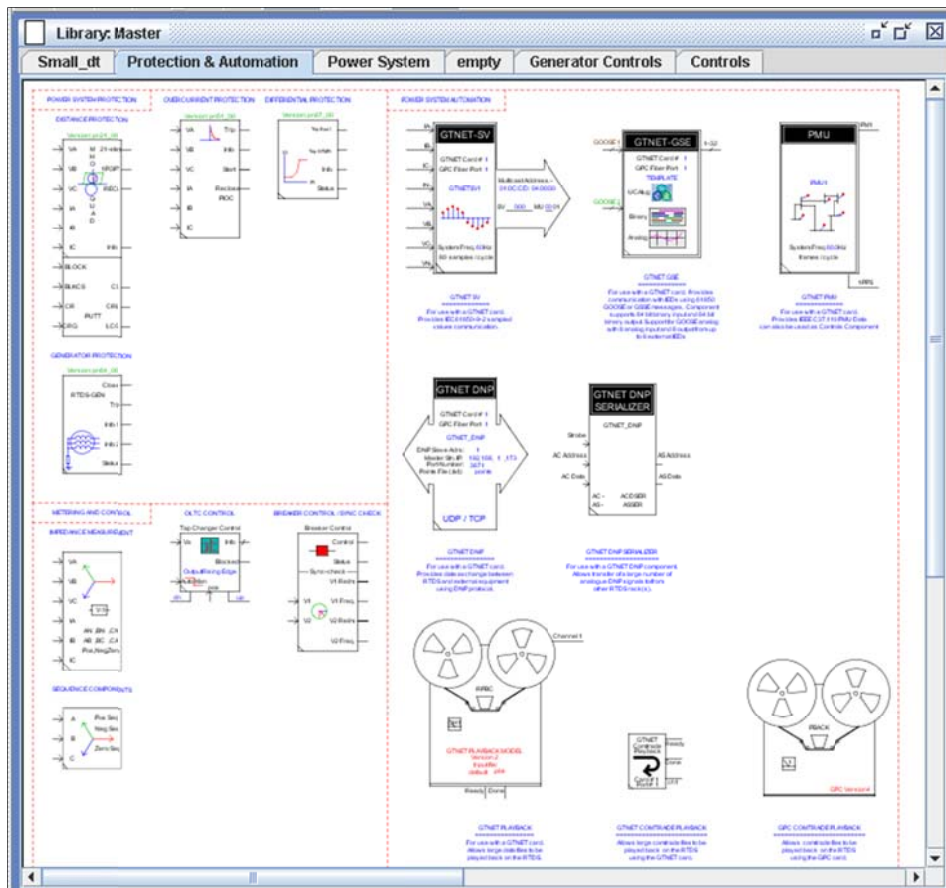
b)

Joonis 3.7. Releede katsetamise a) avatud ahela ja b) suletud ahela põhimõtte [1].

Kaitserelleede modelleerimiseks on RDTS RSCAD tarkvaras olemas mudelid liini kaitsele, generaatori kaitsele, diferentsiaalkaitsele ja liigvoolukaitsele. Täiendavalt on võimalik modelleerida automaatikaseadmeid, nt võimsuslüliti juhtimine ja *synchro check* funktsioon ja trafo astmelüliti juhtimine. Lisaks releedele on saadaval ka PMU mudelid ja võimalik on samuti rakendada standardit IEEE C37.118.

Elektrisüsteemi elementide juhtimissüsteemide valdkonnas on võimalik modelleerida ja uurida alalisvooluühenduste (türistoridel baseeruvad lahendused, 2- ja 3-astmelised VSC plus MMC lahendused), SVC, TCSC ja STATCOM (2- ja 3-astmelised VSC plus MMC lahendused), ja generaatori juhtimisega (erguti, kiirusregulaator, võnkesummuti) seotud lahendused. RSCAD võimaluste ülevaade releekaitse ja automaatika valdkonnas on esitatud joonisel 3.8.

Olulisemateks uuendusteks RTDS tarkvaras on võimalus otseselt konverteerida PSS/Es koostatud skeeme ja skeemi parameetreid. Samuti on olemas võimalus teisendada Matlab/Simulink keskkonnas loodud juhtimisskeeme ja C koodis koostatud programme. Võimalik on luua ühendus SCADA süsteemiga IEC 61870-5-104 protokolliga vahendusel ja uurida alajaamade sisemiseks infovahetuseks kasutatavat sideprotokolliga IEC 61850 ja GOOSE sõnumeid.



Joonis 3.8. RSCAD tarkvara võimalused elektrisüsteemi relekaitse ja automaatika vallas [2].

Järgnevalt on vaadeldud näidetena RTDS süsteemi võimekust erinevate ülesannete lahendamisel. Võrdlusena on välja toodud erinevate elektrisüsteemi elementide ja matemaatiliste lahendusalgortimide PB5 protsessorite kasutamise maht. Joonisel 3.9 ja tabelis 3.1 on kujutatud elektrisüsteemi, kus üks generaator on läbi liinide ühendatud kahe ekvivalentse generaatoriga. Sellise ülesande lahendamiseks on tarvis kahte PB5 tüüpi protsessorit. Joonisel 3.10 ja tabelis 3.2 on kujutatud elektrisüsteemi, kus kolm generaatorit on läbi liinide ühendatud süsteemi kujutava kahe ekvivalentse generaatoriga. Sellise ülesande lahendamiseks on tarvis kahte PB5 tüüpi protsessorit. Joonisel 3.11 ja tabelis 3.3 on kujutatud elektrisüsteemi, kus üks klassikaline alalisvooluühendus on ühendatud süsteemi kujutavate ekvivalentsete generaatoritega. Sellise ülesande lahendamiseks on tarvis kahte PB5 tüüpi protsessorit. Joonisel 3.12 ja tabelis 3.4 on kujutatud elektrisüsteemi, kus üks süsteemi osadeks lisaks sünkroongeneraatorile ja süsteemi ekvivalentile on päikesepaneelid ja elektrituulikud. Sellise ülesande lahendamiseks on tarvis kolme PB5 tüüpi protsessorit. Joonisel 3.12 ja tabelis 3.5 on kujutatud IEEE 108 latiga süsteemi. Sellise süsteemi lahendamiseks on tarvis kolmeteist PB5 tüüpi protsessorit.

3.4 Reaalajasimulaatori kasutusvaldkonnad elektrisüsteemi jälgimisel, kaitsmisel ja juhtimisel

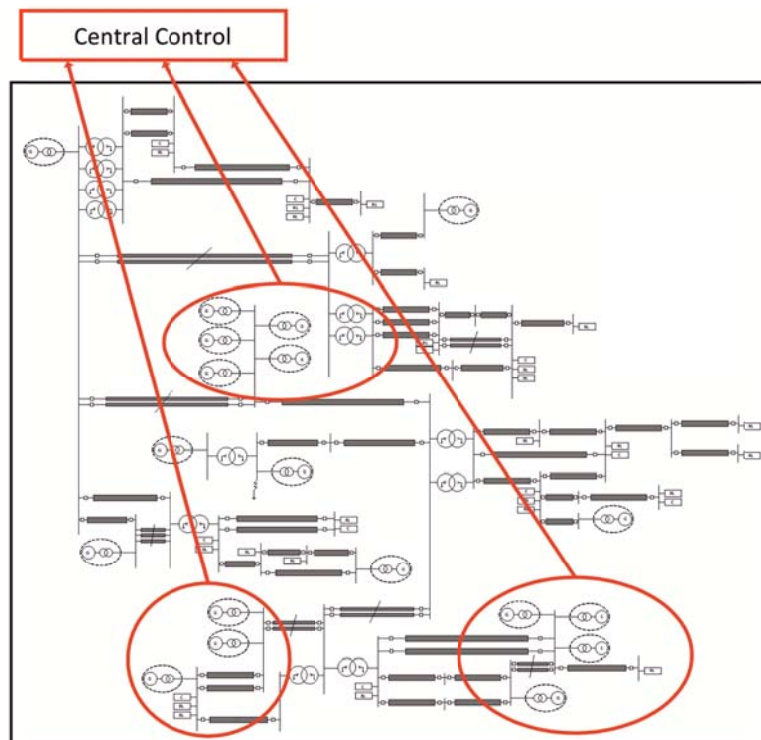
Reaalajasimulaatorite kasutamine elektrisüsteemide modelleerimisel ja analüüsil on tingituna erinevate tootmisüksuste, alalisvooluühenduste ja moodsate juhtimissüsteemide lisandumisega muutunud järjest populaarsemaks. Tänapäeval kasutavad mitmed põhivõrguoperaatorid oma süsteemi analüüsimiseks ja hindamiseks reaalajasimulaatoreid. RTDS simulaatorit kasutavad Prantsusmaa, Brasiilia, Saudi-Araabia, Uus-Meremaa, Lõuna-Aafrika Vabariigi, Hiina, jm riikide põhivõrkude operaatorid.

Reaalajasimulaatorit on võimalik elektrisüsteemi talitluse analüüsil kasutada hajatootmise modelleerimiseks ja analüüsiks, laijuhtimise- ja laikaitesüsteemide rakenduste katsetamiseks, kaitserелеede katsetamiseks, tarkvõrkude alaste uuringute teostamisel, HIL (*Hardware in the loop*) juhtimissüsteemide katsetusteks, jm. Vaadeldes näitena releekaitse alaseid uuringuid, siis reaalajasimulaatori peamine eelis seisneb siinkohal ka vastavate rele talitlemise järgsetes reaktsioonides elektrisüsteemis. Samuti on üheaegselt võimalik katsetada mitut releed ning hinnata nende vastastikku mõju ja mõju süsteemile.

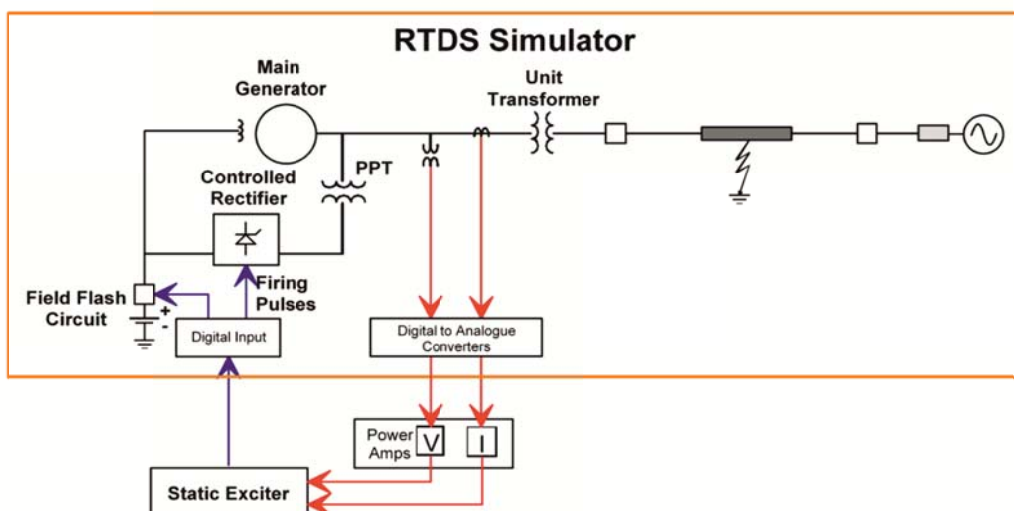
Elektrisüsteemi laijuhtimise algoritmide ja juhtimisfunktsioonide sobilikkuse hindamiseks on võimalik kasutada reaalajasimulaatorit ja lisaks ka reaalseid releesid ja muid automaatikaseadmeid. Võimalik on kõiki neid seadmeid koos modelleerida ja uurida nende koostoimet ilma reaalse elektrisüsteemita. Seeläbi on võimalik avastada võimalikud vead ja vältida elektrisüsteemi kaitse- ja juhtimisseadmete valetöötamist. Ühe võimaliku rakenduse avariitõrjeautomaatika alase rakenduse graafiline esitus on kujutatud joonisel 3.14. Eesmärk siin on koguda mõõteandmeid erinevatest elektrivõrgu piirkondadest, analüüsida tulemusi ning teostada vajalikud juhtimistegevused. Samuti on reaalajasimulaator sobilik erinevate süsteemi pimekäivitusstsenaariumite väljatöötamisel, nende funktsionaalsuse hindamisel ja seadistamisel. Seeläbi on võimalik välja töötada ka vastavaid lahendusi Eesti elektrisüsteemi tarvis.

Reaalajasimulaatori abil on võimalik katsetada generaatorite juhtimissüsteemi ja selle seadistusi (joonise 3.15). Seeläbi on võimalik adekvaatselt hinnata ergutusregulaatori seadistuste sobilikkust paralleeltöök elektrisüsteemiga ning vajadusel leida õiged sätted. Samuti on võimalik omavahel koordineerida generaatori ergutussüsteemi erinevate piirajate ning generaatorite ja võrgu releekaitse sätteid. Täiendavalt pakub selline lähenemine ka võimalust hinnata generaatorite dünaamiliste mudelite vastavust reaalsete mõõtmistega ja teiste arvutustarkvarade mudelitega (nt PSS/E ja PSCAD). Lisaks generaatorite mudelitele on tähtsal kohal ka teiste

elektrivõrgu elementide ja kogu elektrisüsteemi käitumise hindamine võrreldes teistes arvutustarkvarades koostatud mudelitega. Kuna RSCAD tarkvaras koostatavad mudelid on suhteliselt sarnased PSCAD tarkvaras koostatavate mudelitega, siis saab mudelite parameetreid suhteliselt lihtsalt kanda ühest tarkvarast teiste. Samas tuleb siinkohal siiski arvestada, et RSCAD tarkvaras kasutatavad mudelid on oma olemuselt täpsemad ja seetõttu võivad tulemustes siiski esineda mõningad erinevused.



Joonis 3.14. Avariitõrjeautomaatika ühe võimaliku lahenduse põhimõtteskeem [1].

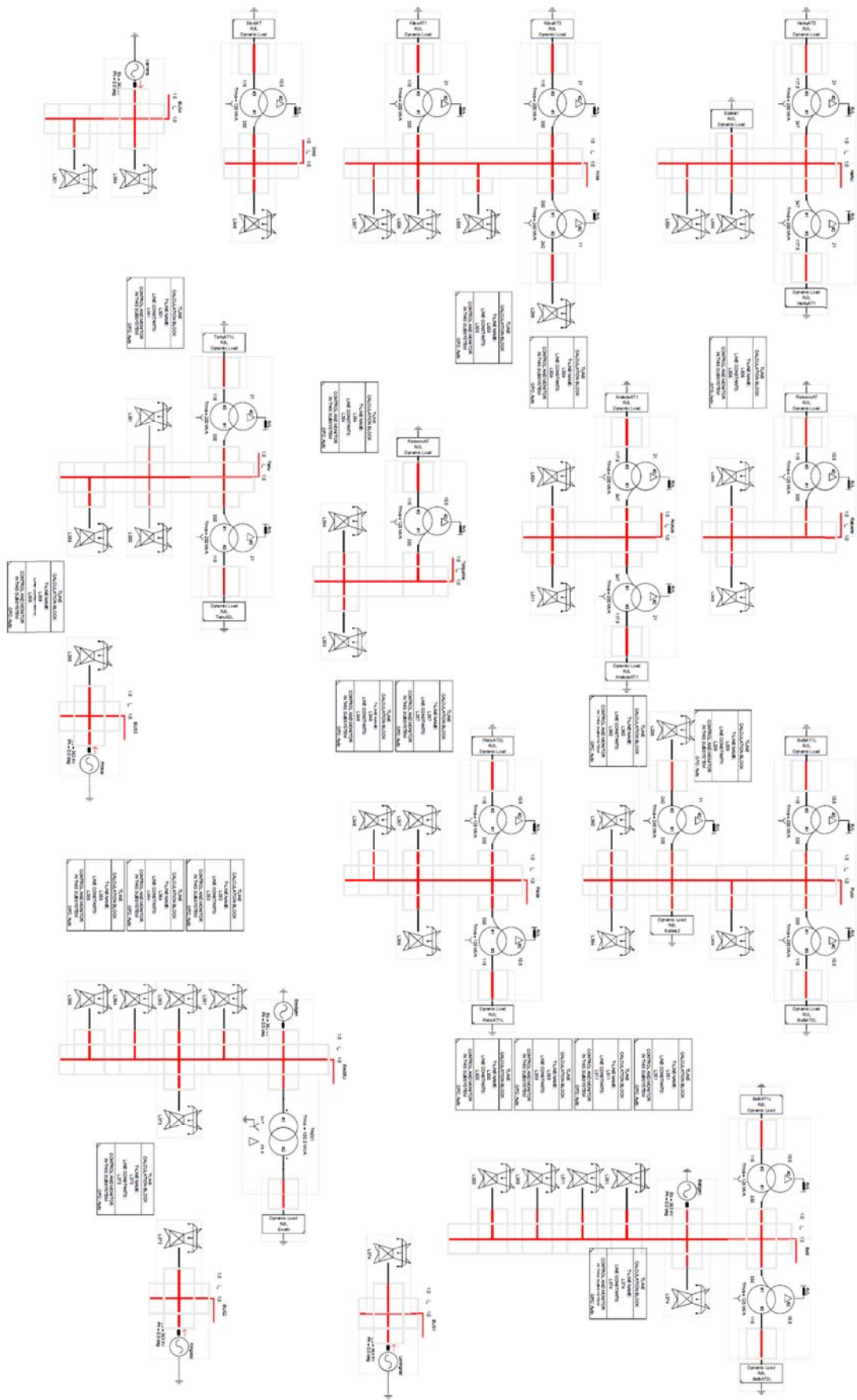


Joonis 3.15. Generaatori juhtimissüsteemide katsetamine [1].

Tulevikku arvestades on reaalajasimulaatorit võimalik kasutada mitmesugustes uurimistöös, mis hõlmavad Eesti elektrisüsteemi ühinemist Lääne-Euroopa ühendenergiastüsteemiga. Võimalik on hinnata elektrijaamade, alalisvooluühenduste ja süsteemi vastastikust mõju ja talitlemist erinevates olukordades. Planeeritava B2B alalisvooluühenduse mõju uurimine on kindlasti üks võimalik rakendusvaldkond. Samuti on võimalik täpsemalt uurida alajaamade juhtimissüsteemide olemust ja uusi rakendusi arvestades võrguettevõtjate nõudmisi ja uusi tehnilisi lahendusi.

Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituudi elektrivõrkude laboris on töökorda seatud reaalajasimulaator RTDS, mis koosneb kahest moodulist ja kokku omab kuute PB5 kaarti. Selle süsteemiga on võimalik modelleerida ja uurida erinevaid protsesse ning vajadusel on reaalajasimulaatorit võimalik ümber seadistada suuremamahulisemate projektide tarvis. Süsteemi on võimalik ühendada erinevaid kontrollereid, releesid, mootoreid, päiksepaneele, konvertereid jm. Esimese etapina modelleeriti reaalajasimulaatoris Eesti elektrisüsteemi 330 kV võrk eesmärgiga järgnevalt uurida võimalikke releekaitse ja automaatika rakendusi Eesti elektrisüsteemi raamistikus. Põhirõhk on suunatud süsteemiautomaatika ja erinevate juhtimissüsteemide arendamisele.

Reaalajasimulaatoris on Eesti elektrisüsteemi 330 kV võrgu modelleerimisel lähtutud põhimõttest, et kasutatakse RSCAD tarkvara standardseid mudeleid. Süsteemi modelleerimisel kasutatud reaalse elektrivõrgu parameetrid on saadud Elering AS-ist ja modelleeritud on kõik ülekandeliinid, trafod, koormused, reaktorid, generaatorid ja süsteemi ekvivalendid. Modelleeritud võrku illustreerib joonis 3.16. Süsteemi ekvivalentide modelleerimine on nt võrreldes PSCAD ja PSS/E tarkvarades kasutatud lähenemisviisiga pisut erinev, kuna tulenevalt arvutusalgoritmist ja reaalajasimulatsioonide eripäradest ei ole soovituslik kasutada elektrivõrgu ekvivalentse takistuse modelleerimisel induktiivsuse jadaühendust (Thevenini ekvivalent). Simulatsiooni käigus võib tekkida nimisagedusest kõrgema sagedusega voolusid, millede korral on jadaühenduses induktiivsus suur takistus ning koosmõjus ideaalse pingevalikaga võib tekkida numbriline ebastabiilsus. Sellise olukorra vältimiseks kasutatakse elektrivõrgu ekvivalenti modelleerimisel R-R//L takistusega ekvivalente ja lähteandmetes esitatud Thevenini konstandid on teisendatud sobilikule kujule. Teiste elementide modelleerimisel lähtutakse üldjoontes samadest põhimõtetest võrreldes PSS/E ja PSCAD tarkvarades elektrisüsteemi elementide modelleerimisel ning selle tingituna ei ole neid selles aruandes lähemalt vaadeldud.



Joonis 3.16. Eesti 330 kV elektrivõrk modelleerituna RSCAD tarkvaras.

3.5 Kokkuvõte

Elektrisüsteemi talitluse modelleerimine ja analüüs reaalajasimulaatoritega võimaldab täpsemalt uurida erinevate elektrisüsteemi komponentide omavahelist mõju, koostada ja katsetada võimalike laimõõtmistel põhinevate rakenduste sobilikkust ning verifitseerida olemasolevaid ja koostatavaid elektrisüsteemi komponentide dünaamilisi mudeleid.

Käesolevas peatükis käsitleti ülevaatlikult reaalajasimulaatorite olemustest ning võimalustest elektrisüsteemi modelleerimisel ja talitluse analüüsimisel. Ülevaatlikult leidis kajastamist Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituudi elektrivõrkude laboris paiknev reaalajasimulaator RTDS. Süsteem on oma omadustelt modulaarne ja võimaldab seda tulevikus suurendada ning sellega on võimalik ühendada reaalseid seadmeid, sh kontrollereid, releed, mootorid jm. Hetkel koosneb süsteem kahest moodulist ja kuuest PB5 protsessorist, samuti on olemas ühendusvõimalused väliste seadmetega infovahetuseks.

Eesti elektrisüsteemi kontekstis pakub elektrisüsteemi reaalajasimulaator otsest huvi alalisvooluühenduste, tuulelektrijaamade, soojus- ja koostootmiselektrijaamade, päikeselektrijaamade, releekaitse, süsteemikaitse rakenduste, *smart grid* tehnoloogiate ja laiseirel põhinevate protsesside ja rakenduste koostamisel ning uurimisel.

3.6 Kirjandus

- [1] RTDS/RSCAD Introductory course material. RTDS Technologies, 2015.
- [2] Real Time Digital Simulator Users Manual, RTDS Technologies, 2015, 532 pp.
- [3] RTDS informative brochure, RTDS Technologies, 2014, 25 pp.

Kokkuvõte

Käesolev aruanne võtab kokku teadus-ja arendusprojekti „Eesti elektrisüsteemi laiseiresüsteemi analüüs ja arendamine“ kolmanda etapi.

Uurimistöö kolmandas etapis on jätkatud varasemat tööd faasimõõtmiste abil ülekandeliinide jälgimise meetodika välja arendamiseks. Edasiarendatud meetodid on kokku võetud aruande esimeses peatükis. Välja on toodud täiendavaid tulemusi meteoroloogiliste mõõtmiste põhjal soojusliku talitluse mudeldamisest, on saadud esimene lahendus mõõtetrafode mõõtmisvigade kompenseerimiseks, täpsustatud ülekandeliinide parameetrite määramise teoreetilist lahendust ning töötatud välja täpsem lahendus ülekandekadude komponentide määramiseks. Edasise arendustöö käigus leitakse korrektne ja rakendatav lahendus mõõtetrafode mõõtmisvigade korrigeerimiseks ning teostatakse täiendavad katsed kontrollimaks koroonakadude mõõtmise võimalikkust ja täpsust.

Selles etapis on koostatud esimesed rakendused Eleringi WAMS-tarkvaras, mis mõõdetud ja kogutud andmetest teisi otsitavaid suurusi arvutavad. Teises peatükis on ülevaatlik kokkuvõte faasimõõtmiste integreerimisest elektrisüsteemi oleku estimaatorisse. Lisaks sellele on süsteemi oleku jälgimiseks koostatud rakenduse abil kogutud mõõdetud ja arvutuslikke andmeid süsteemi oleku kohta ning võrreldud neid estimaatori tulemustega, sealjuures on vaadeldud ka ajalisi muutusi. On koostatud ka ülekandeliini jälgimise rakendus, mis arvutab reaajas liini pärijärgnevusparameetreid ja võimalik on komponentidena määrata ülekandekadusid. Edasise arendustöö käigus koostatakse põhjalikum programm, mis rakendab ka väljatöötatud liiniparameetrite määramise meetodikat ja rakendus, mis reaajas ülekandeliini läbilaskevõimet määrab.

Eraldiseisva rakendusena on välja töötatud lahendus laimõõtmiste kuvamiseks interneti vahendusel nii arvutites kui ka nutitelefones. Rakenduse arendamiseks on lisas 1 välja toodud selle tehniline arhitektuur ja esitatud võimalik platvorm veebirakenduseks. Hetkel on rakendus esitatud üldistatud kujul ja eeldatud on, et järgnevate tegevuste raamistikus toimub selle edasiarendamine.

Reaalajasimulatsioonidega seotud temaatika kokkuvõtte on esitatud aruande kolmandas peatükis. Vaatluse all on täpsemalt reaalajasimulaator RTDS ja selle võimalused, kuna sama seade mahuga kaks moodulit ja kuus protsessorit koos sisend- ja väljundmoodulitega on alates 2015. aasta lõpust paigaldatud TTÜ elektroenergeetika instituudi elektrivõrkude laborisse. Selguse mõttes on esitatud reaalajasimulaatori ja modelleeritavate süsteemide vahelised seo-

sed ja mahud. Uurimistöö raames on tehtud esmased arvutused Eesti 330 kV ülekandevõrgu talitluse hindamiseks ja analüüsiks. Kokkuvõtvalt võib öelda, et reaajasimulaatoriga on võimalik uurida ja lahendada mitmeid olulisi elektrisüsteemi analüüsimise ja juhtimisega seotud probleeme. Arvestades Eesti elektrisüsteemi olemust ja võimalikke tulevikuplaane, siis võimalikeks järgnevateks uurimissuundadeks on releekaitse ja süsteemiautomaatikaga seotud teematikad. Samuti laiseire rakenduste, alalisvooluühenduste, tuule- ja päikeseelektrijaamade, ja võimalikud muud elektrisüsteemi juhtimisega seotud teemad.

Selle uurimistöö tulemusi on avaldatud mitmetes teadusaruannetes, konverentsikogumikes ja ajakirjades. Kokkuvõtlikult on need esitatud lisas 2.

Lisa 2 Uurimistöö tulemusel avaldatud aruanded ja teaduslikud artiklid

Teadustöö aruanded:

1. Palu, I.; Valdma, M.; Meldorf, M.; Keel, M.; Šuvalova, J.; Šlenduuhov, V.; Kangro, T.; Vaino, S.; Sarnet, T.; Kilter, J.; Ülavere, E.; Reinson, A. Eesti elektrisüsteemi laiseiresüsteemi arendamine ja analüüs (WAMPAC). Uurimustöö 1.1-4/13/232 / Lep13118 I etapi aruanne. Tallinna Tehnikaülikool, elektroenergeetika instituut. 2014, 195 lk.
2. Palu, I. Meldorf, M.; Šuvalova, J.; Liiv, I.; Tuttelberg, K.; Kangro, T.; Astapov, V.; Sarnet, T.; Šlenduuhov, V.; Kilter, J.; Ülavere, E.; Reinson, A. Eesti elektrisüsteemi laiseiresüsteemi arendamine ja analüüs (WAMPAC). Uurimustöö 1.1-4/13/232 / Lep13118 II etapi aruanne. Tallinna Tehnikaülikool, elektroenergeetika instituut. 2014, 257 lk.

Teadusartiklid:

1. Almas, M. S., Kilter, J., and Vanfretti, L. Experiences with Steady-State PMU Compliance Testing using Standard Relay Testing Equipment. IEEE PES Conference on Electric Power Quality and Supply Reliability Conference, 11-13 June 2014, Rakvere, Estonia.
2. Kilter, J., Almas, M. S., Palu, I., and Vanfretti, L. Experiences with Dynamic PMU Compliance Testing using Standard Relay Testing Equipment. IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT 2015), 17-20 February 2015, Washington DC, USA.
3. Tuttelberg, K., Kilter, J. Improvements in applying model transformations to measurement based line parameter estimation. International Conference on Power System Transients (IPST 2015), 15-18 June, 2015, Cavtat, Croatia.
4. Tuttelberg, K., Kilter, J. Real-Time Estimation of Transmission Losses from PMU measurements. IEEE PES PowerTech 2015, 29.06-02.07.2015, Eindhoven, Netherlands.
5. Tuttelberg, K., Kilter, J. Optimal Placement of Branch PMUs for Specified Redundancy and Line Observability. IEEE PES GM 2015, 26-30 July, 2015, Denver, CO, USA.
6. Tuttelberg, K., Kilter, J. Estimation of Transmission Losses from Phasor Measurements on Multiconductor Lines. IEEE Transactions on Power Delivery, under review.
7. Tuttelberg, K., Kilter, J. Propagation of Systematic Errors in Synchronized Phasor Measurements. IEEE Transactions on Power Delivery, under review.